МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Серія: "Нові рішення в сучасних технологіях"

№ 7 (1229) 2017

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 р.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – 242 с.

Державне видання
Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України
КВ №5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською, російською та англійською мовами.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.

Координаційна рада:
Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. **(голова);**
К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. **(секретар);**
А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А. І. Грабчснко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.; С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф., Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф., М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:
Відповідальний редактор: Є. І. Сокол, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.
Відповідальний секретар: Р. С. Томашевський, канд. техн. наук, доц.,
С.І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук.
Члени редколегії: Л. Л. Брагіна, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Т. Долбня, д-р техн. наук, проф.; В. Я. Заруба, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.; Б. В. Кліменко, д-р техн. наук, проф.; О. С. Куценко, д-р техн. наук, проф.; Г. І. Львов, д-р техн. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; М. І. Погорелов, канд. екон. наук, проф.; Л. Г. Раскін, д-р техн. наук, проф.; Р. Д. Ситнік, д-р техн. наук, проф.; В. І. Шустіков, д-р техн. наук, проф.; О. Ю. Заковоротний, канд. техн. наук, доц.; О. О. Ларін, канд. техн. наук, доц.; В. В. Куліченко, канд. техн. наук, доц.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Нові рішення в сучасних технологіях», індексується в наукометричних базах ***WorldCat, Google Scholar, Index Copernicus*** *і включений у довідник періодичних видань бази даних* ***Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)***.

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ «ХПІ»
Протокол № 3 від «24» березня 2017 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2017

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
“KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE”

BULLETIN

OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY “KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE”

Series: " New solutions in modern technologies"

№ 7 (1229) 2017

Collected Works

The publication was founded in 1961

Bulletin of the National Technical University "KhPI". *Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 242 p.

State edition
Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy
KB №5256 from July 2, 2001

The collection is published in Ukrainian, Russian and English.

Bulletin of the National Technical University "KhPI" added to the "List of scientific professional publications of Ukraine, which can be published results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences", approved by the Certifying Board of MES of Ukraine on the activity academic councils, December 15, 2015 . Order number 1328 (appendix 8) of 12.21.2015 p.

Coordinating Board:
L. L. Tovazhnyanskyy, Dr. Tech. Sci., Prof. **(chief);**
K. A. Gorbunov, PhD. Tech. Sci., доц. **(secretary);**
A. P. Marchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; Ye. I. Sokol, member NAS of Ukraine, Dr. Tech. Sci., Prof.; E. E. Aleksandrov, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. V. Boyko, Dr. Tech. Sci., Prof.; F. F. Gladkiy, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. D. Godlevskiy, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. I. Grabchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. G. Danko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. D. Dmitrienko, Dr. Tech. Sci., Prof.; I. F. Domnin, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. V. Epifanov, PhD. Tech. Sci., Prof.; Yu. I. Zaytsev, PhD. Tech. Sci., Prof.; P. A. Kachanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.; S. I. Kondrashov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Kravchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; G. V. Lisachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.; O. K. Morachkovsky, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Nikolaenko, PhD. Hist. Sci, Prof.; P. G. Pererva, Dr. Econ. Sci., Prof.; V. A. Pulyaev, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. I. Rishchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Samorodov, Dr. Tech. Sci., Prof.; G. M. Suchkov, Dr. Tech. Sci., Prof., Yu. V. Timofeev, Dr. Tech. Sci., Prof., M. A. Tkachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.

Editorial Board:
Editor: Ye. I. Sokol, member NAS of Ukraine, Dr. Tech. Sci., Prof.
Secretary: R. S. Tomashevskyi, PhD. Tech. Sci.
S. I. Menshikova, PhD. Phys.-Math. Sci.
Members of the editorial board: L. L. Bragina, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. G. Danko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. T. Dolbnya, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. Y. Zaruba, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.; B. V. Klymenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. S. Kutsenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; G. I. Lvov, Dr. Tech. Sci., Prof.; P. G. Pererva, Dr. Econ. Sci., Prof.; N. I. Pogorelov, PhD. Econ. Sci, Prof.; L. G. Raskin, Dr. Tech. Sci., Prof.; R. D. Sytnik, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Shustikov, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. U. Zakovorotnij, PhD. Tech. Sci.; A. A. Larin, PhD. Tech. Sci.; V. V. Kulichenko, PhD. Tech. Sci.

Bulletin of the National Technical University "KPI" series "New solutions in modern technologies," scientometric databases indexed in ***WorldCat, Google Scholar, Index Copernicus*** *and included in the directory of periodicals database* ***Ulrich's Periodicals Directory*** *(New Jersey, USA).*

Recommended for publication by the Academic Council of NTU "KhPI"
Protocol number 3 of March, 24, 2017

© National Technical University "KhPI", 2017

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Долгих О. М., Гриценко Б.С. *Врахування впливу зміцнення на поле напружень при профілювання і витяжці листового металу* 5

Бондар І. В., Криворучко Д. В. *П'ятиосьова обробка на фрезерних станках с ЧПУ* 10

Буйний Р. О., Перепечений В. О., Зорін В. В. *Регресійні залежності вартісних показників елементів електричних мереж напругою 10-35 кВ* 18

Василець Д. І., Козьміних М. А., Онищенко О. А. *Аналіз методів моделювання систем кондиціонування суднових приміщень* 24

Витязь О. Ю., Грабовський Р. С. *Експрес-оцінювання умов руйнування елементів експлуатованих труб бурильних колон при спуско-підіймальних операціях* 30

Грабовський А. В. *Визначення чутливості власних частот і форм коливань прямокутної пластини до варіювання її інерційно-жорсткістних характеристик* 39

Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Шкурат С. І., Бобров М. М., Недельк о Є. Ю. *Дослідження можливості підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з ZrO_2–7%Y_2O_3 передрекристалізаційною термічною обробкою* 49

Карвацький А. Я., Лазарєв Т. В., Лелека С. В., Педченко А. Ю. *Застосування CAD-систем для розв'язання пружно-пластичних задач з врахуванням ізотропного зміцнення* 55

Коломієць В. О., Чепіга Д. А., Іорданов І. В., Власенко М. М., Александров С. С. *Про динаміку бічних порід при їх раптовому обваленні* 64

Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Аулова Н. С. *Вплив конструкції корпуса букси на ресурс підшипників вагонів* 73

Негрій Т. О., Сахно І. Г., Негрій С. Г. *Вплив енерговитрат шахтарів на рівень безпеки праці* 81

Павленко А. М., Яковлєва І. Г., Чейлитко А. О., Матказина Р. Р. *Створення високопористого вогнетривкового теплоізоляційного матеріалу* 91

Рєзва К. С., Крупа Є. С., Дранковський В. Е., Потетенко О. В., Тиньянова І. І. *Чисельне дослідження потоку у підводі високонапірної гудротурбіни* 97

Становський О. Л., Становська І. І., Монова Д. А., Валід Шер Х., Хеблов І., Торопенко О. В. *Управління ризиками-сюрпризами в проектах реінжинірингу будівельних споруд* 103

Яким Р. С., Сліпчук А. М. *Підвищення якості технології пресування твердосплавних породоруйнівних зубків у шарошки бурових доліт* 110

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

Вавіленкова А. І. *Критерії аналізу логіко-лінгвістичних моделей речень природної мови* 118

Вербицький Є. В., Кисельова А. Г., Кисельов Г. Д. *Підвищення ефективності керування системою електроживлення на основі використання контекстних даних* 123

Єгорченкова Н. Ю., Єгорченков О. В., Хлевна Ю. Л., Оберемок Н. В. *Попродуктова модель управління інформаційними ресурсами проектно-орієнтованого підприємства* 131

Іванов В. В., Чумак Н. В. *Метрологічні аспекти зворотного інжинірингу стандартизованих виробів* 137

Корж Р. О., Федушко С. С., Трач О. Р., Мастикаш О. В., Бандровський Г. О. *Аналіз підрозділів внз для успішного виконання завдань з інформаційної діяльності* 142

Кравченко Ю. В., Толюпа С. В., Барабаш О. В., Труш О. В., Лещенко О. О. *Топологія оптичних мереж FTTH (FIBER-TO-THE-HOME)* 150

Путренко В. В., Пашинська Н. М. *Застосування інструментарію геоінформаційного моделювання для інтелектуального аналізу даних пожежної небезпеки* 156

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ

Гладких І. І., Капочкін Б. Б., Кучеренко Н. В., Капочкіна М. Б. *Вплив аномальних властивостей води на гідроакустичні технології* 164

Головко Д. А., Гиренко Д. В., Головко І. Д. *Нові рішення у технології одержання фератів(VI) із використанням модифікованих SnO_2-електродів* 173

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Лобачова Н. Л., Сабадаш С. М. *Використання барди у технології виробництва житньо-пшеничного хліба* *181*

Никифоров Р. П. *Дослідження динаміки змін функціонально-технологічних та структурно-механічних властивостей білково-вуглеводних напівфабрикатів для збитої десертної продукції при зберіганні* *187*

Оковитий С. І., Пивоваров Є. П., Кондратюк Н. В., Поливанов Є. П., Біліченко М. О. *Дослідження харчових систем на основі пектину. Квантово-хімічне моделювання димерів галактуронової кислоти* *194*

Соловов В. А, Ніколенко М. В., Коваленко В. Л., Гіренко Д. В. *Механізм формування гідроксиду нікелю в системі $Ni(NO_3)_2$—NaOH* *199*

Хохотва О. П., Малихіна К. А., Лиштва П. В., Федорок Я. А. *Фосфорильований вуглецевий сорбент для очистки води від важких металів* *205*

Штамбург В. Г., Штамбург В. В., Кравченко С. В., Мазепа А. В., А Аніщенко. О., Посохов Є. О. *Новий спосіб синтезу солей 1-N-алкоксиамінопіридинія* *211*

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

Чеберячко С. І., Фрундін В. Ю., Чеберячко Ю. І. *Оцінка впливу конструкції клапанів вдихання на перепад тиску респіраторів* *219*

Шведюк Д. А., Пасічний В. М., Радзієвська І. Г. *Моделювання жирнокислотного складу січених напівфабрикатів з м'яса птиці з використанням модифікованих жирів* *225*

Шевченко В. В., Заєць С. С., Олійнійчук А. І. *Аналіз акустичної емісії в процесах механічної обробки з використанням вейвлет – пакетів* *233*

CONTENTS

ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

Arhat R., Puzyr R., Dolgih O., Gritsenko B. *Account of influence of stressing on the field of stresses at profiling and exhausting sheet metal* *5*

Bondar I., Krivoruchko D. *Five-axis machining on CNC milling machines* *10*

Buinyi R., Perepechenyi V. , Zorin V. *Regression relationships for costs of facilites in electrical power networks 10-35 kV* *18*

Vasylets D., Kozminyih N., Onishchenko O. *Analysis methods of air conditioning simulation of ship premises* *24*

Vytyaz O., Hrabovskyi R. *Express-evaluation of conditions of operated drill pipe elements failure in tripping* *30*

Grabovskiy A. *Determination of the sensitivity of own frequencies and modes vibrations of a rectangular plate to the variation of its inertial stiffness characteristics* *39*

Dubovyy O., Karpechenko A., Shkurat S., Bobrov M., Nedel'ko Ye. *Investigation possibilities of increase physical and mechanical properties of plasma powder thermal barrier coatings ZrO_2-7% Y_2O_3 by predrecrystallization heat treatment* *49*

Karvatskii A., Lazariev T., Leleka S., Pedchenko A. *CAD-systems application for solving the elastoplastic problems with isotropic hardening* *55*

Kolomiets V., Chepiga D., Iordanov I., Vlasenko N., Aleksandrov S. *About dynamics of side rock in their sudden collapse* *64*

Martynov I. E., Trufanova A. V., Aulova N. S. *Influence of a design an axle box on the resource of bearings* *73*

Nehrii T., Sakhno I., Nehrii S. *The influence of the energy expenditure on the miners` safety level* *81*

Pavlenko A., Yakovleva I., Cheilytko A., Matkazina R. *Creation Highly Porous Refractory Insulation Material* *91*

Rezvaya K., Krupa E., Drankovskiy V., Potetenko O. V., Tynyanova I. *The numerical research of the flow in the inlet of the high-head hydraulic turbine* *97*

Stanovskyi A., Stanovska I., Monova D., Valid Sher H., Heblov I., Toropenko O. *Risk-surprises management in the projects of re-engineering building structures* *103*

Yashkym R. Slipchuk A. *Refinement technology pressing of tungsten carbide inset cutter in roller cone bit* *110*

INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

Vavilenkova A. *Methods of identifying logical connections between parts of text documents* *118*

Verbytskyi I. V., Kyselova A. G., Kyselov G. D. *Power Grid Converter Control Improvement Based On Contextual Data* *123*

Yehorchenkova N., Yehorchenkov O., Khlevna I., Oberemok N. *Product model of information resources management of a project-oriented enterprise* *131*

Ivanov V., Chumak N. *Metrological aspects of reverse engineering of standardized products* *137*

Korzh R., Fedushko S., Trach O., Mastykas O., Bandrovskyi H. *Analysis of a higher educational institution departments for successful fulfillment of the information activities abstract* *142*

Kravchenko Y., Tolyupa S., Barabash O., Trush A., Leshchenko O. *Topology of optical networks FTTH (FIBER-TO-THE-HOME)* *150*

Putrenko V., Pashynska N. *Applying tools of geoinformation modeling for fire hazard data mining* *156*

CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

Gladkykh I., Kapochkin B., Kucherenko N., Kapochkina M. *Anomalous properties of water and their influence on hydroacoustic technologies* *164*

Golovko D., Girenko D., Golovko I. *New solutions in the ferrates(VI) process with the use of SnO_2-modified electrodes* *173*

Lobachova N., Sabadash S. *Bards use in production technologies rye-wheat bread* *181*

Nykyforov R. *Study of change of functional and technological, structural and mechanical properties of albuminous-carbohydrate semifinished item for the whipped dessert production at storage* *187*

Okovytyy S. I., Pivovarov Y. P., Kondratjuk N. V., Polivanov Y. A., Bilichenko M. O. *Research of food systems based on pectin. Quantum-chemical modeling of galacturonic acid dimers* *194*

Solovov V. A., Nikolenko N. V., Kovalenko V. L., Kotok V. A., Girenko D. V. *Formation mechanism of nickel hydroxide in system $Ni(NO_3)_2$—NaOH* *199*

Khokhotva O., Malykhina K., Lyshtva P., Fedorok Y. *Phosphorylated carbon sorbent for the removal of heavy metals from water* *205*

Shtamburg V. G., Shtamburg V. V., Kravchenko S. V., Mazepa A. V., Anishchenko A. A., Posokhov E. A. *A new synthesis of N-alkoxyaminopyridinium salts* *211*

MODERN INSTRUMENTATION TECHNOLOGY

Cheberiachko S., Frundin V., Cheberiachko Yu. *Evaluation of design valve for inhalation differential pressure respirator* *219*

Shvedyuk D., Pasichniy V., Radzievska I. *Modeling of fatty acid composition of poultry meat minced half-finished products with modified fats application* *225*

Shevchenko V., Zayats S., Oliniychuk A. *Analysis of acoustic emission in the processes of machining using wavelet packets* *233*

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Збірник наукових праць
Серія:
Нові рішення в сучасних технологіях
№ 7 (1229) 2017

Науковий редактор чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф. Є. І. Сокол
Технічний редактор канд. фіз.-мат. наук С. І. Меньшикова

Відповідальний за випуск: канд. техн. наук, доц. Р. С. Томашевський

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Рада молодих вчених, тел. (057)707-69-37, e-mail: vestnik.nsmt@gmail.com

Обл.-вид. № 14-17

Підп. до друку «11» квітня 2017 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10,0. Облік.вид.арк. 10,0.
Тираж 300 прим. Зам. № . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК №3657 від 24.12.2009
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

УДК 621.7.043 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.01

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЕНИЯ НА ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ И ВЫТЯЖКЕ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА

Р. Г. АРГАТ, Р. Г. ПУЗЫРЬ*, О. Н. ДОЛГИХ, Б. С. ГРИЦЕНКО

кафедра технология машиностроения, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг, УКРАИНА
** email: puzyruslan@gmail.com*

АННОТАЦИЯ *Приводятся результаты теоретических исследований, направленных на определение компонент тензора деформаций при радиально-ротационном способе получения ободьев колес. Сложность определения коэффициентов обжима и раздачи и, соответственно, деформаций, обусловлена одновременным действием на заготовку или полуфабрикат растягивающих и сжимающих напряжений, которые создаются вращающимся инструментом в тангенциальном направлении. Полученные зависимости позволяют определять операционные размеры заготовок по переходам профилирования, что дает возможность на этапе проектирования технологических процессов профилирования ободьев колес распределять равномерно деформации на каждой операции и учитывать упрочнение каждого участка профиля. Предложена линейная зависимость для приближенного расчета напряжений текучести в координатах интенсивность деформаций – относительная деформация.*
Ключевые слова: *обод; вытяжка; профилирование; обечайка; упрочнение; деформация; радиус*

ACCOUNT OF INFLUENCE OF STRESSING ON THE FIELD OF STRESSES AT PROFILING AND EXHAUSTING SHEET METAL

R. ARHAT, R. PUZYR, O. DOLGIH, B. GRITSENKO

Chair of Technology of Mechanical Engineering, Kremenchug National University named after Mikhail Ostrogradsky, Kremenchuk, UKRAINE

ABSTRACT. *The results of theoretical studies aimed at determining the components of the strain tensor with a radial-rotational method for producing wheel rims are presented. The difficulty in determining the coefficients of crimping and distribution and, accordingly, deformation, is due to the simultaneous action of tensile and compressive stresses on the workpiece or semi-finished product, which are created by the rotating tool in the tangential direction. The obtained dependences make it possible to determine the operational dimensions of the blanks by the profiling transitions, which makes it possible, at the design stage of technological processes for profiling the wheel rims, to distribute the deformations uniformly on each operation and to take into account the hardening of each section of the profile. A linear dependence is proposed for the approximate calculation of yield stresses in coordinates. The strain rate is the relative deformation. The area a stream gets less compression and smaller, respectively, modulo tangential deformation compared to the distribution area. The value of the yield strength after the first transition profiling will decrease from the end of the semi-finished product to the main stream. For the effect of hardening on subsequent transitions profiling it is necessary to summarize the changes of the yield stress value obtained by the shell in the previous transition profiling, change stresses the fluidity of this transition.*
Key words: *rim; extract; profiling; shell; hardening; deformation; radius*

Введение

В случае радиально-ротационного профилирования, как и в операциях листовой штамповки, разные точки очага деформации получают различные деформации и неодинаковое упрочнение. Напряжение текучести является функцией координат и при совместном решении уравнений равновесия и уравнения пластичности напряжение текучести следует считать переменным. Учет упрочнения при профилировании проводим, используя методику [1].

Решение задачи по отысканию поля напряжений с учетом упрочнения встречает значительные математические трудности. Наибольшие трудности создает взаимосвязь полей напряжений и полей деформаций. Точное решение указанной задачи может быть получено для данных частных условий лишь методом численного интегрирования, если рассматривать процесс деформации во времени [1,2]. Но данный метод достаточно сложен и не позволяет получать замкнутые решения в виде аналитических функций, зависящих от конкретных условий деформирования.

Цель работы

Целью работы является решение задачи определения наибольших относительных деформаций заготовки в процессе радиально-ротационного профилирования ободьев колес и вытяжки цилиндрических деталей, а также обоснование и применение функциональных зависимостей кривой упрочнения в координатах напряжение текучести – относительная деформация первого вида для процесса радиально-ротационного профилирования.

© Р. Г. АРГАТ, Р. Г. ПУЗЫРЬ, О. Н. ДОЛГИХ, Б. С. ГРИЦЕНКО, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Изложение основного материала

Для аналитических решений необходимо иметь формальное выражение кривой упрочнения. Изменение напряжения текучести в процессе деформирования наиболее точно характеризует кривая упрочнения в координатах напряжение текучести – интенсивность деформации. Здесь напряжение текучести зависит от всех трех главных деформаций. Имеются решения для процесса радиально-ротационного профилирования, где напряжение текучести в процессе деформации как раз определяют исходя из интенсивности деформаций, аппроксимируя зависимость степенными функциями вида $\sigma_i = A(\varepsilon_i)^n, \sigma_i = A(e_i)^n, \sigma_i = A(\psi_i)^n$, где A и n – константы данного металла. Однако это приводит к большим математическим трудностям из-за нелинейности связи деформаций между собой.

Менее точные, хотя более простые, решения могут быть получены при использовании кривых упрочнения в координатах напряжение текучести – максимальная по модулю деформация. В процессе профилирования обод колеса получает наибольшие по модулю деформации во время раздачи и обжима в тангенциальном направлении, которые в несколько раз больше меридиональных и радиальных деформаций. Поэтому для учета упрочнения используем кривые первого вида в координатах напряжение текучести – относительная деформация с линейной аппроксимацией кривой упрочнения

$$\sigma_s = \sigma_{T0} + \Pi\varepsilon ,$$

где σ_{T0} – экстраполированный предел текучести; Π – модуль упрочнения; ε – максимальная по модулю деформация [3,4,5].

Обсуждение результатов

В процессе деформирования в зависимости от геометрии инструмента краевые участки цилиндрической заготовки подвергаются тангенциальному растяжению, а элементы центрального ручья – тангенциальному сжатию, $R_n > R_o; R_p < R_o$, где R_0 – радиус обечайки, R_n, R_p – радиусы полки и ручья соответственно.

В начальный момент зазор между контактными периферийными участками роликов в зоне деформации равен толщине $t_з$ заготовки, поэтому межосевое расстояние равно $A = R_в + R_н + t_з$, где $R_в, R_н$ – наибольшие радиусы внутреннего и наружного роликов на участках контакта с заготовкой. При подъеме нижнего ролика на величину $t_з$ $A_1 = A - t_з = R_в + R_н$. К этому моменту глубина профиля $h_i = t_з$, а величина перекрытия роликов $b = 0$. Следовательно, в конце процесса профилирования $b = h_k - t_з$; $A_к = A_1 - b = R_в + R_н - h_к + t_з$ [3,5,6].

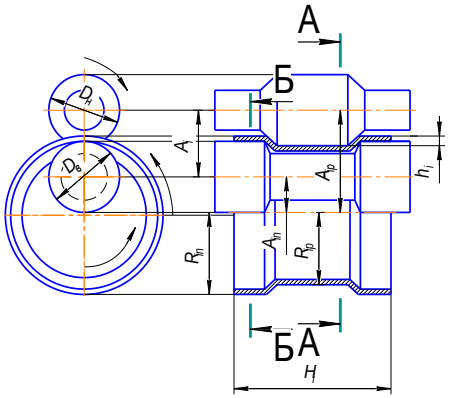


Рис. 1 – Формообразование полуфабриката формовочными роликами (H_i - высота полуфабриката на і обороте; A_i – расстояние между центрами инструмента)

Конечная глубина ручья достигается при непрерывной силовой подаче вала машины $h_к = A - A_к$. Глубина ручья и подача взаимосвязаны:

$$h_к = b + t_з = s_{i1} + s_{i2} + .. s_{in} = \sum s_i , \qquad (1)$$

где s_{i1}, s_{i2}, s_{in} – подача соответственно за первый, второй и *i*-й оборот ролика.

Профилировочными роликами вращающаяся заготовка последовательно перемещается в зону активной пластической деформации. При $h_i = 0$ углы захвата $\alpha_н$ и $\alpha_в$ ограничивают площадь контакта нижнего и верхнего роликов с обечайкой в состоянии покоя, при этом $\alpha_в \approx 0$. В процессе профилирования когда $A \to A_к$, после каждого оборота роликов радиус полки полуфабриката увеличивается на величину приращения s_{in} и радиус ручья уменьшается на величину s_{ip} , т.е. $s_i = s_{in} + s_{ip}$, тогда суммарные приращения $\sum s_{in} = h_1$ и $\sum s_{ip} = h_2$, где h_1 и h_2 – глубина полки и ручья соответственно. Окончательно получим:

$$h_к = h_1 + h_2 . \qquad (2)$$

Таким образом, конечная глубина ручья формируется из двух слагаемых, каждое из которых зависит от геометрических параметров деформирующего инструмента и заготовки. На практике стремятся обеспечить такое оптимальное соотношение этих слагаемых для одинаковой степени деформации участков ручья и полки, которое приводит к получению равнопрочного обода.

Когда заготовка совершит один оборот, вследствие изменения радиусов, размеры зоны контакта для полок и ручья тоже изменятся. Для принятых в колесном производстве коэффициентах раздачи и обжима 1,02–1,06 при определенном соотношении ширины ручья к его высоте, разница в

диаметрах полуфабриката после первого перехода профилирования не превышает 40–50 мм, и поэтому отношение размеров зон контакта практически не изменится. Разница в относительной ширине зоны контакта к получаемой за каждый оборот длине окружности уменьшается для ручья и увеличивается для полок, а в пределе стремится к единице. Таким образом, зоны полок получают большую деформацию по сравнению с зонами центрального ручья и для равномерного формообразования требуется варьирование геометрией заготовки при неизменных диаметрах роликов [6].

Среднее значение главной деформации в тангенциальном направлении на i-ом обороте обечайки может быть определено следующей зависимостью

– зона обжима

$$\varepsilon_{it} = \frac{A_{0p} - (A_{ip})}{A_{0p}} = \frac{(R_0 + R_н) - (R_0 + R_н - s_{ip})}{R_0 + R_н} = \frac{s_{ip}}{R_0 + R_н};$$

– зона раздачи

$$\varepsilon_{it} = \frac{A_{in} - A_{on}}{A_{0n}} = \frac{(R_0 - R_в + s_{in}) - (R_0 - R_в)}{R_0 - R_в} = \frac{s_{in}}{R_0 - R_в},$$

где A_{0p}, A_{0n} – начальные расстояния между осями ролика и заготовки в зонах ручья и полки соответственно; R_0, $R_н$, $R_в$ – радиусы заготовки, наружного и внутреннего роликов соответственно.

Суммарную относительную деформацию заготовки, зависящую от сближения осей деформирующих роликов, можно выразить следующим образом

$$\varepsilon_{tсум} = \frac{(R_н + R_в) - (R_н + R_в - s_i)}{R_н + R_в} = \frac{s_i}{R_н + R_в}, \quad (3)$$

где s_i – суммарная подача, $s_i = s_{in} + s_{ip}$.

Тогда должно выполняться равенство

$$\varepsilon_{tсум} = \varepsilon_{itобж} + \varepsilon_{itразд} = \frac{s_i}{R_н + R_в} = \frac{s_{ip}}{R_0 + R_н} + \frac{s_{in}}{R_0 - R_в}.$$

Подставляя в это равенство значение подачи для зоны полки из условия суммирования и проведя несложные преобразования, будем иметь величину подачи для зоны ручья

$$s_{ip} = s_i \frac{(R_0 - R_в)^2}{(R_н + R_в)^2}, \quad (4)$$

отсюда для зоны полки

$$s_{in} = s_i \left(1 - \frac{(R_0 - R_в)^2}{(R_н + R_в)^2}\right). \quad (5)$$

Но данные выражения учитывают распределение подач приближенно, так как выведены из равенства относительных деформаций, которые можно суммировать лишь при малых пластических деформациях. Более точные решения можно получить, рассматривая истинные деформации, однако, они намного сложнее и их применение в технологических расчетах будет затруднено. Поэтому взаимосвязь истинных и относительных деформаций проведем на основании поправочных коэффициентов, которые были получены ранее [7,8,9].

Тогда (4) и (5) будут иметь вид

$$s_{ip} = 0{,}57 \frac{(R_0 - R_в)^2}{(R_н + R_в)^2} s_i, \quad (6)$$

$$s_{in} = s_i \left(1 - 0{,}57 \frac{(R_0 - R_в)^2}{(R_н + R_в)^2}\right). \quad (7)$$

Далее можно рассчитать конечные размеры полуфабриката, учитывая равенства $\sum s_{in} = h_1$ и $\sum s_{ip} = h_2$, где h_1 и h_2 – глубина полки и ручья соответственно, $h_к = h_1 + h_2$.

Коэффициенты раздачи и обжима равны

$$k_{разд} = \frac{R_n}{R_0}, k_{обж} = \frac{R_0}{R_p}.$$

Относительная деформация через данные коэффициенты определяется как

$$\varepsilon_{itразд} = \frac{R_n}{R_0} - 1, \varepsilon_{itобж} = \frac{R_0}{R_p} - 1.$$

Приравнивая только что полученные формулы с выражениями для тангенциальной деформации (1) и (2), получим зависимости для определения размеров ручья и полки

$$R_p = \frac{R_0}{\left(\frac{s_{ip}}{R_0 + R_н} + 1\right)},$$

$$R_n = \left(\frac{s_{in}}{R_0 - R_в} + 1\right) R_0.$$

Учитывая зависимости (6) и (7), окончательно

$$R_p = \frac{R_0}{\left(0{,}57 \frac{(R_0 - R_в)^2}{(R_0 + R_н)(R_н + R_в)^2} h_к + 1\right)}, \quad (8)$$

$$R_n = \left(h_к \left(\frac{1}{R_0 - R_в} - 0{,}57 \frac{(R_0 - R_в)}{(R_н + R_в)^2}\right) + 1\right) R_0. \quad (9)$$

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Подставим в формулы для относительной деформации значения радиуса ручья R_p и полки R_n, которые зависят от подачи и геометрии инструмента, проводя несложные преобразования, окончательно будем иметь

$$\varepsilon_{itобж} = \frac{(R_0 + R_н)(R_н + R_в)^2}{0{,}57 s_i (R_0 - R_в)^2 + (R_0 + R_н)(R_н + R_в)^2} - 1, \quad (10)$$

$$\varepsilon_{itразд} = s_i \left(\frac{1}{R_0 - R_в} - 0{,}57 \frac{(R_0 - R_в)}{(R_н + R_в)^2} \right). \quad (11)$$

Тогда зависимость для расчета напряжений текучести, например, для участка раздачи примет вид

$$\sigma_s = \sigma_{T0} + П s_i \left(\frac{1}{R_0 - R_в} - 0{,}57 \frac{(R_0 - R_в)}{(R_н + R_в)^2} \right).$$

Когда s_i равно нулю, то напряжение текучести равно $\sigma_{s\min} = \sigma_{T0}$. Максимальным напряжение текучести будет, когда зона полки оформится в посадочную полку, т.е. $\sum s_{in} = h_1$, где h_1 – высота полки

$$\sigma_s = \sigma_{T0} + П h_1 \left(\frac{1}{R_0 - R_в} - 0{,}57 \frac{(R_0 - R_в)}{(R_н + R_в)^2} \right).$$

Принимаем, что изменение напряжения текучести в очаге деформации подчиняется линейной зависимости от s_i, тогда среднее для всего очага деформации в зоне раздачи значение напряжения текучести определяется как полсуммы минимального и максимального значений напряжения текучести на этом участке

$$\sigma_s = \sigma_{T0} + \frac{П}{2} h_1 \left(\frac{1}{R_0 - R_в} - 0{,}57 \frac{(R_0 - R_в)}{(R_н + R_в)^2} \right). \quad (12)$$

Выводы

Как указывалось выше, зоны полуфабриката в процессе профилирования получают неоднородные деформации по ширине профиля. Зона ручья получает меньшие обжатия и соответственно меньшие по модулю тангенциальные деформации по сравнению с зоной раздачи. Поэтому величина предела текучести после первого перехода профилирования будет убывать от торца полуфабриката к центральному ручью.

Для учета влияния упрочнения на последующих переходах профилирования необходимо суммировать изменения напряжения текучести, полученные обечайкой на предыдущем переходе профилирования, с изменением напряжений текучести данного перехода. Для приближенных расчетов можно использовать в качестве среднего, значения напряжения текучести, определяемые по формуле (12), подставляя для значения начального радиуса R_0, радиус зоны ручья или полки предыдущего перехода [10].

Список литературы

1 Інтенсифікація формоутворюючих процесів холодного листового штампування: Монографія / **О. В. Калюжний, В. Л. Калюжний.** – К.: ТОВ «Сік Груп Україна», 2015. – 292 с.

2 **Wang, X.** Effect of forming parameters on sheet metal stability during a rotary forming process for rim thickening / **X. Wang, L. Li, L. Deng, J. Jin, Y. Hu** // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2015. – № 223. – P. 262–273. doi: 10.1016/j. jmatprotec. 2015.04.009.

3 **Guo, Y.Q.** Recent developments on the analysis and optimum design of sheet metal forming parts using a simplied inverse approach / **Y.Q. Guo** // *Comput. Struct.* – 2000. – № 78. – P. 133–148.

4 **Beretta, S.** Correlation between experiments and Strip Yield results on fatigue crack growth in a structural steel / **S. Beretta, , M. Carboni, T. Machniewicz, M. Skorupa** // *Proceedings ECF*, Krakow. – 2002. – № 14. – P. 46–57.

5 **Conceicao Antonio, C.A.** Optimal design of beam reinforced composite structures under elasto-plastic loading conditions / **C.A. Conceicao Antonio, J. Trigo Barbosa, L. Simas Dinis,** *Struct. Multidis. Optim*. – 2000. – № 19. – P. 50–63. doi: 10.1007/s001580050085.

6 **Puzyr, R.** Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece / **R. Puzyr, D. Savelov, R. Argat, A. Chernish** // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – No. 1. – P. 27–32.

7 **Currie, A.** Finite Element Analysis of an Automotive Wheel / **A. Currie** // *A Case Study, National Conference Publication, Institution of Mechanical Engineers, Australia*. – 2002. – P. 16–20.

8 **Mohan Raj, H.** Innovative Concept of Correlating Roll Forming Process with Pressing Simulation by using Altair HyperWorks / **H. Mohan Raj, A. Udayakumar, S. Selvarajan** // *Altair Tehnology Conference, India*. – 2013. – P. 1–9.

9 **Wagoner, R. H.** Metal forming analysis / **R. H. Wagoner, J. L. Chenot** // Cambridge University Press. – 2001. – 376 p.

10 **Puzyr, R.** Determining experimentally the stress-strained state in the radial rotary method of obtaining wheels rims / **R. Puzyr, T. Haikova, O. Trotsko, R. Argat** // *Astern-european of journal of enterprise technologies. Industrial and technology systems.* – 2016. – VOL. 4. – NO 1(82). – P. 52–60. doi: 10.15587/1729-4061.2016.76225.

Bibliography (transliterated)

1 **Kaliuzhnyi, O.V. Kaliuzhnyi, V.L.** Intensyfikatsiia formoutvoriuiuchykh protsesiv kholodnoho lystovoho shtampuvannia: Monohrafiia [Intensification a processes of cold forming sheet metal forming: a Monograph]. K, TOV «Sik Hrup Ukraina», 2015, 292.

2 **Wang, X., Li, L., Deng, L., Jin, J., Hu, Y.** Effect of forming parameters on sheet metal stability during a rotary

forming process for rim thickening. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, **223**, 262–273. doi: 10.1016/j. jmatprotec. 2015.04.009.

3 **Guo, Y.Q.**, et al. Recent developments on the analysis and optimum design of sheet metal forming parts using a simplied inverse approach, *Comput. Struct*, 2000, **78**, 133–148.

4 **Beretta, S, Carboni, M, Machniewicz, T, Skorupa, M.** Correlation between experiments and Strip Yield results on fatigue crack growth in a structural steel, *Proceedings ECF*, 2002, **14**, Krakow, 46–57.

5 **Conceicao Antonio, C.A., Trigo Barbosa, J., Simas Dinis, L**. Optimal design of beam reinforced composite structures under elasto-plastic loading conditions, *Struct. Multidis. Optim*, 2000, **19**, 50–63. – doi: 10.1007/s001580050085.

6 **Puzyr, R., Savelov, D., Argat, R., Chernish, A.** Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece, *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, **1**, 27–32.

7 **Currie, A.** Finite Element Analysis of an Automotive Wheel, *A Case Study, National Conference Publication, Institution of Mechanical Engineers, Australia*, 2002, 16–20.

8 **Mohan Raj, H., Udayakumar, A., Selvarajan, S.** Innovative Concept of Correlating Roll Forming Process with Pressing Simulation by using Altair HyperWorks, *Altair Tehnology Conference, India*, 2013, 1–9.

9 **Wagoner, R.H., Chenot, J. L.** Metal forming analysis, *Cambridge University Press*, 2001, 376.

10 **Puzyr, R., Haikova, T., Trotsko, O., Argat, R.** Determining experimentally the stress-strained state in the radial rotary method of obtaining wheels rims, *Astern-european of journal of enterprise technologies. Industrial and technology* systems, 2016, **4**, 1(82), 52–60. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.76225.

Сведения об авторах (About authors)

Аргат Роман Григорьевич – старший преподаватель, кафедра технология машиностроения, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; г. Кременчуг, Украина; e-mail: argat@ua.fm.

Roman Arhat – Senior Lecturer, Chair of Technology of Mechanical Engineering, Kremenchug National University named after Mikhail Ostrogradsky, Kremenchuk, Ukraine; e-mail: argat@ua.fm.

Пузырь Руслан Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра технология машиностроения, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; г. Кременчуг, Украина; e-mail: puzyruslan@gmail.com.

Ruslan Puzyr – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Chair of Technology of Mechanical Engineering, Kremenchug National University named after Mikhail Ostrogradsky, Kremenchuk, Ukraine; e-mail: puzyruslan@gmail.com.

Долгих Ольга Николаевна – магистрант, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; г. Кременчуг, Украина.

Olga Dolgih – Graduate student, Kremenchug National University named after Mikhail Ostrogradsky, Kremenchuk, Ukraine.

Гриценко Богдан Сергеевич – магистр, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; г. Кременчуг, Украина.

Bogdan Gritsenko – master's degree, Kremenchug National University named after Mikhail Ostrogradsky, Kremenchuk, Ukraine.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Аргат, Р. Г. Учет влияния упрочнения на поле напряжений при профилировании и вытяжке листового металла / **Р. Г. Аргат, Р. Г. Пузырь, О. Н. Долгих, Б.С. Гриценко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 5-9. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.01.

Please cite this article as:

Arhat, R., Puzyr, R., Dolgih, O., Gritsenko, B. Account of influence of stressing on the field of stresses at profiling and exhausting sheet metal. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 5–9, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.01.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Аргат, Р. Г. Врахування впливу зміцнення на поле напружень при профілюванні і витяжці листового металу / **Р. Г. Аргат, Р. Г. Пузырь, О. М. Долгих, Б.С. Гриценко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 5-9. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.01.

АНОТАЦІЯ *Наводяться результати теоретичних досліджень, спрямованих на визначення компонент тензора деформацій при радіально-ротаційному способі отримання ободів коліс. Складність визначення коефіцієнтів обтиску і роздачі і, відповідно, деформацій, обумовлена одночасною дією на заготовку або напівфабрикат напруг,що розтягують і стискають, які створюються обертовим інструментом в тангенціальному напрямку. Отримані залежності дозволяють визначати операційні розміри заготовок по переходах профілювання, що дає можливість на етапі проектування технологічних процесів профілювання ободів коліс розподіляти рівномірно деформації на кожній операції і враховувати зміцнення кожної ділянки профілю. Запропонована лінійна залежність для наближеного розрахунку напруг плинності в координатах: інтенсивність деформацій – відносна деформація.*

Ключові слова: *обід; витяжка; профілювання; обичайка; зміцнення; деформація; радіус*

Поступила (received) 12.03.2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

УДК 621.914 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.02

ПЯТИОСЕВАЯ ОБРАБОТКА НА ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

И. В. БОНДАРЬ*, Д. В. КРИВОРУЧКО

Кафедра «Технология машиностроения, станки и инструменты», Сумский государственный университет, Сумы, УКРАИНА
**email: ishkabond@gmail.com*

АННОТАЦИЯ *В настоящее время, детали машин становятся все более сложными и точными. Это требует развития новых технологий механической обработки. В этих условиях многоосевая обработка на фрезерных станках с ЧПУ является одной из таких технологий. Несмотря на 20-ти летнюю историю развития этот подход все еще требует повышения эффективности для реализации современных задач. В работе представлена классификация пятиосевых станков и описаны сферы их применения. Рассмотрены преимущества и проблемы пятиосевой обработки. Проанализированы современные методы повышения ее эффективности.*
Ключевые слова: *пятиосевая обработка; высокоскоростная обработка; стратегия обработки; траектория обработки; вибрация*

FIVE-AXIS MACHINING ON CNC MILLING MACHINES

I. KOVALEVA, D. KRIVORUCHKO

Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

ABSTRACT *At the present time, the parts of the machines are becoming more complex and precise. This requires the development of new machining technologies. In these conditions, multi-axis CNC machining is one of those technologies. In spite of the 20-year history of development, this approach still requires increasing efficiency in implementation to modern tasks. This article presents classification of the five-axis machines depending of the Z-axis location and the axis types and configuration. By default, Z-axis is spindle axis, and therefore, spindle location is determines the machine type (a vertical or horizontal machine). The particular configuration depends on which two of the three rotation axes are used and where they are located. Catalogues review gave the advantages, features and fields of the application of the particular configuration of five-axis machines. This article shows that path generation and vibrations are the main keypoints for improvement of five-axis machining. Path strategies evaluates from linear to advanced trochoidal with features detection. The high-speed machining is the main approach for finish five-axis machining, but other approaches are also used. Because of lower rigidity the vibration during five-axis machining could be both regenerative and forces depending on tool rotation speed and rigidity of machining system. The traditional methods for vibration decreasing are not effective often.*
Keywords*: Five-axis machining; high speed machining; machining strategy; the trajectory of machining; vibration*

Введение

В современных условиях высокой конкуренции вопросы повышения качества производимой продукции и сокращении сроков изготовления актуальны во всех отраслях машиностроения. Применение на производстве многоосевых фрезеных обрабатывающих центров – это действенный подход в решении данных задач. Фрезерование на пятиосевых обрабатывающих центрах, которое находит сейчас широкое применение, является важной тенденцией развития современной технологии, обеспечивая возможность изготовления пространственно сложных деталей современных машин с высокой точностью и качеством.

Вместе с тем, несмотря на 20-ти летнюю историю развития, представленные на рынке технические решения, реализующие пятиосевую обработку на фрезерных станках с ЧПУ, все еще требует совершенствования и повышения эффективности для реализации современных задач.

Цель работы

Целью настоящей работы является выявление основных тенденций в развитии пятиосевой обработки и резервов повышения ее эффективности.

Классификация пятиосевых станков

Пятиосевая обработка осуществляется на фрезерных станках с ЧПУ, в которых програмно управляются пять осей. Путем анализа и обобщения материалов из каталогов производителей [1–6] систематизирована информация о компоновках пятиосевых станков, также выделены основные сферы их применения (табл. 1).

В зависимости от глубины управления пятиосевая обработка подразделяется на ***позиционную*** и ***непрерывную***. При позиционной пятиосевой обработке шпиндель или стол поворачивается в ряд дискретных положений, а

© И. В. БОНДАРЬ, Д. В. КРИВОРУЧКО, 2017

обработка происходит в несколько установов. Она также называется обработка «3+2», так как дополнительные оси используются только для изменения положения заготовки или инструмента, а фрезерование осуществляется с интерполяцией максимум 3-х осей. При изготовлении деталей машин с циклической симметрией, например, лопаток различных турбин, этого недостаточно, так как не всегда есть возможность доступа инструмента к обрабатываемой поверхности без изменения положения заготовки. При непрерывной пятиосевой обработке может происходить одновременное движение (интерполяция) по всем пяти осям станка. Это открывает дополнительные возможности и обеспечивает следующие преимущества:

– делает процесс обработки деталей со сложной пространственной геометрии более простым и эффективным;

– исключает погрешности установки и закрепления, устраняет человеческий фактор;

– повышает производительность, что ведет к сокращению сроков производства;

– обеспечивает повышение стойкости инструмента и качества обработанной поверхности за счет возможности фрезерования наклонных поверхностей торцевыми и/или боковыми частями фрезы.

На рынке представлены пятиосевые обрабатывающие центры различной компоновки. Дополнительные програмно-управляемые оси могут быть реализованы как в ***вертикальных*** фрезерных обрабатывающих центрах, так и в ***горизонтальных***. Вертикальные обрабатывающие центры более компактны, однако горизонтальные обеспечивают лучшую возможность автоматической загрузки заготовок, обработки крупногабаритных заготовок большой массы, улучшенный отвод стружки и больше подходят для серийного производства.

Компоновка пятиосевых станков может быть различной. Конкретная компоновка зависит от того, какие две из трех осей вращения используются:

а) ***с поворотной шпиндельной головкой*** (рис.1). Преимущества компоновки:

– шпиндель поворачивается вместе с инструментом, что обеспечивает хороший доступ инструменту в карманы и пазы для обработки труднодоступных мест;

– возможность обработки более тяжелых заготовок, чем у станков с глобоидным столом, поскольку стол в этой компоновке имеет значительно большую несущую способность.

б) ***с поворотной шпиндельной головкой и поворотным столом*** (рис. 2). По сравнению со станками предыдущей группы эти станки имеют большую жесткость и нагрузочную способность шпиндельного узла при одинаковых габаритах. Увеличенная площадь поверхности стола дополнительно увеличивает рабочее пространство.

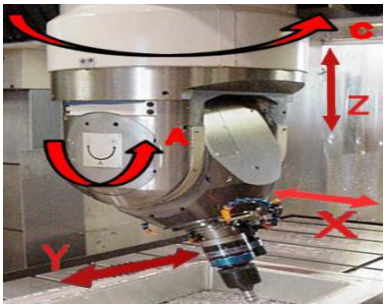
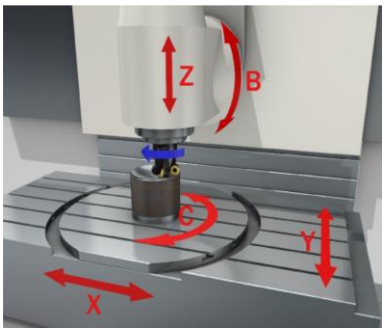


Рис. 1 – Компоновка осей пятиосевых фрезерных станков с поворотной шпиндельной головкой



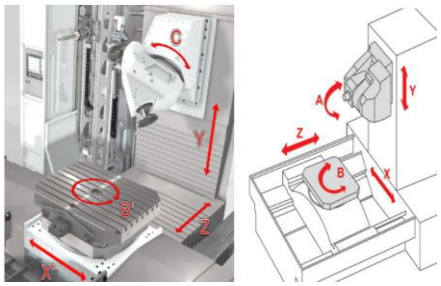


Рис. 2 – Компоновка осей пятиосевых станков с поворотной шпиндельной головкой и поворотным столом

в) ***с глобоидным поворотным столом***. Эта компоновка обеспечивает повышенную жесткость технологической системы и в, вместе с тем, хороший доступ инструмента к труднодоступным местам карманов, поднутрений, пазов. Программирование очень приближено к программированию трехосевых станков. Однако станки с глобоидным столом имеют значительно меньшее рабочее пространство, чем станки других групп при одинаковых габаритных размерах.

Следует обратить внимание, что оси вращения дополнительных осей станка часто выполняют под углом, не равным 90° (рис. 2). Этим достигается экономия рабочего пространства и повышенная жесткость технологической системы, однако усложняется программирование. В силу этого такие станки имеют расширенные функции преобразования систем координат.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Таблица 1 – Область применения пятиосевых обрабатывающих центров

Область применения	Вертикальные пятиосевые станки	Горизонтальные пятиосевые станки
Аэрокосмическая промышленность	Следует учитывать, что много деталей для аэрокосмической промышленности изготавливается из алюминия и титана [8]. Титан является сложным для обработки металлом ввиду ряда обстоятельств, описанных в [8, 9]. Станки для обработки этих материалов должны обладать высокой жесткостью, высоким крутящим моментом, высокомощным шпинделем с максимальными частотами вращения 10000-15000об/мин и обеспечивать высокие рабочие подачи.	
	Относительно негабаритные высокоточные детали (импеллеры, лопастные ротора, лопасти и детали турбин и т. п.)	Габаритные компоненты летательных аппаратов разной сложности (детали каркаса крыла, пилоны, шпангоуты и т. п.)
Общее машиностроение	Наиболее удобны в единичном и мелкосерийном производстве	Наиболее удобны в серийном и крупносерийном производстве
Инструментальная промышленность	Точные детали и детали со сложной конфигурацией небольшой массы	Детали больших габаритов и массы
Медицинская промышленность	Изготовление пространственно сложных имплантатов и других сложных деталей, требующих особо высокого качества (преимущественно на станках с глобоидным столом)	Применяются редко

Особенности применения пятиосевых станков

К преимуществам технологии обработки на пятиосевых фрезерных станках можно отнести [7]:
– возможность обработки детали за один установ. Это хорошо видно при обработке наклонной поверхности (рис.3). Трехосевой станок обрабатывает эту поверхность послойно, снимая за один проход слой 0.1–0.5 мм. В то же время пятиосевое позиционирование позволяет расположить инструмент под необходимым углом к поверхности и удалить материал за один проход. Как результат, повышается производительность обработки и качество обработанной поверхности;

– пятиосевое фрезерование позволяет использовать относительно короткие и жесткие инструменты. Уменьшение деформаций инструмента позволяет применять более высокие скорости резания и способствует снижению вибраций. Поэтому в этом случае намного легче достичь требуемого качества поверхности и уровня точности размеров и формы. Ещё один положительный результат – продление службы инструмента и повышение производительности;

– в пятиосевой обработке инструмент перемещается в пяти осях по отношению к обрабатываемой поверхности. Это позволяет обрабатывать деталь всей режущей частью инструмента, что повышает эффективность его использования. Также свободная геометрическая ориентация позволяет достичь оптимальных углов и добиться стабильного резания, что благоприятно сказывается на сроке службы инструмента и качестве обрабатываемой поверхности.

Вместе с тем сложность программирования пятиосевых станков требует применения специальных CAD/CAM систем, а также повышенной квалификации технолога-программиста. Многообразие и, часто, неопределенность траекторий требует от программиста повышенного внимания и постоянной проверки траектории на недопустимые столкновения инструмента с элементами станка и заготовки.

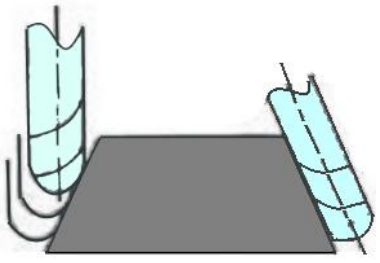


Рис. 3 – Обработка наклонной поверхности при помощи трех- и пятиосевой обработок

Ограничивают эффективность пятиосевой обработки и вибрация, возникающая вследствие более низкой жесткости по сравнению с трехосевыми станками таких же габаритов и снижение жесткости СПИД системы в целом из-за ее сложной пространственной конфигурации.

В настоящее время пятиосевая обработка развивается в различных направлениях. Применение симуляции обработки, которая позволяет с высокой точностью определить характеристики и ограничения

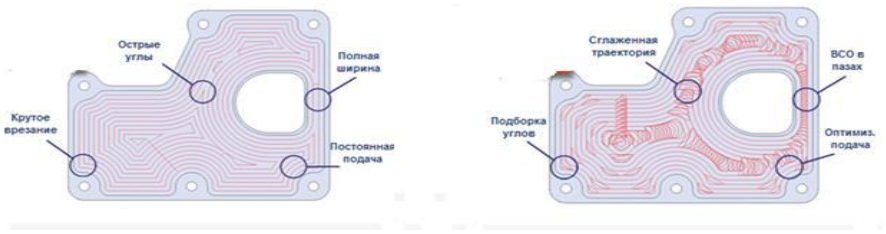
конкретного станка с ЧПУ и учесть их в CAM-системе при дальнейшей разработке управляющих программ [10].

Оптимизация стратегии съема припуска и траектории обработки обеспечивает равномерную нагрузку на инструмент, повышение его стойкости, качества обработанной поверхности и производительности [11, 12]. Баланс между стратегиями резания с высокими подачами, высокоскоростного резания и высокопроизводительного резания может обеспечить дополнительный эффект.

Борьба с вибрациями и погрешностями обработки, вызванные деформацией технологической системы, является одним из основных направлений развития пятиосевой обработки. В частности, активно развивается подход, предполагающий коррекцию управляющей программы на стадии ее проектирования на основании симуляции процесса фрезерования, внесением на этом этапе поправок в траекторию, компенсирующих деформацию технологической системы.

Применение специальных программ, которые позволяют определить оптимальные параметры и режимы обработки, существенно сокращает время на подготовку производства и уменьшает количество ошибок [13].

Стратегии обработки согласно [14] условно можно разделить на инструментальные и кинематические. Под выбором инструментальной стратегии подразумевается выбор последовательности обрабатываемых поверхностей и выбор инструментов. Кинематическая стратегия предполагает выбор траектории движения инструмента при обработке. На рис. 4 для примера представлено сравнение стандартной и усовершенствованной трохоидальной стратегий обработки.



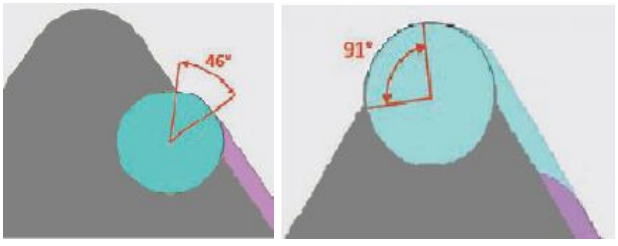
а) стандартная *б) усовершенствованная*

Рис. 4 – Тенденции усовершенствования современной стратегии обработки

В стандартных траекториях обработки (рис. 4а) часто присутствуют острые углы. Они нежелательны при обработке, так как в углу скорость движения инструмента равна нулю, и, следовательно, при изменении направления движение инструмента происходит с ускорением. Это приводит к ускоренному износу инструмента и искажениям обработанной поверхности. Когда возникает необходимость обработки не только прямолинейных участков заготовки, а и канавок по наружному контуру, то возникают проблемы, связанные с применением стандартных стратегий [10]:

– не стабильный режим резания;
– преждевременный износ инструмента;
– низкая производительность.

Согласно [10] при обработке на прямолинейных участках детали угол перекрытия постоянен, следовательно, легко добиться соблюдения режимов резания, рекомендованных производителями инструмента. При обработке по наружному контуру (рис. 5а) угол перекрытия уменьшается, а при обработке внутренних углов (рис. 5б) – резко увеличивается. Вместе с тем повышается нагрузка на станок и инструмент, а также увеличивается количество выделяемого тепла в зоне резания, что приводит к износу инструмента. Чтобы предотвратить рост нагрузки до значений, которые могут повредить инструмент, CAM-система обычно автоматически уменьшает скорость подачи, что приводит к уменьшению производительности.



а) *б)*

Рис. 5 – Угол перекрытия при обработке по наружному (а) и внутреннему (б) контуру

Эту проблему решает стратегия черновой обработки с автоматическим добавлением трохоидальных участков траекторий. Данная

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

стратегия увеличивает срок эксплуатации инструмента благодаря небольшому углу перекрытия и удалению лишь небольшого слоя металла за один проход. Производительность в этой стратегии увеличивается за счет существенного увеличения подачи.

Несмотря на то, что по сравнению с обычными стратегиями чернового фрезерования трохоидальная обработка обладает целым рядом несомненных преимуществ, трохоидальные траектории все же характеризуются непостоянной величиной угла перекрытия. Существующая проблема – это стимул к дальнейшему развитию. Последняя разработка в этой области – стратегия Vortex (стратегия для высокоскоростной и пятиосевой обработки). Данная стратегия представляет собой генерацию CAM-системой особых «вихревых» траекторий, обеспечивающих постоянный угол перекрытия. Как следствие, обеспечиваются стабильные режимы резания.

Высокоскоростная обработка (ВСО) является основной стратегией пятиосевой обработки [15]. Принцип ВСО – малое сечение среза, снимаемое с высокой скоростью резания при большой частоте вращения шпинделя и минутной подаче (рис. 6).

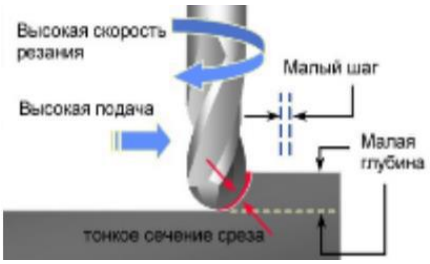


Рис. 6 - Принцип ВСО

За счет этого ВСО обеспечивает высокое качество обработки и производительность, особенно при обработке пространственно-сложных поверхностей из труднообрабатываемых материалов, и, в частности, закаленных сталей. Вместе с тем высокие частоты вращения шпинделя способствуют возбуждению вибраций, как вынужденных колебаний, так и регенеративных автоколебаний.

При обработке деталей в условиях низкой жесткости регенеративные автоколебания возникают только в определенном диапазоне частот вращения шпинделя. Если отношение времени резания одним зубом ($t_{рез}$) к периоду собственных колебаний элемента заготовки или технологической системы ($T_{скэ}$), находится в диапазоне от 1 до 7, то возникают регенеративные автоколебания. Во всех остальных случаях возникают вынужденные колебания [16]. В связи с этим примеры подавления колебаний становятся зависимыми от режима резания. Например, использование фрез с разнонаклонными зубьями неэффективно в скоростной зоне, где есть лишь вынужденные колебания, более того применение несимметричных фрез дополнительно может привести к возбуждению дополнительной неуравновешенности процесса обработки в данном случае. Чем выше частота вращения шпинделя, тем выше значения центробежной силы при дисбалансе и амплитуда вынужденных колебаний. Поэтому, при ВСО большое внимание следует уделять балансировке [17].

Для оценки зон устойчивости к автоколебаниям применяют так называемые «лепестковые диаграммы» [18], определяемые расчетом для данного инструмента и технологической системы. Зоны над кривой считаются нестабильными областями, под кривой – стабильными или зонами устойчивости (рис. 7) [19,20].

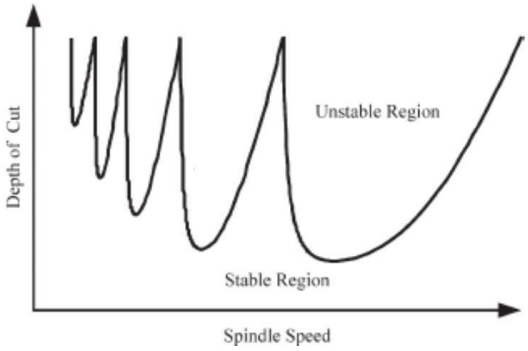


Рис. 7 - Типичная лепестковая диаграмма стабильности

Возникновение вибрации – сложный процесс, на который влияют многие факторы. В [18, 21, 22] описаны факторы, которые влияют на уровень вибраций. Однако при реализации обработки на пятиосевых станках дополнительно следует принимать во внимание [23]:

– диаметр и количество зубьев. Из двух фрез с одинаковым диаметром, но с различным количеством зубьев более жесткой и прочной будет та, у которой количество зубьев больше, так как большим будет и диаметр сердцевины;

– метод заточки зубьев по задней поверхности. Исполнение фрезы с цилиндрической ленточкой на задней поверхности зуба благоприятно сказывается на виброустойчивости при работе в диапазоне возникновения регенеративных автоколебаний;

– фреза с переменным шагом зубьев. Применение таких фрез позволяет избавиться от регенерации колебаний, как основного источника автоколебаний [11].

– применение фрез с разницей в углах наклона соседних зубьев $\Delta\omega$. Например, при $\Delta\omega=2°$ ширина безвибрационного фрезерования увеличивается в два раза, а при $\Delta\omega=4°$ в 3,5 раза. Дальнейшее увеличение $\Delta\omega$ не имеет существенного влияния на вибростойкость [24].

Высокого уровня эффективности обработки можно достичь путем оптимального подбора инструмента и стратегии обработки в комплексе. Круг вопросов, при выборе которых, велик и включает много аспектов. Оптимальным считается выбор с минимально возможными издержками (время простоя станка и расходы на инструмент) и максимально возможной производительностью.

Выводы

Пятиосевая обработка является современным трендом в металлообрабатывающей промышленности, обеспечивая широкие технологические возможности изготовления сложных пространственных изделий, включая корпуса приборов, режущие инструменты, детали штампов, пресс-форм, лопатки, моноколеса и другие изделия. Компоновки пятиосевых станков обеспечивают возможность обработки деталей как в единичном, так и в серийном производстве; деталей как малой, так и большой массы.

Современное развитие этой технологии связано с увеличением скорости резания и подачи, совершенствованием стратегий обработки, которые обеспечивают постоянство нагрузки на инструмент и плавность траектории. Поэтому, высокоскоростная обработка и обработка с большими подачами являются основными методами съема припуска при пятиосевой обработке фрезерованием.

В силу того, что виброустойчивость процесса фрезерования зависит не только от режимов резания, но и от жесткости технологической системы в текущем ее состоянии перспективным направляем является разработка CAM систем, способных еще на стадии проектирования обработки спрогнозировать и учесть деформацию и вибрационное состояние технологической системы, внося, например, поправки в траекторию инструмента и режим резания.

Список литературы

1 HURCO North America : Hurco USA. – Indianapolis. – http://pdf.directindustry.com/pdf/hurco/tmx-series/5650-166536.html.
2 Vertical Machining Center V22 : Makino. – Tokyo. – http://www.balling-maskiner.dk/files/kataloger/V22.pdf.
3 Horizontal Machining Center: Makino. – Tokyo. – http://www.balling-maskiner.dk/files/kataloger/a71_a81.pdf.
4 Overview: Berthold Hermle AG. – Gosheim. – https://www.hermle.de/cms/en/info_center/media_library/printed_documents.
5 CNC universal milling machines DMU 50/70 series : DMG MORI USA. – Hoffman Estates – http:// us.dmgmori.com/blob/304264/16b8b67b9d622a86b3cc4c2a3fce48ba/pm0us13-dmu-50-70-pdf-data.pdf.
6 Universal turn and mill machining CTX beta TC : DMG MORI SEIKI Europe AG. – Dubendorf. – http://media.dmgmori.com/media/epaper/ctx-tc_uk/index.html.
7 **Schiffer, R**. Features and Functions of Five-Axis / **R. Schiffer** // *MoldMaking Technology*. – 2016. –№3. – P. 24-30.
8 **Чазов, П. А**. Особенности конструкции концевых фрез для обработки труднообрабатываемых материалов / **П. А. Чазов, П. Н. Беспалов, Г. И. Коровин** // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 3 (ч. 2) – С. 316-319.
9 **Wang, Z**. Energy Efficient Machining of Titanium Alloys by Controlling Cutting Temperature and Vibration / **Z. Wang, S. Nakashima , M. Larson** // *Procedia CIRP*. – 2014. – vol. 17. – P. 523-528.
10 **Евченко, К.** Стратегия Vortex и технология оптимизации MachineDNA от компании Delcam – новые возможности для повышения производительности фрезерной обработки / **К. Евченко, Д. Маслов, А. Пинчук, С. Таликин** // *Оборудование и инструмент для профессионалов*. – 2013. –№1. – С. 112-115.
11 **Голдберг, М.** Увеличение производительности благодаря использованию инновационных инструментальных технологий / **М. Голдберг** // *Оборудование и инструмент для профессионалов.* – 2013. –№2. – С. 12-14.
12 **Lauwers, B**. Five-axis milling tool path generation with dynamic step-over calculation based on integrated material removal simulation / **B. Lauwers, D. Plakhotnik** // Manufacturing Technology. – 2012. – №61. – P. 139-142.
13 **Никоноров, А.** Seco Business Solutions: несколько шагов к повышению эффективности в металлообработке / **А. Никоноров** // *Оборудование и инструмент для профессионалов*. –2012. –№3. – С. 76–77.
14 **Аверченко, А. В.** Автоматизация выбора стратегий обработки конструкторско–технологических элементов деталей в технологической подготовке производства изделий/ **А. В. Аверченко** // *Вестник УГАТУ*. –2012. –. т. 16 №3(48). –С. 76-80.
15 **Ловыгин, А. А.** Будущее CAM–систем / **А. А.** Ловыгин // *САПР и графика*. – 2016. – №1. – С. 8-17.
16 **Козлова, О. Б.** Пригнічення регенеративних автоколивань при фрезеруванні тонкостінного елемента деталі кінцевими циліндричними фрезами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01 [Електронний ресурс] / **О. Б. Козлова** ; [наук. керівник Дядя С. І.] ; Харківський політехнічний ін–т, нац. техн. ун-т. – Харків, 2016. – 24 с. – Бібліогр. : С. 16-21. – укр.
17 **Грачев, Ю. В.** Повышение эффективности высокоскоростного фрезерования центробежных колес / **Ю. В. Грачев, Г. В. Пухальская, С. В. Критчин, Т. А. Панченко** // *Вестник двигателестроения.* – 2011. – №1. – С. 95-100.
18 **Внуков, Ю. Н.** Эволюция развития исследований сил при цилиндрическом фрезеровании от статических к динамическим условиям обработки (часть 2) / **Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова** // *Сучасні технології в машинобудуванні*. – 2016. – вип. 11. – С. 20-41.
19 **Reza Kashyzadeh, K.** Study of Chatter Analysis in Turning Tool And Control Methods – A Review / **K. Reza Kashyzadeh, M. J. Ostad–Ahmad–Ghorabi** // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. – 2012. – Vol. 2, Issue 4. – P. 1-5.
20 **Jean–Vincent Le Lan.** Providing stability maps for milling operation/ **Jean–Vincent Le Lan, Audrey Marty, Jean–Francois Debongnie** // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2007. – № 47. – P. 1493-1496.
21 Основы теории резания материалов: *учебник [для высш. учебн. заведений]* / **Мазур Н. П., Внуков Ю. Н.,**

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Грабченко А. И. и др. ; под общ. ред. Н. П. Мазура и А. И. Грабченко. – 2–е изд., перераб. и дополн. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.

22 **Yusoff, A. R.** The role of tool geometry in process damped milling / **A. R. Yusoff, S. Turner, Ch. M. Taylor, N. D. Sims** // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170–010–2586–6 Springer Publication (in press). P. 883-895.

23 **Внуков Ю. Н.** О влиянии конструктивных и геометрических характеристик концевых фрез на виброустойчивость процесса фрезерования / **Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова** // *Резание и инструмент в технологических системах*. – 2016. – №86. – С. 7-17.

24 **Winston A. Knight**. Fundamentals of Metal Machining and Maching Tools / **Winston A. Knight** // *Geofrey Boothoyd*. – Third Edition, 2005. – 608 p.

Bibliography (transliterated)

1 HURCO North America : Hurco USA. – Indianapolis. – http://pdf.directindustry.com/pdf/hurco/tmx-series/5650-166536.html.

2 Vertical Machining Center V22 : Makino. – Tokyo. – http://www.balling-maskiner.dk/files/kataloger/V22.pdf.

3 Horizontal Machining Center: Makino. – Tokyo. – http://www.balling-maskiner.dk/files/kataloger/a71_a81.pdf.

4 Overview: Berthold Hermle AG. – Gosheim. – https://www.hermle.de/cms/en/info_center/media_library/printed_documents.

5 CNC universal milling machines DMU 50/70 series : DMG MORI USA. – Hoffman Estates – http:// us.dmgmori.com/blob/304264/16b8b67b9d622a86b3cc4c2a3fce48ba/pm0us13-dmu-50-70-pdf-data.pdf.

6 Universal turn and mill machining CTX beta TC : DMG MORI SEIKI Europe AG. – Dubendorf. – http://media.dmgmori.com/media/epaper/ctx-tc_uk/index.html.

7 **Schiffer, R**. Features and Functions of Five-Axis. MoldMaking Technology. 2016, №**3**, 24-30.

8 **Chazov, P. A., Bespalov, P. N., Korovyn, H. Y.** Osobennosty konstruktsyy kontsevykh frez dlya obrabotky trudnoobrabatyvaemykh materyalov [Design features end mills for machining hard materials]. Fundamental'nye issledovanija. [fundamental research., 2016, № **3** (chast' 2), 316-319.

9 **Wang, Z., Nakashima, S., Larson, M.** Energy Efficient Machining of Titanium Alloys by Controlling Cutting Temperature and Vibration. Procedia CIRP, 2014, vol. **17**, 523-528.

10 **Evchenko, K., Maslov, D., Pinchuk, A., Talikin, S.** Strategija Vortex i tehnologija optimizacii MachineDNA ot kompanii Delcam – novye vozmozhnosti dlja povyshenija proizvoditel'nosti frezernoj obrabotki [Vortex MachineDNA strategy and optimization technology from Delcam – new opportunities to improve milling productivity]. Oborudovanie i instrument dlja professionalov. [Equipment and tools for professionals].2013, №**1**, 112-115.

11 **Goldberg, M.** Uvelichenie proizvoditel'nosti blagodarja ispol'zovaniju innovacionnyh instrumental'nyh tehnologij. [The increase in productivity by using the innovative instrumental technologies] Oborudovanie i instrument dlja professionalov. [Equipment and tools for professionals].2013, №**2**, 12-14.

12 **Lauwers, B., Plakhotnik, D.** Five-axis milling tool path generation with dynamic step-over calculation based on integrated material removal simulation. Manufacturing Technology. 2012, №**61**, 139-142.

13 **Nikonorov, A.** Seco Business Solutions: neskol'ko shagov k povysheniju jeffektivnosti v metalloobrabotke. [Seco Business Solutions: a few steps to improve the efficiency in metalworking]. Oborudovanie i instrument dlja professionalov. [Equipment and tools for professionals]. 2012, №**3**, 76-77.

14 **Averchenko, A. V.** Avtomatizacija vybora strategij obrabotki konstruktorsko- tehnologicheskih jelementov detalej v tehnologicheskoj podgotovke proizvodstva izdelij. [Automation of choice of processing strategies of design and technological elements of details in the technological preparation of production of products]. Vestnik UGATU. [Vestnik UGATU] 2012. Vol. **16** №3(48), 76-80.

15 **Lovygin, A. A.** Budushhee CAM-sistem. [Future of CAM-systems]. SAPR i grafika. [CAD and graphics.]. 2016, №**1**, 8-17.

16 **Kozlova, O. B.** Suppression of regenerative self-excited oscillations at milling of the thin-walled element of detail by end-capping cylindrical milling cutters: Dissertation thesis Candidate of Engineering Science. Kharkiv. 2016, 24 p.

17 **Grachev, Ju. V., Puhal'skaja, G. V., Kritchin, S. V., Panchenko, T. A.** Povyshenie jeffektivnosti vysokoskorostnogo frezerovanija centrobezhnyh koles. [Providing of parameters of exactness and quality at the high speed milling of centrifugal wheels]. Vestnik dvigatelestroenija. [Herald of Aeroenginebuilding]. 2011, №**1**, 95-100.

18 **Vnukov, Ju. N., Djadja, S. I., Kozlova, E. B.** Jevoljucija razvitija issledovanij sil pri cilindricheskom frezerovanii ot staticheskih k dinamicheskim uslovijam obrabotki (chast' 2). **[**Evolution of research of forces in the cylindrical milling from static to dynamic machining conditions (part 2)]. Suchasni Tekhnolohii v Mashynobuduvanni. [Modern Technologies in Mechanical Engineering]. 2016, №**11**, 20–41.

19 **Reza Kashyzadeh, K., Ostad–Ahmad–Ghorabi, M. J.** Study of Chatter Analysis in Turning Tool And Control Methods – A Review. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2012, Vol. **2**, Issue 4, 1-5.

20 **Jean–Vincent Le Lan, Audrey Marty, Jean–Francois Debongnie.** Providing stability maps for milling operation. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2007, № **47**, 1493-1496 p.

21 **Mazur, N. P., Vnukov, Ju. N., Grabchenko, A. I.** Basics of the theory of cutting. Kharkiv: NTU «KhPI». 2013.

22 **Yusoff, A. R., Turner, S., Taylor, Ch. M., Sims, N. D.** The role of tool geometry in process damped milling. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, doi: 10.1007/s00170–010–2586–6 Springer Publication (in press). 883-895.

23 **Vnukov, Ju. N., Djadja, S. I., Kozlova, E. B.** O vlijanii konstruktivnyh i geometricheskih harakteristik koncevyh frez na vibroustojchivost' processa frezerovanija. [About the influence of structural and geometric characteristics of the end mills on chatter stability of the milling process]. Rezanie i instrument v tehnologicheskih sistemah [Cutting and tool in technological systems]. 2016, №**86**, 7-17.

a. 24 **Winston, A. Knight**. Fundamentals of Metal Machining and Maching Tools. Geofrey Boothoyd. – Third Edition, 2005

Сведения об авторах (About authors)

Бондарь Инна Владимировна – аспирант, Сумский государственный университет, аспирант кафедры «Технология машиностроения верстаты и инструменты», г. Сумы, Украина; e-mail: *ishkabond@gmail.com*

Inna Bondar – postgraduate, Sumy State University, postgraduate Department of Mechanical Engineering technology machines and tools, Sumy, Ukraine; e-mail: *ishkabond@gmail.com*

Криворучко Дмитрий Владимирович – доктор технических наук, доцент, Сумский государственный университет, ведущий научный сотрудник кафедры «Технология машиностроения верстаты и инструменты», г. Сумы, Украина; e-mail: dmytro.kryvoruchko@gmail.com

Dmitrij Krivoruchko – Doctor of Technical Sciences, Docent, Sumy State University, Leading Researcher Department of Mechanical Engineering technology machines and tools, Sumy, Ukraine; e-mail: dmytro.kryvoruchko@gmail.com

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Бондарь, И. В. Пятиосевая обработка на фрезерных станках с ЧПУ / **И. В. Бондарь, Д. В. Криворучко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 10-17. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.02.

Please cite this article as:

Bondar, I., Krivoruchko, D. Five-axis machining on CNC milling machines. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 10–17, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.02.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Бондар, І. В. П'ятиосьова обробка на фрезерних станках с ЧПУ / **І. В. Бондар, Д. В. Криворучко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 10-17. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.02.

АНОТАЦІЯ *В даний час деталі машин стають все більш складними і точними. Це вимагає розвитку нових технологій механічної обробки. У цих умовах багатоосьова обробка на фрезерних верстатах з ЧПУ є однією з таких технологій. Незважаючи на 20-ти річну історію розвитку цей підхід все ще вимагає підвищення ефективності для реалізації сучасних завдань. В роботі подано класифікацію п'ятиосьових верстатів і описані сфери їх застосування. Розглянуто переваги та проблеми п'ятиосьової обробки. Проаналізовано сучасні методи підвищення її ефективності.*

Ключові слова: *п'ятиосьова обробка; високошвидкісна обробка; стратегія обробки; траєкторія обробки; вібрація*

Поступила (received) 09.03.2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

УДК 621.311 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.03

РЕГРЕСІЙНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ВАРТІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НАПРУГОЮ 10-35 кВ

***Р. О. БУЙНИЙ*[1*], *В. О. ПЕРЕПЕЧЕНИЙ*[2], *В. В. ЗОРІН*[3]**

[1] кафедра електричних систем і мереж, Чернігівський національний технологічний університет, Чернігів, УКРАЇНА
[2] кафедра систем електропостачання та електроспоживання міст, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків, УКРАЇНА
[3] кафедра електропостачання, Інститут енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», Київ, УКРАЇНА
[*]email: buinyiroman@gmail.com

АНОТАЦІЯ *Обґрунтування заходів зі зменшення технологічних витрат електричної енергії потребує достовірних вартісних показників. Автори дослідили зміну вартості кабельно-провідникової продукції від її перерізу, а також вартості трансформаторів від їх номінальної потужності та отримали відповідні регресійні залежності для напруг 10, 20 та 35кВ. Дані залежності можуть бути використані для аналітичного розв'язку оптимізаційних задач.*
Ключові слова: *вартісні показники; трансформатори; проводи; кабелі; регресійні залежності; коефіцієнт детермінації; середньоквадратична похибка*

REGRESSION RELATIONSHIPS FOR COSTS OF FACILITES IN ELECTRICAL POWER NETWORKS 10-35 kV

***R. BUINYI*[1], *V. PEREPECHENYI*[2], *V. ZORIN*[3]**

[1] Department of Electrical Power Systems and Networks, Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, UKRAINE
[2] Department Systems of Power Supply and Electro-consumption of Cities, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, UKRAINE
[3] Department of electricity, Institute for Energy Saving and Energy Management NTUU «I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT *Reliable cost estimates are necessary to justify the technological measures aimed at reducing power losses in electric power networks. It is of particular importance for the 10-35kV networks in Ukraine and CIS countries. The authors analyzed large amounts of the relevant data and concluded that facilities costs are nearly linear functions of voltage class. The following cost dependencies are built and analyzed: cost of oil transformers vs rated apparent power, cables with XLPE insulation vs their cable cross sectional area and screen area, and ACSR conductors overhead lines vs cross sectional area. The corresponding regression lines for voltages of 10, 20 and 35 kV were also built and the quality of approximation is estimated with the coefficient of determination and mean-square error. More than 97% of variation in transformer costs is explained by their rated apparent power, more than 99% of variation in cable with XLPE insulation - by cross sectional area and screen area, and more than 99% of variation in the cost of ACSR conductors – by their cross sectional area. These results can be used to analytically solve the optimization problems and to justify the technological measures aimed at reducing power losses in medium voltage electric power networks.*
Keywords*: cost parameters; transformers; wires; cables; depending regression; coefficient of determination; the mean-square error*

Вступ

Останнім часом стає все важче робити техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) прийнятих рішень у електроенергетиці як на етапі проектування, так і на етапі виконання наукових досліджень. Це пояснюється практично повною відсутністю вартісних показників електрообладнання на офіційних сайтах заводів-виробників електротехнічної продукції. Причинами цього є, як правило, нестабільність національної валюти та так звана «корупційна» складова, яка може бути закладена «за бажанням» покупця електротехнічної продукції. Аналіз офіційних сайтів заводів-виробників електротехнічної продукції дозволив зробити висновок, що «закритість» вартісних показників напряму пов'язана з номінальною напругою електричних мереж, для яких призначене електрообладнання. Причому зі збільшенням класу напруги «закритість» інформації збільшується, що пояснюється зменшенням конкуренції серед виробників обладнання.

В даний час нагальною проблемою в електричних мережах України та ближнього зарубіжжя, яку треба вирішувати першочергово, є зменшення втрат потужності та електричної енергії в електричних мережах до рівня, якого досягли провідні Європейські країни [1-3]. Найбільш гостро зазначена проблема стоїть в електричних мережах 0,38-35кВ [4-5].

Для обґрунтування заходів зі зменшення втрат потужності та електричної енергії (наприклад, перехід

© Р. О. БУЙНИЙ, В. О. ПЕРЕПЕЧЕНИЙ, В. В. ЗОРІН, 2017

на більш високий клас напруги) необхідно знати вартісні показники обладнання, а для наукового обґрунтування – залежності вартостей від технічних параметрів (наприклад, перерізу проводу/кабелю, потужності трансформатора тощо). Деяка інформація щодо вартісних показників наведена у нормативному документі Міненерговугілля [6], проте для вирішення більшості задач з ТЕО її недостатньо.

Мета роботи

Отримання регресійних залежностей вартостей кабельно-провідникової продукції від її перерізу та трансформаторів від їх потужності на напругах 10-35 кВ.

Основні матеріали дослідження

Оскільки на етапі проектування та вирішення деяких наукових задач більшість вихідної інформації є заданою з невеликою точністю або взагалі в розмитому вигляді деяким діапазоном значень, то актуальним стає питання отримання залежності вартостей окремих елементів електричних мереж від їх параметрів, що дозволить розв'язувати оптимізаційні задачі направлені на підвищення ефективності їх роботи.

Аналіз великої кількості наявних вартісних показників, зокрема з джерел [7-8], дозволяє припустити, що залежність вартості обладнання є практично лінійною функцією від класу напруги. Для зменшення порядку величин подальші міркування були зроблені для вартостей з ПДВ у доларах США згідно рекомендацій [9] станом на 07.10.2016.

Графіки залежностей вартостей трансформаторів марки ТМ C_T від їх номінальної потужності S_{TH} для напруги 10/0,4, 20/0,4 та 35/0,4 кВ за даними прайс-листів заводів виробників зображені на рис.1.

З рис.1 видно, що залежності $C_T = f(S_{TH})$ є майже лінійними функціями, тому для їх представлення у вигляді функціональної залежності можна скористатися загальним рівнянням лінійної регресії [10]:

$$\hat{Y} = a_0 + a_1 \cdot x_1 + \ldots + a_n \cdot x_n, \qquad (1)$$

де a_0, a_1, ..., a_n – коефіцієнти регресії; x_1, ..., x_n – фактори, що впливають на величину вартості; n – кількість таких факторів.

Достовірність апроксимації можна оцінити за коефіцієнтом детермінації [10]:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST}, \qquad (2)$$

де SSR, SST – сума квадратів регресії та повна сума квадратів відповідно.

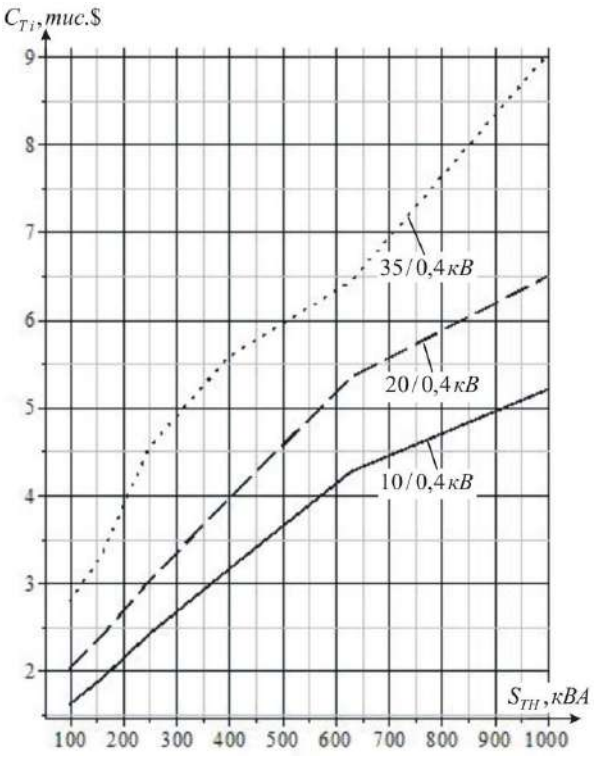


Рис. 1 – Залежності вартостей трансформаторів C_T від їх номінальної потужності S_{TH} на напругах 10/0,4 кВ, 20/0,4 кВ та 35/0,4 кВ

Величини SSR та SST розраховуються за формулами:

$$SSR = \sum_{i=1}^{k} \left(\hat{Y}_i - \overline{Y}\right)^2; \qquad (3)$$

$$SST = \sum_{i=1}^{k} \left(Y_i - \overline{Y}\right)^2; \qquad (4)$$

де Y_i, $\hat{Y}_i$, $\overline{Y}$ – фактичне, розраховане за регресійним рівнянням та середнє значення функції за заданих параметрів x_i відповідно; k – кількість заданих точок у вхідній вибірці з даними.

Для оцінки точності також використовують середньоквадратичну похибку:

$$S_{YX} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k} \left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2}{k-2}}. \qquad (5)$$

Використовуючи формули (1)-(5) можна отримати регресійні залежності вартості

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

трансформаторів від його номінальної потужності (у кВА) для класів напруг 10/0,4, 20/0,4 та 35/0,4 кВ:

$$C_{T10} = 1{,}48 + 0{,}004 \cdot S_{TH}\text{, тис.\$;} \quad (6)$$

$$C_{T20} = 1{,}85 + 0{,}005 \cdot S_{TH}\text{, тис.\$;} \quad (7)$$

$$C_{T35} = 2{,}47 + 0{,}0066 \cdot S_{TH}\text{, тис.\$.} \quad (8)$$

Результати оцінки точності отриманих регресійних залежностей по відношенню до відомих вартостей трансформаторів марки ТМ зведені у табл.1.

Таблиця 1 – Результати оцінки точності регресійних залежностей виду $C_T = f(S_{TH})$ для напруг 10/0,4, 20/0,4 та 35/0,4 кВ

Параметр	Значення параметра для напруги, кВ		
	10/0,4	20/0,4	35/0,4
Коефіцієнт детермінації R^2	0,976	0,976	0,977
Середньоквадратична похибка S_{YX}, тис.$	±0,242	±0,302	±0,385

З табл.1 видно, що 97,6% варіації вартості трансформаторів на напрузі 10 та 20 кВ пояснюється саме їх номінальною потужністю, а 2,4% – іншими другорядними факторами. Дані результати свідчать про те, що отримані регресійні рівняння (6)-(8) є адекватними своїм вихідним даним та можуть бути використані для подальших ТЕО.

Аналогічно можна спробувати описати вартості проводів для повітряних ліній (ПЛ) та кабелів для кабельних ліній (КЛ) електропередавання.

Оскільки, останнім часом, в проектах перспективного розвитку міських електричних мереж застосовують кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену, то подальші міркування будуть стосуватися саме таких кабелів. Вартість 3-х фаз таких кабелів залежить не тільки від перерізу жили F та номінальної напруги, але і від перерізу екрану $F_{екр}$. Тому функція (1) набуде вигляду:

$$C_{КЛ} = f(F, F_{екр}) = a_0 + a_1 \cdot F + a_2 \cdot F_{екр}. \quad (9)$$

Залежності погонних вартостей 3-х фаз кабелю на напругу 10, 20 та 35 кВ з ізоляцією зі зшитого поліетилену марки АПвЭгаПу, побудовані за даними прайс-листів заводів виробників кабельної продукції, від перерізу жили F для різних перерізів екранів $F_{екр}$ зображені на рис. 2.

Отримані регресійні залежності погонної вартості 3-х фаз кабелів для класів напруг 10, 20 та 35 кВ мають вид:

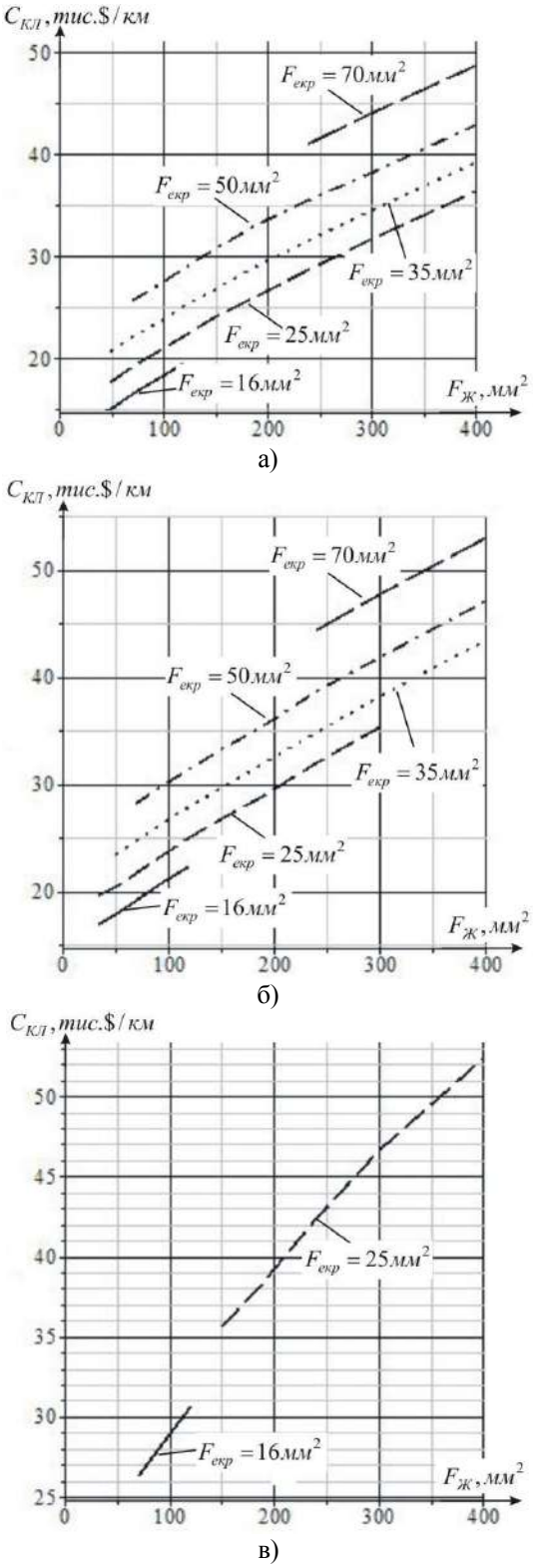


Рис. 2 – Залежності погонної вартості 3-х фаз кабелю марки АПвЭгаПу від його перерізу F за перерізу екрану $F_{екр}$ = 16, 25, 35, 50 та 70мм^2 на напругу: а) 10 кВ; б) 20 кВ; в) 35 кВ

$$C_{КЛ10} = 7{,}344 + 0{,}053 \cdot F + 0{,}317 \cdot F_{екр}, \text{ тис.\$/км;} \quad (10)$$

$$C_{КЛ20} = 9{,}68 + 0{,}058 \cdot F + 0{,}31 \cdot F_{екр}, \text{ тис.\$/км.} \quad (11)$$

$$C_{КЛ35} = 15{,}266 + 0{,}068 \cdot F + 0{,}414 \cdot F_{екр}, \text{ тис.\$/км.} \quad (12)$$

Результати оцінки точності отриманих регресійних залежностей по відношенню до відомих вартостей кабелів зведені у табл.2.

Таблиця 2 – Результати оцінки точності регресійних залежностей виду $C_{КЛ} = f(F, F_{екр})$ для напруги 10, 20 та 35 кВ

Параметр	Значення параметра для напруги, кВ		
	10	20	35
Коефіцієнт детермінації R^2	0,999	0,999	0,998
Середньоквадратична похибка $S_{УХ}$, тис.\$	±0,415	±0,321	±0,49

З табл. 2 видно, що 99,9% (99,8%) варіації погонної вартості 3-х фаз кабелю з ізоляцією зі зшитого поліетилену на напрузі 10 та 20 кВ (35 кВ) пояснюється саме його перерізами жили F та екрану $F_{екр}$, а 0,1% (0,2%) – іншими другорядними факторами. Дані результати свідчать про те, що отримані регресійні рівняння (10)-(12) є адекватними своїм вихідним даним та можуть бути використані для подальших ТЕО.

Використовуючи отримані залежності виду $C_{КЛ} = f(F, F_{екр})$ можна отримати вартість 3-х фаз КЛ відповідного класу напруги за будь-якого перерізу жили F та перерізу екрану $F_{екр}$. Дані залежності є справедливими для кабелів на напруги 10, 20 та 35 кВ, які є складовими електричних мереж категорій А та В у відповідності до IEC 60183 та IEC 60502-2 [11-12].

У електричних мережах з малою щільністю навантаження в основному використовуються неізольовані проводи марки АС. Тому для таких мереж необхідно отримати регресійні рівняння погонної вартості 3-х фаз проводу від його перерізу F.

Залежності погонних вартостей проводу марки АС від його перерізу F (для 3-х фаз ПЛ) зображені на рис.3 (за даними прайс-листів заводів виробників кабельно-провідникової продукції).

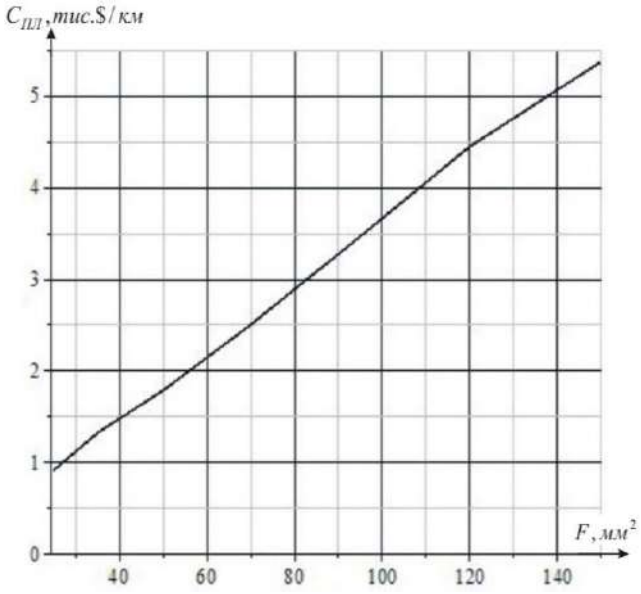


Рис. 3 – Залежності погонної вартості проводів у 3-х фазах ПЛ від їх перерізу F

З рис. 3 видно, що залежність виду $C_{ПЛ} = f(F)$ також можна представити у вигляді рівняння (1):

$$C_{ПЛ} = f(F) = a_0 + a_1 \cdot F. \quad (13)$$

Отримане рівняння регресії погонної вартості 3-х фаз проводу марки АС від перерізу F має вид:

$$C_{ПЛ} = 0{,}006 + 0{,}0358 \cdot F, \text{ тис.\$/км.} \quad (14)$$

Результати оцінки точності рівняння регресії по відношенню до вартісних показників заводів-виробників провідникової продукції зведено у табл.3.

Таблиця 3 – Результати оцінки точності регресійних залежностей виду $C_{ПЛ} = f(F)$

Параметр	Значення параметра
Коефіцієнт детермінації R^2	0,999
Середньоквадратична похибка $S_{УХ}$, тис.\$	±0,062

З табл.3 видно, що 99,9% варіації погонної вартості 3-х фаз проводу пояснюється саме його перерізом F, а 0,1% – іншими другорядними факторами. Дані результати свідчать про те, що отримане регресійне рівняння (14) є адекватними своїм вихідним даним та може бути використане для подальших ТЕО.

Використовуючи отриману залежність виду $C_{ПЛ} = f(F)$ можна отримати орієнтовну вартість проводу у трифазній ПЛ за будь-якого перерізу F.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Висновки

Отримано регресійні залежності вартостей на напругах 10, 20 та 35кВ:

– кабельно-провідникової продукції від перерізу жил (та екранів);

– трансформаторів від їх номінальної потужності.

Зазначені залежності можуть бути використані для техніко-економічного обґрунтування заходів зі зменшення втрат потужності та електричної енергії у розподільних електричних мережах України та під час наукових досліджень.

Отримані залежності дозволять шукати розв'язок оптимізаційної задачі аналітично.

Список літератури

1 EURELECTRIC. Electricity for Europe. – Режим доступу: http://www.eurelectric.org/powerdistributionineurope/
2 **Anjan, K. D.** Powerline Ampacity System: Theory, Modeling and Applications – CRC Press, 2000. – 258p.
3 **Turan, G.** Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design. – 2nd Edition. – CRC Press, 2009. – 728p.
4 **Зорин, В. В.** Модели и методы расчета и оценки потерь мощности и электрической энергии в распределительных сетях 0,38кВ / **В. В. Зорин, Р. А. Буйный, В. А. Перепеченый** // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. – 2015. – №5(136). – С.19-27.
5 **Гомельський, Д. К.** Кластеризація структур розподільних електричних мереж напругою 10 кВ / **Д. К. Гомельський, Р. О. Буйний, А. О. Квицинський** // *Енергетика та електрифікація*. – 2014. – №4. – С.34-37.
6 СОУ-Н МЕВ 45.2-37471933-44. Укрупнені показники вартості будівництва підстанцій напругою від 6 кВ до 150 кВ та ліній електропередавання напругою від 0,38 кВ до 150 кВ. Норми – К.: Міненерговугілля України, 2015. – 40с.
7 Сайт комісії «ТОВ «АЕС-8». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://atrans.in.ua/transformatoryi-tm-106-04-novyie/c1 - 07.10.2016.
8 Сайт ПАТ «Завод «Южкабель». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.yuzhcable.com.ua/. – 07.10.2016.
9 ГКД 340.000.002. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні мережі – К.: Міненерго України, 1997. – 53с.
10 **Patrick, K. W.** A Practical Introduction to Econometric Methods: Classical and Modern / **K. W.Patrick, S. T. Sonja.** – Barbados: University of the West Indies Press, 2002. – 322p.
11 IEC 60183:2015. Guidance for the selection of high-voltage A.C. cable systems.
12 IEC 60502-2:2014. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (Um = 1,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV).

Bibliography (transliterated)

1 EURELECTRIC. Electricity for Europe. – Access mode: http://www.eurelectric.org/powerdistributionineurope/
2 **Anjan, K. D.** Powerline Ampacity System: Theory, Modeling and Applications, CRC Press, 2000, 258p.
3 **Turan, G.** Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design. 2nd Edition, CRC Press, 2009, 728p.
4 **Zorin, V. V., Buynyi, R. A., Perepechenyi, V. A.** Modeli i metodyi rascheta i otsenki poter moschnosti i elektricheskoy energii v raspredelitelnyih setyah 0,38kV [Models and methods for calculating and estimating power losses and electrical energy in distribution networks 0.38 kV]. *Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit [Energy saving. Power engineering. Energy audit]*, 2015, **№5(136)**, 19-27.
5 **Homelskyi, D. K., Buynyi, R. O., Kvytsynskyi, A. O.** Klasteryzatsiya struktur rozpodil'nykh elektrychnykh merezh napruhoyu 10 kV [Clustering structures distributive networks with voltage 10 kV]. *Enerhetyka ta elektryfikatsiya [Energy and Electrification]*, 2014, **№4**, 34-37.
6 SOU-N MEV 45.2-37471933-44. Ukrupneni pokaznyky vartosti budivnytstva pidstantsiy napruhoyu vid 6 kV do 150 kV ta liniy elektroperedavannya napruhoyu vid 0,38 kV do 150 kV. Normy [Consolidated figures the cost of construction of substations 6 kV to 150 kV power transmission lines and voltage from 0.38 kV to 150 kV. Norms], Kyiv: Minenerhovuhillya Ukrayiny, 2015, 40p.
7 Sayt komisiyi «TOV «AES-8». – Access mode: http://atrans.in.ua/transformatoryi-tm-106-04-novyie/c1 - 07.10.2016.
8 Sayt PAT «Zavod «Yuzhkabel». – Access mode: http://www.yuzhcable.com.ua/. – 07.10.2016.
9 GKD 340.000.002. Vyznachennya ekonomichnoyi efektyvnosti kapital'nykh vkladen' v enerhetyku. Metodyka. Enerhosystemy i elektrychni merezhi [Determining the cost-effectiveness of investments in the energy sector. Method. Grid and electric networks], Kyiv: Minenerho Ukrayiny, 1997, 53p.
10 **Patrick, K. W., Sonja, S. T.** A Practical Introduction to Econometric Methods: Classical and Modern, Barbados: University of the West Indies Press, 2002, 322p.
11 IEC 60183:2015. Guidance for the selection of high-voltage A.C. cable systems.
12 IEC 60502-2:2014. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (Um = 1,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV).

Відомості про авторів (About authors)

Буйний Роман Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет, доцент кафедри електричних систем і мереж; м. Чернігів, Україна; e-mail: buinyiroman@gmail.com.

Roman Buinyi – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor, Department of Electrical Power Systems and Networks, Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine; e-mail: buinyiroman@gmail.com.

Перепечений Віталій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, доцент кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст; м. Харків, Україна; e-mail: jahoma@i.ua.

Vitaliy Perepechenyi – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor, Department Systems of Power Supply and Electro-consumption of Cities, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine; e-mail: jahoma@i.ua.

Зорін Владлен Володимирович – доктор технічних наук, професор, Інститут енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», професор кафедри електропостачання, м. Київ, Україна; e-mail: vladlenvlzorin@mail.ru.

Vladlen Zorin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of Electricity, Institute for Energy Saving and Energy Management NTUU «I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine; e-mail: vladlenvlzorin@mail.ru.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Буйний, Р. О. Регресійні залежності вартісних показників елементів електричних мереж напругою 10-35 кВ / **Р. О. Буйний, В. О. Перепечений, В. В. Зорін** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 18-23. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.03.

Please cite this article as:

Buinyi, R., Perepechenyi, V., Zorin, V. Regression relationships for costs of facilites in electrical power networks 10-35 kV. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 18–23, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.03.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Буйный, Р. А. Регрессионные зависимости стоимостных показателей элементов электрических сетей напряжением 10-35 кВ / **Р. А. Буйный, В. А. Перепеченый, В. В. Зорин** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 18-23. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.03.

АННОТАЦИЯ *Обоснование мероприятий по снижению технологического расхода электроэнергии требует достоверных стоимостных показателей. Авторы исследовали изменение стоимости кабельно-проводниковой продукции от ее сечения, а также стоимости трансформаторов от их номинальной мощности и получили соответствующие регрессионные зависимости для напряжений 10, 20 и 35кВ. Данные зависимости могут быть использованы для аналитического решения оптимизационных задач.*

Ключевые слова: *стоимостные показатели; трансформаторы; провода; кабели; регрессионные зависимости; коэффициент детерминации; среднеквадратичная погрешность*

Надійшла (received) 10.03.2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

УДК 697.9+004.94 doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.04

АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ СУДОВЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Д. И. ВАСИЛЕЦ, Н. А. КОЗЬМИНЫХ, О. А. ОНИЩЕНКО

Национальный университет "Одесская морская академия", Одесса, УКРАИНА
e-mail: vasylets@gsi-marine.com, trunonma@gmail.com, olegoni@mail.ru

АННОТАЦИЯ *Показано, что: а) системы кондиционирования воздуха (СКВ) помещений в судах различного типа функционируют в сложных эксплуатационных условиях; б) оптимизация энергопотребления, рационализация процессов управления, проектирования и эксплуатации судовых СКВ невозможны без решения задач моделирования отдельных ее элементов (калориферов, теплообменных аппаратов и других). Проведен анализ литературных источников, посвященных методам и принципам моделирования отдельных элементов и СКВ. Установлено, что наиболее эффективным методом имитационного моделирования СКВ является структурный метод в объектно-ориентированной среде, с использованием передаточных функций с сосредоточенными или распределенными параметрами, при необходимости - дробных степеней.*
Ключевые слова*: кондиционирование воздуха; имитационная модель; передаточная функция; структурная схема*

ANALYSIS METHODS OF AIR CONDITIONING SIMULATION OF SHIP PREMISES

D. VASYLETS, N. KOZMINYIH, O. ONISHCHENKO

National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, UKRAINE

ABSTRACT *Shown a) that rooms' air condition system (ACS) in different ship types function in hard service conditions such as substantial changes in ambient temperature, humidity, dustiness, pressure; b) that ships' ACS are various in technical realization such as comfortable and technical, centralized, self-contained, combined, one-, two- and duct-free ACS; c) that optimization of the energy consumption mode, rationalization of control process, automation, design and service ships' ACS impossible without decision specific tasks of modeling its separate components (calorifiers, heat-exchange apparatus, compressors, air ducts and others). The analysis of well known literature sources which dedicated methods and modeling principals of separate elements and ACS in common and modeling of ship's ACS and industrial cold-storage plants has done. It was determined that the most effective method of object-oriented modeling of ship rooms ACS is the structure method in object-orientated fields (Matlab, LabVIEW, VisSim and others), with use of the transfer-functions (TF) with focused or distributed parameters if necessary assisted by fractional degree TF inclusive of the transport delay, use of non-linear links and approximation spreadsheets.*
Keywords*: air condition; imitation model; transfer function; structure chart*

Введение

При эксплуатации морских и речных суден существенно изменяется температура воздуха в его помещениях. Также воздух насыщается различными парами, пылью, газами, влагой, изменяется и его давление. Поэтому, для обеспечения комфортных условий жизнедеятельности экипажа и пассажиров, в служебных и жилых помещениях суден стабилизируют качественный состав и характеристики воздуха. Подачу свежего и удаление из помещений загрязненного воздуха на судах осуществляют системы приточной, приточно-вытяжной и естественной вентиляции. Но температуру и влажность воздуха на судах наилучшим образом стабилизируют различные системы кондиционирования, зачастую совместно с работой систем вентиляции. Такие системы достаточно разнообразны и сложны.

Судовые системы кондиционирования воздуха (СКВ) [1,2] подразделяют на комфортные и технические, в зависимости от способов обработки воздуха - на централизованные, автономные и комбинированные, а организуют СКВ как одно-, двух- и бесканальные. Комфортные системы кондиционирования стабилизируют на заданном уровне параметры воздуха в каютах и общественных помещениях судна. Технические системы кондиционирования стабилизируют параметры воздуха в грузовых отсеках и служебных помещениях. Границами комфортных зон в помещениях судна является воздух с относительной влажностью $\varphi \in (40...60)\,\%$ при температуре $t \in (19...23)\,°C$ для зимних, и 23...27 °С – для летних условий плавания.

Централизованные СКВ обрабатывают воздух в главной климатической установке. Из этой установки воздух распределяется с помощью вентиляторов в различные помещения. Автономные СКВ обрабатывают воздух непосредственно в кондиционируемом помещении, а комбинированные системы предварительно обрабатывают воздух в главной климатической установке с окончательной доводкой в дополнительных воздухораспределителях.

В одноканальных судовых СКВ воздух полностью подготавливается и поступает по каналу в кондиционируемое помещение. В двухканальных СКВ холодный и горячий воздух перемещают по двум

© Д. И. ВАСИЛЕЦ, Н. А. КОЗЬМИНЫХ, О. А. ОНИЩЕНКО, 2017

раздельным воздуховодам, но перед подачей в помещения его смешивают. В помещениях с автономными кондиционерами применяют бесканальные СКВ.

Техническая реализация судовых СКВ зачастую непроста [1,2], часто оригинальна из-за разнообразия типов и целевого назначения суден и требует решения задач рационального выбора элементов и структуры СКВ, оптимизации режимов работы, автоматизации процессов управления, диагностики и других. Понятно, что столь сложные и многообразные задачи крайне тяжело, а зачастую и невозможно, решить без предварительного математического моделирования, позволяющего отобрать наилучшие технические решения. Именно поэтому решение задач моделирования процессов в судовых СКВ и ее отдельных элементах не теряют актуальности и в настоящее время.

Цель работы

Целью статьи является выявление рациональных направлений, средств и сред исследований динамических режимов в судовых кондиционируемых помещениях на основе таких методов математического моделирования, которые позволяют минимизировать энергетические, технико-эксплуатационные, информационные ресурсы при технической реализации и эксплуатации судовых СКВ.

Объектом исследования в данной статье являются процессы кондиционирования воздуха в судовых помещениях, а *предметом*–анализ известных методов и принципов математического моделирования судовых систем кондиционирования воздуха.

Обзор литературных источников, анализ известных решений, изложение основного материала

В настоящее время существует довольно много, хорошо апробированных и научно-обоснованных, работ и исследований процессов, посвященных проходящим в судовых СКВ, в кондиционируемых помещениях, в обслуживающих холодильных установках процессам. Известные математические модели [3,4] СКВ чаще всего описываются и представляются математическими моделями взаимосвязанных статических и динамических блоков, содержащих, в свою очередь модели (субблоки) отдельных элементов системы. В свою очередь, такие математические модели многие из исследователей представляют в виде структурных схем с соответствующими передаточными функциями (ПФ) различного вида [5-7].

Практически все математические модели (ММ) статических режимов СКВ часто представляются элементами с сосредоточенными параметрами – коэффициентами (линейными и нелинейными), алгебраическими функциями, аппроксимирующими таблицами, различными аналитическими выражениями. Такие элементы можно разделить на ММ, предназначенные для расчета процессов в системе кондиционирования и на модели энергопотребления. Модели энергопотребления служат для оценки энергетических затрат (расходов) в каком-либо режиме работы СКВ и подразделяются по форме представления затрат: *а*) энтальпийные модели и *б*) эксергетические модели. Если использовать объектно-ориентированные среды программирования (например, *Matlab, LabVIEW*) то, для верифицированной ММ можно существенно облегчить расчеты энергопотребления в любых режимах работы СКВ – применять, так называемые, *в*) структурные имитационные модели.

Часто модели динамики отдельных элементов СКВ рассматривают ПФ с сосредоточенными параметрами. Известные модели элементов СКВ, описываемые ПФ распределенными параметрами, или описываемые ПФ с дробными степенями, часто сводят к моделям на основе ПФ с сосредоточенными параметрами. Это вполне допустимо при качественной оценке процессов кондиционирования или при высокой сложности ММ - для применения в целях управления, решении задач автоматизации, при больших затратах расчетных ресурсов и во многих иных случаях.

Элементы СКВ в статических режимах (помещения, воздуховоды, смесительные воздушные и водяные клапаны, теплообменные аппараты) обычно представляются алгебраическими уравнениями теплового и материального балансов. Множество подобных решений представлено, например, в ставших уже классическими, работах Попырина Л. С., Банхиди Л., Константинова Л. И., Мельниченко Л. Г., Рымкевича А. А., Халамейзера М. Б., Соколова Е.Я., Бродянского В. М., Сотникова А.Г. и многих других известных ученых.

В ряде работ Халамейзера М. Б., калориферы СКВ описываются несколькими математическими зависимостями, причем для узкого диапазона изменения входных параметров объекта – поскольку диапазон температур подогрева кондиционируемого воздуха относительно невысок. Расширение диапазона расчетных "вход-выход" параметров достигается коррекцией коэффициентов теплопередачи, обеспечивающей погрешность расчетов до 5-8 %.

Математические модели камер орошения СКВ часто получают на основе примеров и результатов исследований, приведенных в работах Степанова А. В., Долгозвяга В. А., Креслинь А. Я., Фалб П., Арбиб М. и других. Такие универсальные модели камер орошения позволяют с точностью до 10 %, в широком диапазоне статических нагрузок, рассчитывать выходные характеристики и основные параметры.

Различные модели энергопотребления СКВ описаны в трудах Рымкевича А. А, Креслинь А. Я.,

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Халамейзера М. Б. и других. Эти модели СКВ используют уравнения границ различных зон на *i-d* диаграмме влажного воздуха. Каждой зоне соответствует особый режим обработки воздуха и свои особые уравнения для определения расходов холода, тепла, воды, воздуха, различных коэффициентов перерасхода при различных тепловлажностных нагрузках в помещении. В названных работах рассмотрены различные режимы работы СКВ, когда потребляется: *а*) только тепло или только холод, *б*) тепло и холод, *в*) когда используется для обработки воздуха нулевой расход тепла и холода. Особенность приведенных энтальпийных математических моделей - оценка режима работы СКВ по соотношениям на *i-d* диаграмме влажного воздуха тепловых и влаговыделений в кондиционируемом помещении, температуре и влагосодержаннии наружного и внутреннего воздуха. На *i-d* диаграмме влажного воздуха, используемой в таких моделях, сложно разграничить отдельные зоны, что приводит к субъективным оценкам, часто неоднозначным результатам моделирования, требует выделения большого количества (иногда – до 35) различных расчетных зон.

Следует подчеркнуть, что ММ динамики отдельных элементов СКВ в настоящее время исследованы достаточно глубоко и представлены [6-8] в трудах Orosa J. A., Novak P. R., Mendes N., Щелкунова С. А., Константинова Л. И., Мельниченко Л. Г. и ряде других работ авторитетных ученых. Исследователи часто приводят достаточно "надежные" уравнения эксергии для калориферов, камер орошения, приводят различного вида эксергетические модели СКВ. Такие модели, в целом, позволяют оценить эффективность процессов теплообмена, но, например, не учитывают эксергию уходящего теплоносителя, определяющую заметную часть конечных энергетических затрат. Обычно эксергетическая модель камер орошения [6-8] не содержит членов уравнений, учитывающих различные тепловые режимы работы холодильной установки, что приводит к неправильной оценке конечных энергетических затрат на обработку воздуха. При построении уравнений отдельных элементов СКВ, а также и ММ всей СКВ, эксергию воды и воздуха определяют используя сложные интегро-дифференциальные уравнения, применяя таблицы и номограммы (Бэр Г. П., Вукалович М. П. и других). Модели воздуховодов, учитывающие теплообмен с окружающей средой, приведены в трудах Хейфеца Д. И., Успенской Л. Б., Клячко Л. С., Мац Я. М. и других исследователей. Представленные ими математические модели имеют распределенные параметры и часто сводятся к моделям с сосредоточенными параметрами, что позволяет их описывать уравнением вида:

$$y(T_1 \cdot p + 1) = k \cdot x(T_2 \cdot p + 1), \qquad (1)$$

где y и x, координаты, соответственно, выхода и входа рассматриваемого элемента СКВ; T_1 и T_2 – постоянные времени; k – статический коэффициент передачи; p – оператор дифференцирования ($d_{\square}/d\tau$).

В ряде работ отмечается распределенность параметров кондиционируемого помещения. Координаты реперной точки помещения можно определять по методике Беспалова И. Н., где показано, что параметры сосредоточенной ММ кондиционируемого помещения зависят от расстояния между выбранной точкой измерения и приточным воздуховодом. Именно этот факт резко усложняет выбор реперной точки, но позволяет применять для моделирования кондиционируемого помещения уравнения с сосредоточенными параметрами, например, вида апериодического звена первого порядка:

$$y(T_1 \cdot p + 1) = k \cdot x. \qquad (2)$$

При достаточно небольших расстояниях между выбранной точкой измерения и приточным воздуховодом, которое имеет место в СКВ судовых помещений, влияние воздуховода существенно и приводит к необходимости применения модели звена "приточный воздуховод – помещение", описываемого уравнением (1), более точно отражающим динамику процесса.

Динамика калориферов СКВ с достаточной точностью описывается уравнением (2). Но так как калориферы являются элементом воздуховода, то это приводит к необходимости описания ряда каналов калорифера уравнением (1). Камеры орошения и различные теплообменные аппараты исследованы в работах Четверухина Б. М., Чумака И. Г., Ларьяновского С. Ю., Давыдова Р. Н., Коханского А. И., Притулы В. В., Мазура В. В., Живицы В. И. и других ученых. С достаточной для качественного анализа точностью, динамику калориферов также можно описать уравнением (1). Однако особенностью указанного представления является то, что оно при реальной работе камер не учитывает зависимость изменения постоянной времени T_1 от текущих параметров процесса тепломассообмена: при адиабатном процессе значение T_1 возрастает, а при политропном T_1 изменяется пропорционально изменениям T_2. Используя, например, средства *Simulink*/*Matlab*, несложно реализовать ПФ с "управляемыми" постоянными времени.

В известных ММ динамики элементов СКВ транспортным запаздыванием обычно пренебрегают из-за его малости, по сравнению с постоянными времени элементов всей системы. Однако, при надобности, транспортное запаздывание рекомендуется представлять разложением в ряд Паде, например, следующими приближениями.

Первого порядка:

$$exp(-p\tau) = (1 - p\tau/2)/(1 + p\tau/2).$$

Второго порядка:

$$exp(-p\tau) = (1 - p\tau/2 + p^2\tau^2/12)/(1 + p\tau/2 + p^2\tau^2/12).$$

Третьего порядка:

$$exp(-p\tau) = (1 - p\tau/2 + p^2\tau^2/10 + p^3\tau^3/120)/(1 + p\tau/2 + p^2\tau^2/10 + p^3\tau^3/120).$$

Математические модели элементов обеспечивающих холодильных установок для статических режимов, описаны и обобщены в работах Вейнберга Б. С., Участкина П. В., Четверухина Б. М., Щелкунова С. А., Константинова Л. И., Мельниченко Л. Г. и других.

Здесь авторы рекомендуют для качественных расчетов представлять математические модели всех элементов холодильной установки алгебраическими уравнениями с нелинейными коэффициентами.

На основе эксергетического подхода модели энергопотребления холодильных установок для статических режимов их работы описаны в работах Сотникова А.Г., Пугачева Ю.Г., Пеклова А.А. и др. Технико-экономические показатели различных типов холодильник установок обобщены в работах по моделированию [6] Оносовским В.В. Им предложены модели с нелинейными алгебраическими уравнениями, позволяющими оптимизацию конструктивных параметров и технико-экономических показателей различных типов холодильных установок и СКВ.

Модели динамики основных элементов холодильник установок представлены достаточно полно в трудах Гримитлина М. И., Давыдова Р. Н., Чумака И. Г., Коханского А. И. [5] и других [9-11]. Но описание элементов и процессов дифференциальными уравнениями высокого порядка с трансцендентными членами серьезно затрудняет их практическое применение.

В книге 2016 года авторов *Ye Yao* и *Yuebin Yu* "*Modeling and Control in Air-conditioning Systems*" приведены самые современные методы моделирования различных СКВ. Авторы активно применяют метод пространства состояний при описании и разработке динамических моделей всех компонентов центральной системы кондиционирования воздуха. Математические модели, в основном нелинейные, основаны на фундаментальных принципах сохранения энергии и массы и используют классические методы исследования, разработанные и апробированные теорией автоматического управления. Переход к пространству состояний проводится в форме линеаризации, используя приемы теории графов и структурно-матричного анализа. Авторы представляют различные стратегии управления, основанные на созданных моделях СКВ, приводят практические примеры с использованием управляющих микро-ЭВМ и микроконтроллеров.

Одними из наиболее сложных узлов модели судовой СКВ, независимо от конструктивного исполнения СКВ, являются модели судовых помещений, позволяющие проводить оптимизационные исследования различного характера, оценивать энергопотребление в различных эксплуатационных условиях.

Такие помещения обладают тепловой инерцией, однако, несмотря на то, что в работах Участкина П. В., Цветкова Ю. Н. помещения рассматриваются как объекты с сосредоточенными параметрами, влияние теплоаккумулирующих способностей стен, ограждений, оборудования обычно не учитывается. Именно поэтому моделирование помещения с помощью одного-двух апериодических звеньев не может считаться достоверным. В работах Лысева В. И. учитываются динамика изменения температуры в помещении с учетом решения уравнений теплопроводности, однако техническая реализация результатов затруднена из-за громоздкости аналитических выражений и их неоднозначности. В работах Щелкунова С. А. использована теория тепловой устойчивости для построения модели помещений, но только для некоторых частных случаев.

Обсуждение результатов

На основе анализа известных источников, посвященных решению задач моделирования СКВ и различного вида элементов холодильных установок, можно выделить существенные преимущества программной реализации в объектно-ориентированных средах имитационного моделирования судовых кондиционируемых помещений. Также следует считать, что разработанная структурная схема элемента СКВ или системы кондиционирования может быль с легкостью встроена, например, в имитационную модель всей судовой системы охлаждения и кондиционирования. Такая интеграция позволит несложными методами учесть различные возмущения, нелинейности, осуществлять мониторинг и диагностику [12], вводить любые алгоритмы управления, позволит модернизировать существующую или спроектировать новую систему автоматизированного управления [13], осуществлять многовариантные оптимизационные расчеты, оценить уровни энергопотребления [14].

Выводы

В настоящее время практически отсутствуют математические модели судовых СКВ и судовых кондиционируемых помещений, пригодные для качественной оценки процессов кондиционирования воздуха, в том числе оценки процессов энергопотребления, относительно простыми средствами.

Анализ известных исследований и решений показывает, что наиболее перспективное и удобное представление математических моделей судовых СКВ и судовых кондиционируемых помещений осуществляется с помощью структурных схем содержащих передаточные функции с сосредоточенными и/или распределенными параметрами, причем часть передаточных функций может содержать дробные степени.

Программная реализация структурных схем, например, судовых кондиционируемых помещений, может осуществляться в таких известных системах моделирования, как *Matlab, VisSim, LabVIEW* и им подобных объектно-ориентированных средах.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Список литературы

1 **Загоруйко, В. А.** Судовая холодильная техника / **В. А. Загоруйко, А. А. Голиков**. – Київ: Наукова думка, 2000. – 608 с.
2. **Лалаев, Г. Г.** Судовые холодильные установки и системы кондиционирования / **Г. Г. Лалаев**. – М.: Транспорт, 1981. – 248 с.
3. **Homod, R. Z.** Review on the HVAC system modeling types and the shortcomings of their application / **R. Z. Homod** // *Journal of Energy*. – 2013. – Vol. 2013. – 10. doi:10.1155/2013/768632.
4. **Novak, P. R.** Simulation and analysis of a secondary HVAC system using MATLAB/SIMULINK platform / **P. R. Novak, N. Mendes, G. H. C. Oliveira** // *In Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. – 2004. – P. 387-392. doi: 10.1115/IMECE2004-59570.
5. **Чумак, И. Г.** Динамические режимы работы холодильных установок и аппаратов / **И. Г. Чумак**, **А. И. Коханский**. – М. : Машиностроение, 1978. – 191 с.
6. **Оносовский, В. В.** Моделирование и оптимизация холодильных установок: учеб. пособ / **В. В. Оносовский.** – Л.: Изд. Ленингр. Унив-та, 1990, 208 с.
7. **Wang, X**. Modelling and experiment analysis of variable refrigerant flow air-conditioning systems / **X. Wang, J. Xia, X. Zhang, S. Shiochi, C. Peng, Y. Jiang** // *In Proceedings of the IBPSA Conference on Building Simulation*. – 2009. – P. 361-368. http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2009/bs09_0361_368.pdf.
8. **Orosa, J. A.** A new modelling methodology to control HVAC systems / **J. A. Orosa** // *Expert Systems with Applications*. – 2011. – Vol. 38, № 4. – P. 4505-4513. doi:10.1016/j.eswa.2010.09.124
9. **Ghiaus, C**. Calculation of optimal thermal load of intermittently heated buildings / **C. Ghiaus, I. Hazyuk**. // *Energy and Buildings*. – 2010. – Vol. 42, № 8. – P. 1248-1258. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.02.017.
10. **Wang, J.** Analytical design of decoupling control for variable-air-volume air-conditioning system / **J. Wang**, **C. Zhang, Y. Jing** // *In Proceedings of the IEEE Conference on Digital Object Identifier*. – 2008. – P. 630-635. doi: 10.1109/ICCIS.2008.4670836.
11. **Mendes, N**. A new mathematical method to solve highly coupled equations of heat and mass transfer in porous media / **N. Mendes, P. C. Philippi, R. Lamberts** // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2001. – Vol. 45, № 3. – P. 509-518. doi:10.1016/S0017-9310(01)00172-7.
12. **Очеретяный, Ю. А.** Концепция системы компьютерного мониторинга и технической диагностики рефрижераторной холодильной установки судна / **Ю. А. Очеретяный, В. И. Живица, В. Н. Белый** и др. // *Судовые энергетические установки*. – 2011. – № 28. – С. 5-11. http://www.nbuv.gov.ua/old_jrn/natural/seu/2011_28/28_04.pdf.
13. **Онищенко, О. А.** Двуканальная система управления малыми холодильными установками / **О. А. Онищенко** // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2012. – № 5. – С. 37-42. http://etks.opu.ua/?fetch=articles&with=info&id=21814.
14. **Онищенко, О. А.** Оценка энергетических затрат на выработку холода бытовым холодильным прибором / **О. А. Онищенко** // *Вісник КДПУ ім. Міхайла Остроградського*. – 2007. – №3. – С. 44-48. http://www.kdu.edu.ua/statti/2007-3(44)/106.pdf.

Bibliography (transliterated)

1 **Zagoruyko, V. A., Golikov, A. A.** Sudovaya holodilnaya tehnika. – Kiyiv: Naukova dumka, 2000. – 608 s.
2 **Lalaev, G. G.** Sudovyie holodilnyie ustanovki i sistemyi konditsionirovaniya. – M.: Transport, 1981. – 248 s.
3 **Homod, R. Z**. Review on the HVAC system modeling types and the shortcomings of their application. *Journal of Energy*, 2013, vol. **2013**, 10. doi:10.1155/2013/768632.
4 **Novak, P. R**., **Mendes, N., Oliveira, G. H. C.** Simulation and analysis of a secondary HVAC system using MATLAB/SIMULINK platform. *In Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2004, 387-392. doi: 10.1115/IMECE2004-59570.
5 **Chumak, I. G**., **Kohanskiy, A. I.** Dinamicheskie rezhimyi rabotyi holodilnyih ustanovok i apparatov. M. : Mashinostroenie, 1978. – 191 s.
6 **Onosovskiy, V. V**. Modelirovanie i optimizatsiya holodilnyih ustanovok: ucheb. posob. – L.: Izd. Leningr. universiteta, 1990, 208 s.
7 **Wang, X**., **Xia, J., Zhang, X., Shiochi, S., Peng, C., Jiang, Y.** Modelling and experiment analysis of variable refrigerant flow air-conditioning systems. *In Proceedings of the IBPSA Conference on Building Simulation*, 2009, 361-368, http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2009/bs09_0361_368.pdf.
8 **Orosa, J. A**. A new modelling methodology to control HVAC systems. *Expert Systems with Applications*, 2011, vol. **38**, № 4, 4505-4513. doi:10.1016/j.eswa.2010.09.124
9 **Ghiaus, C**., **Hazyuk, I.** Calculation of optimal thermal load of intermittently heated buildings. *Energy and Buildings*, 2010, vol. **42**, № 8, 1248-1258, doi:10.1016/j.enbuild.2010.02.017.
10 **Wang, J., Zhang, C., Jing, Y.** Analytical design of decoupling control for variable-air-volume air-conditioning system. *In Proceedings of the IEEE Conference on Digital Object Identifier*, 2008, 630-635. doi: 10.1109/ICCIS.2008.4670836.
11 **Mendes, N., Philippi, P. C., Lamberts, R.** A new mathematical method to solve highly coupled equations of heat and mass transfer in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, vol. **45**, № 3, 509-518. doi:10.1016/S0017-9310(01)00172-7.
12 **Ocheretyanyiy, Yu. A., Zhivitsa, V. I., Belyiy, V. N.** i dr. Kontseptsiya sistemyi kompyuternogo monitoringa i tehnicheskoy diagnostiki refrizheratornoy holodilnoy ustanovki sudna. *Sudovyie energeticheskie ustanovki*, 2011. № **28,** S. 5-11. http://www.nbuv.gov.ua/old_jrn/natural/seu/2011_28/28_04.pdf.
13 **Onischenko, O.A.** Dvukanalnaya sistema upravlen iya malyimi holodilnyimi ustanovkami. *Elektrotehnicheskie i kompyuternyie sistemyi*, 2012, №**5**, 37-42. http://etks.opu.ua/?fetch=articles&with=info&id=21814.
14 **Onischenko, O. A.** Otsenka energeticheskih zatrat na vyirabotku holoda byitovyim holodilnyim priborom. *VIsnik KDPU im. Mikhayla Ostrogradskogo*, 2007, №**3**, S. 44-48. http://www.kdu.edu.ua/statti/2007-3(44)/106.pdf.

Сведения об авторах (About authors)

Василец Дмитрий Иванович – аспирант, Национальный университет "Одесская морская академия"; кафедра холодильных установок; Одесса, Украина; e-mail: vasylets@gsi-marine.com.

Dmytro Vasylets – graduate student, National University "Odessa Maritime Academy"; Refrigeration units department; Odessa, Ukraine; e-mail: vasylets@gsi-marine.com.

Козьминых Николай Анатольевич – к.т.н, доцент, Национальный университет "Одесская морская академия"; кафедра холодильных установок; Одесса, Украина; e-mail: trunonma@gmail.com.

Nicholas Kozminyih – PhD, assistant professor, National University "Odessa Maritime Academy"; Refrigeration units department; Odessa, Ukraine; e-mail: trunonma@gmail.com.

Онищенко Олег Анатольевич – д.т.н., профессор кафедры технической эксплуатации флота, Национальный Университет "Одесская морская академия"; Одесса, Украина; e-mail: olegoni@mail.ru.

Oleg Onishchenko – Doctor of Technical Science, Professor, Technical fleet operation department National University "Odessa Maritime Academy"; Odessa, Ukraine; e-mail: olegoni@mail.ru.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Василец, Д. И. Анализ методов моделирования систем кондиционирования судовых помещений / **Д. И. Василец, Н. А. Козьминых, О. А. Онищенко** // *Вестник НТУ "ХПИ", Серия : Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ "ХПИ".* – 2017. – № 7 (1229). – С. 24-29. – doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.04.

Please cite this article as:

Vasylets, D., Kozminyih, N., Onishchenko, O. Analysis methods of air conditioning simulation of ship premises. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 24-29, doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.04.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Василець, Д. І. Аналіз методів моделювання систем кондиціонування суднових приміщень / **Д. І. Василець, М. А. Козьміних, О. А. Онищенко** // *Вісник НТУ "ХПІ", Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 7 (1229). – С. 24-29. – doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.04.

АНОТАЦІЯ *Показано, що: а) системи кондиціонування повітря (СКВ) приміщень суден різного типу функціонують в складних експлуатаційних умовах; б) оптимізація енергоспоживання, раціоналізація процесів управління, проектування і експлуатації суднових СКВ неможливі без вирішення завдань моделювання окремих її елементів (калориферів, теплообмінних апаратів і інших). Проведено аналіз літературних джерел, присвячених методам і принципам моделювання окремих елементів і СКВ. Встановлено, що найбільш ефективним методом імітаційного моделювання СКВ є структурний метод в об'єктно-орієнтованому середовищі, з використанням передаточних функцій з зосередженими або розподіленими параметрами, при необхідності - дрібних ступенів.*

Ключові слова*: кондиціонування повітря; імітаційна модель; передавальна функція; структурна схема*

Надійшла (received) 29.01.2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

УДК 620.191.33:622.240.53 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.05

ЕКСПРЕС-ОЦІНЮВАННЯ УМОВ РУЙНУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕКСПЛУАТОВАНИХ ТРУБ БУРИЛЬНИХ КОЛОН ПІД ЧАС СПУСКО-ПІДІЙМАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ

О. Ю. ВИТЯЗЬ [1], ***Р. С. ГРАБОВСЬКИЙ*** [2]

[1] *Інститут нафтогазової інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, УКРАЇНА*
[2] *кафедра будівельної механіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, УКРАЇНА*
[*]*email: hrabovskyy.r@gmail.com*

АНОТАЦІЯ *Тривалість спуско-підіймальних операцій у процесі буріння глибоких свердловин складає до 60 % від загального виробничого часу. Експериментально оцінено силовий критерій руйнування металу бурильних труб і замків (K_{Jc}) та визначено умови, за яких під час спуско-підіймальних операцій можливе руйнування елементів експлуатованих бурильних труб, що містить зовнішню або внутрішню поперечну кільцеву тріщину. Крім того, визначено додаткову умову руйнування елементів експлуатованих бурильних труб за менших від критичного коефіцієнта інтенсивності напружень значень – характеристичну глибину зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини, оскільки із незначним збільшенням глибини цієї тріщини коефіцієнт інтенсивності напружень у її вершині швидко зростає до критичних значень K_{Jc} металу труб бурильної колони. Встановлено взаємозв'язок критичних і характеристичних глибин зовнішньої або внутрішньої поперечних кільцевих тріщин у бурильних трубах та замках із вагою бурильної колони. Показано, що внутрішні поперечні кільцеві тріщини під час спуско-підіймальних операцій бурильних колон на глибинах понад 2 км є більш небезпечними, ніж зовнішні, тоді як в інтервалі глибин від 1 км до 2 км більш небезпечними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини. Запропоновано експрес-оцінювання умов руйнування елементів експлуатованих бурильних труб, яка дає можливість інтерпретувати результати їх технічного діагностування.*
Ключові слова: *умови руйнування бурильних труб; критичний коефіцієнт інтенсивності напружень; критичний розмір зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини; характеристична глибина зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини*

EXPRESS-EVALUATION OF CONDITIONS OF OPERATED DRILL PIPE ELEMENTS FAILURE DURING TRIPS

O. YU. VYTYAZ [1], ***R. S. HRABOVSKYI*** [2]

[1] *Institute of Petroleum Engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, UKRAINE*
[2] *Department of construction mechanics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, UKRAINE*

ABSTRACT *Duration of trips in the process of deep holes drilling accounts for up to 60% of the total production time. Experimentally evaluated is the power criterion of drill pipes and tool K_{Jc} joints metal destruction and defined were conditions under which during trips possible is the failure of operated drill pipe elements containing external or internal circumferential transverse crack. Also, it was determined an additional condition of operated drill pipes elements failure for less than the critical stress intensity factor values - the characteristic depth of external or internal transverse annular crack because with a slight increase in depth of the crack the stress intensity factor at its top quickly rises to critical values K_{Jc} of the drill pipe metal. The interrelation of critical and characteristic depths of external or internal circumferential transverse cracks in drill pipes and tool joints with the drill string weight was determined. It is shown that the internal circumferential transverse cracks during drilling string trips are more dangerous at depths exceeding 2 km than external ones whereas in the depth interval from 1 km to 2 km the external transverse annular cracks are more dangerous. The express-evaluation of conditions of operated drill pipe elements failure is suggested which enables interpreting the results of their technical diagnostics.*
Keywords: *conditions of drill pipes failure;critical coefficient of stress intensity; critical size of external or internal circumferential transverse crack; characteristic depth of external or internal circumferential transverse crack*

Вступ

Загальнодержавні потреби України значно перевищують видобування вуглеводневих енергоносіїв, оскільки на даний час видобуток нафти становить 10-12%, а природного газу – 46-48%. Однак на великій глибині – орієнтовно 6,5-7 тисяч метрів – на території Дніпрово-Донецької западини і Карпатської нафтогазової провінції є величезні запаси нафти і газу. У зв'язку з цим виникає потреба в

© О. Ю. ВИТЯЗЬ, Р. С. ГРАБОВСЬКИЙ, 2017

бурінні глибоких та надглибоких свердловин. Проте, як свідчить практика [1], буріння на таких глибинах призводить до суттєвого збільшення кількості аварій елементів бурових колон. Так, в інтервалі буріння 2500-4500 *м* кількість відмов зростає у 4,8-5 разів, а в інтервалі 4500-5000 м – в 9,8 рази [1].

При роторному бурінні, внаслідок зародження біля концентратора напружень (впадина першого витка як зовнішньої, так і внутрішньої різьби, корозійна виразка, технологічна риска, дефекти зварного шва, тощо) та розвитку магістральної тріщини до критичних розмірів, спричинених дією втомних навантажень, які діють на бурильну трубу та впливом промивальної рідини [2-7] найбільш часто зустрічається поперечне руйнування тіла труби в з'єднанні по потовщеному кінці, що становить 60-70 % від загальної кількості аварій [1,3,8,9,11].

У переважній більшості випадків неконтрольоване поперечне руйнування тіла труби викликане дією значних статичних навантажень, високими робочими тисками та критичними розмірами поперечної замкнутої або півеліптичної тріщини, що зароджується та розвивається в місцях концентраторів напружень через пошкодження роторними клинами [1, 3] або наявності в металі труби неоднорідностей структури (неметалевих включень, раковин, заминання та волосин) [5], а також у разі порушення технології спуско-підіймальних операцій, наприклад, піднімання на одному стропі [1, 3]. Причиною поламу бурильних труб по тілу можуть бути й інші концентратори напружень, такі як корозійні виразки та мікротріщини на внутрішній або зовнішній поверхні, які також призводять до поширення (розвитку) тріщин [4, 11].

Таким чином, руйнування елементів бурових колон пов'язане зі специфікою буріння. Причому, на великих глибинах воно визначається домінуючим впливом відповідних силових факторів, тобто величиною, напрямом та характером експлуатаційних навантажень, що виникають в процесі буріння та спуско-підіймальних операцій, які зумовлюють розвиток у місцях пошкоджень тріщин в поперечному перерізі тіла труби [7] або бурового замка [4, 5].

Забезпечення надійної та безпечної експлуатації бурильних колон вимагає підвищеної уваги до оцінювання виявлених при технічному діагностуванні дефектів та аналізуванні експлуатаційних умов при прийнятті відповідного інженерного рішення.

Оскільки в процесі спуско-підіймальних операцій, спричинених впливом статичних навантажень (ваги колони), найбільш поширеним є руйнування бурильної колони в поперечному перерізі шляхом відриву, то важливим є визначення руйнівних умов.

У зв'язку з цим, розрахунково-експериментальне оцінювання умов, за яких потенційно можливе поперечне руйнування елементів бурильної колони є актуальною науково-технічною проблемою.

Мета роботи

Оцінювання умов руйнування тривало-експлуатованих бурових труб із наявними тріщинами під час спуско-підіймальних операцій, ґрунтуючись на підходах механіки руйнування.

Викладення основного матеріалу

Матеріалом дослідження є фрагмент бурильної труби ТБПВ з умовним діаметром 127 мм із привареним буровим замком З-155, яка 23 роки використовувалася для буріння свердловин нафтогазових родовищ Західної України. Хімічний склад досліджуваних сталей наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджуваних сталей бурильної труби (36Г2С) та замка (40ХН),мас.%

Сталь 36Г2С								
C	*Mn*	*Si*	*V*	*Cu*	*Al*	*Ni*	S_{max}	P_{max}
0,38	1,52	0,92	0,09	0,13	0,04	0,09	0,018	0,016
Сталь 40ХН								
C	*Cr*	*Ni*	*Si*	*V*	*Cu*	*Al*	S_{max}	P_{max}
0,41	1,12	0,97	0,19	0,13	0,04	0,09	0,017	0,014

Механічні характеристики тривало експлуатованих сталей бурильної труби та замка (табл. 2) визначались за стандартною процедурою [12] випробувань п'ятикратних циліндричних зразків на розтяг.

Таблиця 2 – Механічні характеристики сталей бурильної труби з привареним замком З-155

Сталь	Тривалість експлуатації, роки	σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %
36Г2С	23	790,0	605,0	12,5	27,0
40ХН	23	885,0	762,5	10,0	14,5

Оцінювання умов, за яких відбувається руйнування металу труб бурильної колони, здійснювали за методикою [13], експериментально визначаючи величину J_c. Для цього вирізали по п'ять зразків з фрагментів бурильної труби групи міцності "Л" розміром $200{,}0 \times 10{,}0 \times 8{,}0$ *мм* та бурильного замка З-155 розміром $200{,}0 \times 10{,}0 \times 10{,}0$ *мм*. При цьому оцінювали роботу *A* (площа під діаграмою деформування, рис. 2),

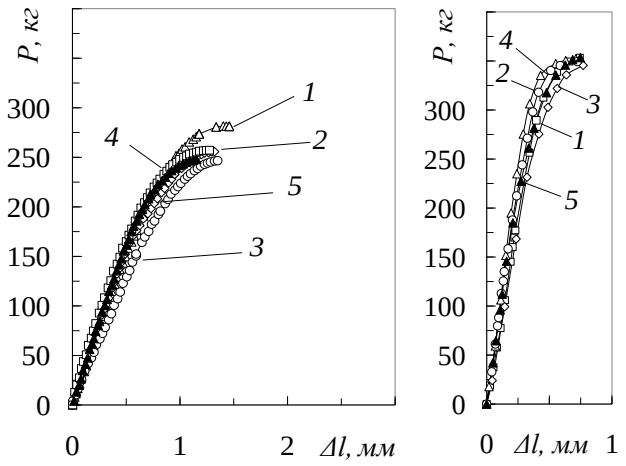
ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

витрачену на деформування зразка з попередньо зародженою тріщиною $l_{сер} = 0{,}45 \cdot h$ (рис. 1а) як елемента конструкції, при якій він має здатність втрачати свої несучі властивості, віднесену до нетто площі деформованої поверхні зразка S_f (рис. 1б).

$$J_c = \frac{A}{S_f}. \qquad (1)$$

а) *б)*

Рис. 1 – Загальний вигляд зразка (а) та площі деформованої поверхні зразка (б) після експерименту з дослідження умов спонтанного руйнування тривало експлуатованої бурильної труби



а) *б)*

Рис. 2 – Діаграма деформування $P - \Delta l$ зразків з фрагментів бурильної труби групи міцності "Л" (а) та бурильного замка З-155 (б)

Характеристики критичної тріщиностійкості (табл. 3) у роботі представлені критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень K_{JC}, який обчислювали за допомогою рівняння:

$$K_{Jc} = \sqrt{\frac{J_c \cdot E}{\left(1-\mu^2\right)}}, \qquad (2)$$

де J_c – критична тріщиностійкість; E – модуль Юнга ($E = 10^{11}$ *Па*); μ – коефіцієнт Пуассона (для низьколегованих сталей $\mu = 0{,}3$).

Умови, за яких відбувається руйнування елементів бурильної колони, оцінювали, враховуючи вагу бурової колони Q* та критичну глибину наявної в буровій трубі кільцевої тріщини a_c.

Таблиця 3 – Значення критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{Jc}

Зразок	Бурова труба, група міцності "Л"		Буровий замок З-155	
	K_{Jc}, $МПа\sqrt{м}$	$K_{Jc}^{сер}$ $МПа\sqrt{м}$	K_{Jc}, $МПа\sqrt{м}$	$K_{Jc}^{сер}$ $МПа\sqrt{м}$
1	105,78	99,0	85,30	84,5
2	98,80		83,56	
3	99,91		85,80	
4	96,89		83,64	
5	93,62		84,21	

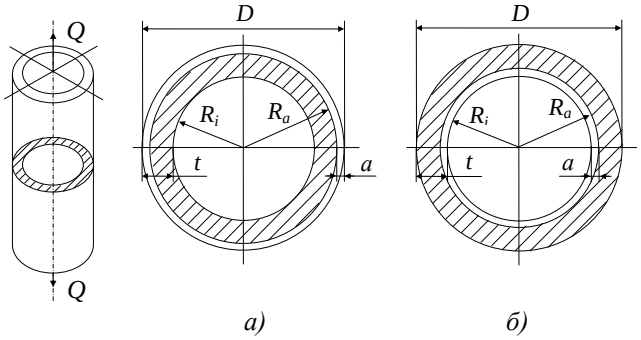
Розглядали випадки руйнування тривало експлуатованої бурової труби $D = 126$ *мм*, $t = 8{,}0$ *мм*, що містить зовнішню або внутрішню замкнену кільцеву тріщину та бурильного замка ЗУ-155 ($D = 155$ *мм*, $d = 95$ *мм*) із замковою різьбою З-133 у ймовірних місцях зародження та розвитку зовнішньої кільцевої замкнутої тріщини у ніпелі ($D_f^N = 124{,}6$ *мм*, $d = 95$ *мм*) та внутрішньої – у муфті ($D = 155$ *мм*, $d_f^M = 114{,}3$ *мм*). При цьому критичну глибину кільцевої корозійно-втомної тріщини a_c визначали за умови $K_I = K_{Jc}$ та враховуючи задану глибину свердловини, тобто вагу бурової колони (Q). Разом з тим, практичний інтерес становить визначення характеристичної глибини корозійно-втомної тріщини (a/t)*, при якій різко зростає швидкість зміни коефіцієнта інтенсивності напружень K_I [14], а отже, і ризик руйнування дефектної бурової труби у процесі спуско-підіймальних операцій.

Характеристична глибина тріщини (a/t)* визначається за методикою [14]. Поточні значення $dK_I/da = F(a/t)$ (рис. 4) підраховують з кроком $a/t = 0{,}01$ та визначають три точки (3), в околі яких виконувались умови:

$$\begin{aligned}
&\left(dK_I/da\right)_{i+1} - \left(dK_I/da\right)_i = 0{,}01 \rightarrow \left(a/t\right)_1 \rightarrow 1;\\
&\left(dK_I/da\right)_{i+1} - \left(dK_I/da\right)_i = 0{,}10 \rightarrow \left(a/t\right)_2 \rightarrow 2; \qquad (3)\\
&\left(dK_I/da\right)_{i+1} - \left(dK_I/da\right)_i = 1{,}00 \rightarrow \left(a/t\right)_3 \rightarrow 3.
\end{aligned}$$

За аргументами цих точок визначають координати точок L $\left(0{,}5\cdot\left[(a/t)_1+(a/t)_2\right],\ (dK/da)_L\right)$ та M $\left(0{,}5\cdot\left[(a/t)_2+(a/t)_3\right],\ (dK/da)_M\right)$. У визначених точках L і M (див. рис. 4) проводять дотичні. Аргументом точки перетину цих дотичних є значення глибини критичного дефекту $(a/t)^*$, при якому різко зростає швидкість зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I [14].

Умови, за яких можливе руйнування досліджуваних бурильної труби та елемента ніпельної частини різьбового з'єднання бурильної труби по першому з'єднаному витку, що містять зовнішню кільцеву корозійно-втомну тріщину (рис. 3*а*) глибиною a, визначали, використовуючи підходи механіки руйнування [14].



а) *б)*

Рис. 3 – Пустотілий циліндр із зовнішньою (а) та внутрішньою (б) поперечною кільцевою тріщиною під дією осьового навантаження

У вершині такої тріщини [14], величина коефіцієнта інтенсивності напружень K_I визначається залежністю

$$K_I=\sigma\sqrt{\pi a}\,\frac{F}{\sqrt{Y}} \qquad (4)$$

де $F=\dfrac{1-R_{ia}^2}{\left[1-\left(1-R_{ia}\right)\dfrac{a}{t}\right]^2-R_{ia}^2}$,

$$Y=0{,}8+\left(1-R_{ia}\right)\frac{a}{t}\,\frac{H}{\left[1-\left(1-R_{ia}\right)\dfrac{a}{t}\right]},\quad R_{ia}=\frac{R_i}{R_i+t},$$

$$H=4+1{,}08\,\frac{R_{ia}}{\left(1-R_{ia}\right)\left(1-\dfrac{a}{t}\right)}.$$

При цьому швидкість зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I рівна

$$\frac{dK}{da}=0{,}5\sigma\sqrt{\frac{\pi}{a}}\,\frac{F}{\sqrt{Y}}+\sigma\sqrt{\frac{\pi a}{Y}}\,\frac{dF}{da}-0{,}5\sigma\sqrt{\pi a}\,\frac{F}{Y^{1,5}}\,\frac{dY}{da} \qquad (5)$$

де $\dfrac{dF}{da}=\dfrac{2\left(R_{ia}-1\right)\left[\dfrac{a\left(R_{ia}-1\right)}{t}+1\right]\left(R_{ia}^2-1\right)}{t\left\{\left[1-\left(1-R_{ia}\right)\dfrac{a}{t}\right]^2-R_{ia}^2\right\}}$,

$$\frac{dH}{da}=1{,}08\,\frac{R_{ia}}{t\left(1-R_{ia}\right)\left(1-\dfrac{a}{t}\right)^2},$$

$$\frac{dY}{da}=\frac{\left(1-R_{ia}\right)}{t\left[1-\left(1-R_{ia}\right)\dfrac{a}{t}\right]}\left\{H+a\,\frac{dH}{da}+\frac{Ha\left(1-R_{ia}\right)}{t\left[1-\left(1-R_{ia}\right)\dfrac{a}{t}\right]}\right\}.$$

Умови, за яких можливе руйнування бурильної труби та елемента муфтової частини різьбового з'єднання бурильної труби по першому з'єднаному витку ($D=155$ *мм*, $d_f^M=114{,}3$ *мм*), що містять внутрішню поперечну кільцеву тріщину (рис. 3*б*) глибиною $(a/t)^*$. У вершині такої тріщини [14] величина коефіцієнта інтенсивності напружень K_I визначається залежністю

$$K_I=\sigma\frac{F}{\sqrt{1-\dfrac{a}{t}}}\sqrt{\pi a}\,. \qquad (6)$$

При цьому швидкість зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I рівна

$$\frac{dK_{Ia}}{da}=\sigma\frac{dF}{da}\,\frac{\sqrt{\pi a}}{\sqrt{1-\dfrac{a}{t}}}+\frac{\sigma F}{2t}\,\frac{\sqrt{\pi a}}{\left(1-\dfrac{a}{t}\right)^{\frac{3}{2}}}+\frac{1}{2}\,\frac{\sigma F}{\sqrt{1-\dfrac{a}{t}}}\sqrt{\frac{\pi}{a}}\,, \qquad (7)$$

де функція F та швидкість її зміни dF/da визначаються функціональними рядами, які залежить від співвідношення R_i/R_a [14] ($R_a=R_i+a$).

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Результати оцінювання умов руйнування елементів експлуатованих труб бурильних колон під час спуско-підіймальних операцій

Для розглядуваних випадків побудуємо безрозмірну залежність (рис. 4) типу

$$\frac{\sqrt{t}}{\sigma}\frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right), \qquad (8)$$

де σ – прикладене зовнішнє навантаження, t – товщина елемента бурильної труби у місці руйнування та визначимо характеристичну глибину корозійно-втомної тріщини $(a/t)^*$.

У випадку виявленої у бурильній трубі або у ніпельній частині різьбового з'єднання З-133 зовнішньої поперечної кільцевої тріщини відносна характеристична глибина критичного дефекту практично збігається (рис. 4а – криві *1* та *2*) і становить $(a/t)^* = 0{,}535$. Характеристична глибина зовнішньої поперечної втомної тріщини для досліджуваної експлуатованої бурильної труби групи міцності "Л" рівна $a^* = 4{,}3\ мм$, а по першому з'єднаному витку для ніпельної частини різьбового з'єднання З-133 - рівна $a^* = 7{,}9\ мм$.

Для випадку виявленої у бурильній трубі або у муфтовій частині різьбового з'єднання З-133 (рис. 4б) внутрішньої поперечної кільцевої тріщини відносна характеристична глибина критичного дефекту становить $(a/t)_т^* = 0{,}705$ та $(a/t)_м^* = 0{,}695$ відповідно. Характеристична глибина внутрішньої поперечної втомної тріщини для досліджуваної експлуатованої бурильної труби групи міцності "Л" рівна $a^* = 5{,}6\ мм$, а по першому з'єднаному витку муфтової частини різьбового з'єднання З-133 – рівна $a^* = 14{,}4\ мм$.

Представлені графічно (рис. 5а) результати обчислень дають підстави зробити висновок, що для металу бурильної труби групи міцності "Л" під час спуско-підіймальних операцій на глибині від 2,9 км до 6 км ($0{,}79\ МН \le Q \le 1{,}6\ МН$) критичними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини в діапазоні $4{,}3\ мм \ge a_c \ge 2{,}8\ мм$ (рис. 5, ділянка *I*, крива 1, *AB*), тоді як на глибинах від 1 км до 2,9 км небезпечними є кільцеві втомні тріщини глибиною $a^* = 4{,}3\ мм$ (рис. 5, ділянка *II*, *BC*).

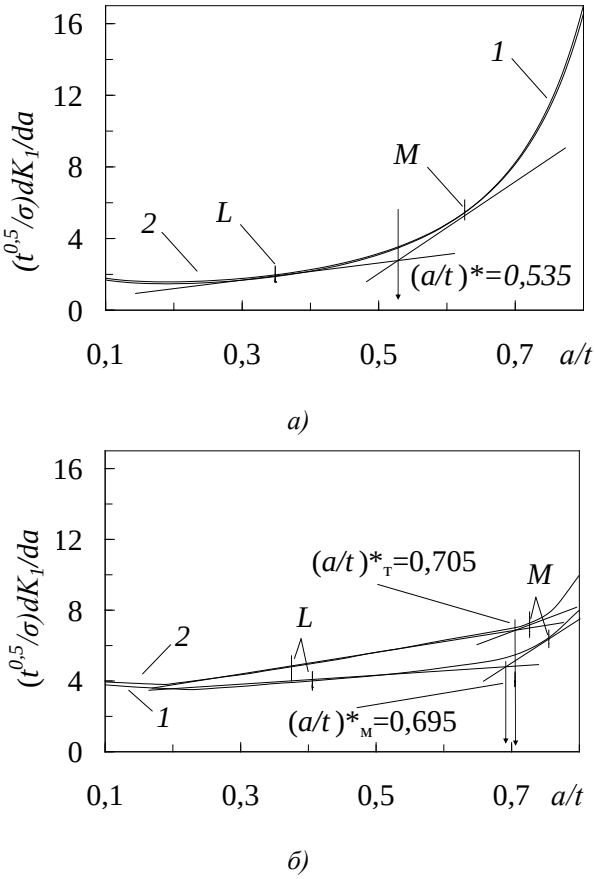
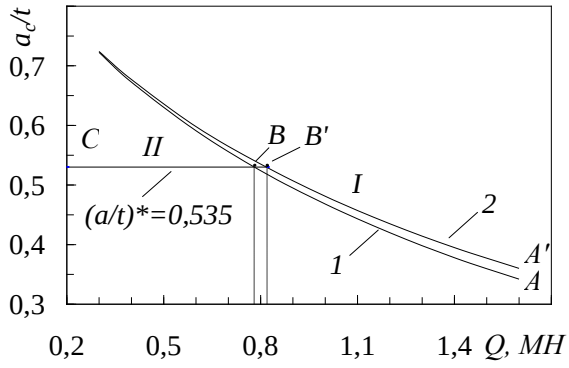


Рис. 4 – Залежність швидкості зміни коефіцієнта інтенсивності напружень K_I у пустотілому циліндрі із зовнішньою (а) та внутрішньою (б) поперечною кільцевою тріщиною під дією осьового навантаження

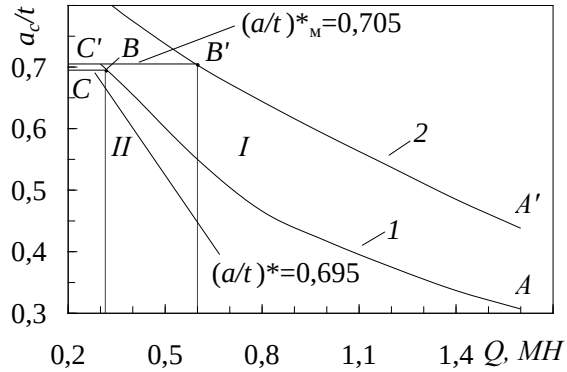
Для металу ніпельної частини різьбового з'єднання бурильного замка ЗУ-155 під час спуско-підіймальних операцій на глибині від 3 км до 6 км критичними є втомні кільцеві тріщини в діапазоні $7{,}9\ мм \ge a_c \ge 5{,}3\ мм$ (ділянка *I*, крива *A'B'* на рис. 6а), тоді як на глибинах від 1 км до 3 км небезпечними є кільцеві втомні тріщини глибиною $a^* = 7{,}9\ мм$ (ділянка *II*, крива *B'C* на рис. 5а).

Результати обчислень (рис. 5б) дають підстави зробити висновок, що під час спуско-підіймальних операцій для бурильної труби груп міцності "Л" на глибинах від $1{,}2\ км$ до $6\ км$ ($0{,}30\ МН \le Q \le 1{,}60\ МН$) критичними для металу бурильних труб є внутрішні поперечні кільцеві тріщини в діапазоні $5{,}6\ мм \ge a_c \ge 2{,}4\ мм$ (рис. 5б, ділянка *I*, крива 1, *AB*). На глибинах від 1 км до 1,2 км небезпечними є втомні тріщини глибиною $a^* = 5{,}6\ мм$ (рис. 5б, ділянка *II*, крива *BC*). Для металу муфтової частини різьбового з'єднання бурильних труб під час спуско-підіймальних

операцій на глибині від 2,3 км до 6 км критичними є кільцеві втомні тріщини в діапазоні $14{,}4\ мм \geq a_c \geq 9{,}0\ мм$ (рис. 5б, ділянка *I*, крива *A'B'*), тоді як на глибинах від 1 *км* до 2,3 *км* небезпечними є втомні тріщини глибиною $a^* = 14{,}4\ мм$ (рис. 5б, ділянка *II*, крива *B'C'*).



а)



б)

Рис. 5 – Вплив ваги бурильної колони (Q) на глибину критичної зовнішньої поперечної кільцевої тріщини (а), розміщеній у стінці бурильної труби груп міцності "Л" (1) та у ніпельній частині різьбового з'єднання 3-133 (2), а також на глибину критичної внутрішньої поперечної кільцевої тріщини (б), розміщеній у стінці бурильної труби груп міцності "Л" (1) та у муфтовій частині різьбового з'єднання 3-133 (2)

За допомогою одержаних результатів можна пояснити суттєве збільшення кількості аварій елементів бурильної колони під час спуско-підіймальних операцій, описаних у роботах [1,3,7,11].

Узагальнення результатів розрахунково-експериментальних досліджень свідчить, що для оцінювання умов руйнування тривало експлуатованих бурильних труб групи міцності "Л", що містять поперечні кільцеві тріщини необхідно, по-перше, враховувати характер розміщення поперечної кільцевої тріщини (зовнішня чи внутрішня), по-друге, на малих глибинах необхідно враховувати показник "опірності елемента конструкції росту тріщини". На глибинах понад 2,9 *км* – для труб, що містять зовнішню (ділянка *I*, крива *1*, *AB* на рис. 5а) або від 1,2 *км* – внутрішню (ділянки *I*, крива *1*, *AB* на рис. 5б) поперечну кільцеву тріщину умови руйнування визначаються критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень K_{Jc} металу труб бурильної колони. На менших глибинах – ділянка *II* (крива *1*, *BC* на рис. 5а та рис. 5б) умови руйнування визначаються характеристичною глибиною зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини за менших від критичного коефіцієнта інтенсивності напружень значень, оскільки із незначним збільшенням глибини цієї тріщини коефіцієнт інтенсивності напружень швидко зростає до критичних значень K_{Jc} металу труб бурильної колони. Аналогічні тенденції зберігаються при оцінюванні умов руйнування ніпельної та муфтової частини бурильного замка ЗУ-155

Таким чином, під час спуско-підіймальних операцій визначальним чинником, що спричиняє аварійні ситуації тривало експлуатованих бурильних колон із зовнішньою поперечною кільцевою тріщиною у процесі буріння на глибинах понад 2,9 км та із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною на глибинах понад 2 км (див. табл. 4) є критична глибина тріщини a_c при досягненні якої, відбувається втрата металу бурильних труб опірності розвитку тріщин, тобто їх тріщиностійкості. На менших глибинах, при оцінці умов руйнування, необхідно враховувати характеристичну глибину тріщини a^*.

Слід також звернути увагу на ту обставину, що при спуско-підіймальних операціях внутрішні кільцеві тріщини є більш небезпечними від зовнішніх на глибинах понад 2 км, тоді як в інтервалі глибин від 1 *км* до 2 *км* більш небезпечними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини.

Зазначена експериментально-розрахункова процедура може бути використана для експрес-оцінювання умов руйнування тривало експлуатованих елементів бурильних труб. Крім того, її можна застосувати для аналізу результатів технічного діагностування зазначених елементів бурильних труб, та прийняття інженерних рішень, щодо можливостей їх подальшої експлуатації при виконанні спуско-підіймальних операцій на задану глибину у процесі буріння свердловин.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Таблиця 4 – Значення глибини критичних a_c (характеристичних (a^*)) кільцевих тріщин

H, км	Критична довжина зовнішньої поперечної кільцевої тріщини a_c, (a^*), *мм*		Критична довжина внутрішньої поперечної кільцевої тріщини a_c, (a^*), *мм*	
	група міцності "Л"	ніпельна частина різьбового з'єднання З-133	група міцності "Л"	муфтова частина різьбового з'єднання З-133
1	5,9, (4,3)	10,9, (7,9)	5,7, (5,6)	16,9, (14,4)
2	5,1, (4,3)	9,3, (7,9)	4,9	15,0, (14,4)
3	4,2,~(4,3)	7,9, (7,9)	3,8	13,3
4	3,6	7,0	3,2	11,9
5	3,2	6,2	2,8	10,5
6	2,8	5,3	2,4	9,0

Висновки

1. Запропоновано експериментально-розрахункову процедуру для оцінювання умов критичного руйнування під час спуско-підіймальних операцій тривало експлуатованих елементів труб бурильних колон, що містять зовнішню або внутрішню поперечну кільцеву тріщину.

2. Здійснено експериментальне оцінювання критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{JC} металу тривало експлуатованих бурильних труб для групи міцності "Л" та бурильного замка ЗУ-155.

3. Встановлено, що руйнування тривало експлуатованих бурових труб групи міцності "Л" та ніпельної частини різьбового з'єднання З-133 із зовнішньою поперечною кільцевою тріщиною на глибині понад 2,9 *км* визначається критичною тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 1 км до 2,9 *км* – показником "опірності елемента конструкції росту тріщини". Для бурильних труб із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною та муфтовою частиною різьбового з'єднання З-133 на глибинах від 1,2 *км* та 2,0 *км* до 6 *км* визначається критичною тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 1 км до 1,2-2,0 *км* – показником "опірності елемента конструкції росту тріщини".

4. Узагальнене оцінювання умов руйнування під час спуско-підіймальних операцій рівно навантажених елементів труб бурильних колон засвідчує, що внутрішні поперечні кільцеві тріщини є більш небезпечними від зовнішніх на глибинах понад 2 км, тоді як в інтервалі глибин від 1 *км* до 2 *км* більш небезпечними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини.

5. Одержані результати можна застосовувати для інтерпретації технічного діагностування тривало експлуатованих труб бурильних колон.

Список літератури

1. **Похмурський, В. І.** Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб. / за заг. ред. **В. В. Панасюка**. – Том 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / **В. І. Похмурський, Є. І. Крижанівський, В. М. Івасів** та ін. – Львів - Івано-Франківськ: *Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України; Івано-Франківський націон. техн. ун–т нафти і газу*, 2006. – 1193 с.
2. **Lu, S.** Failure analysis of IEU drill pipe wash out / **S. Lu, Y. Feng, F. Luo, C. Qin, X. Wang** // *International Journal of Fatigue*. – 2005. – Vol. 27. – P 1360–1365 doi:10.1016/j.ijfatigue.2005.07.012.
3. **Івасів, В. М.** Аналіз причин руйнування елементів бурильної колони / **В. М. Івасів, Я. С. Гриджук, А. Р. Юрич** // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2014. – №6/4 (20). – С. 15-17.
4. **Luo, S.** Effect of stress distribution on the tool joint failure of internal and external upset drill pipes / **S. Luo, S. Wu** // *Materials and Design*. – 2013. – Vol. 52. – P 308-314. – doi:10.1016/j.matdes.2013.05.073.
5. **Zhu, X.** Failure analysis and solution studies on drill pipe thread gluing at the exit side of horizontal directional drilling / **X. Zhu, L. Dong, H. Tong** // *Engineering Failure Analysis*. – 2013. – Vol. 33. – P 251-264. – doi:10.1016/j.engfailanal.2013.05.017.
6. **Murthy, G. V. S.** Hardbanding failure in a heavy weight drill pipe / **G. V. S. Murthy, G. Das, S. K. Das, N. Parveen, S. R. Singh** // *Engineering Failure Analysis*. – 2011. – Vol. 18. – P 1395-1402. – doi:10.1016/ j.engfailanal.2011.03.014.
7. **Macdonald, K. A.** Failure analysis of drillstrings. / **K. A. Macdonald, J. V. Bjune** // *Engineering Failure Analysis*. – 2007. – Vol. 14, Is. 8. – P 1641-1666. – doi:10.1016/j.engfailanal.2006.11.073.
8. **Li, F. P.** Piecing Failure Analysis of Drill Pipe Upset / **F. P. Li, Y. G. Liu, Y. Wang** // *Advanced Materials Research* / 2011. – Vol. 314-316. – P. 1210-1213. – doi:10.1016/j.engfailanal.2011.06.018.
9. **Zamani, S. M.** Failure analysis of drill pipe: A review / **S. M. Zamani, S. A. Hassanzadeh-Tabrizi, H. Sharifi** // *Engineering Failure Analysis*. – 2016. – Vol. 59. – P. 605-623. – doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.10.012.
10. **Moradi, S.** Experimental and computational failure analysis of drillstrings / **S. Moradi, K. Ranjbar** // *Engineering Failure Analysis*. – 2009. – Vol. 16, Is. 3. –P. 923-933. – doi:10.1016/j.engfailanal.2008.08.019.
11. **Артим, В. І.** Аналіз корозійно-втомних руйнувань елементів бурильної колони / **В. І. Артим, І. І. Яциняк, В. В. Гриців** [та ін.] // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ.* – 2012. – № 2 (43). – С. 197-202.
12. **Фридман, Я. Б.** Механические свойства металлов. Механические испытания. Конструкционная прочность: у 2 т. / **Я. Б. Фридман**. – М.: *Машиностроение,* 1974. – Т. 2. – с. 368.

13. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. **ГОСТ 25.506-85** – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.
14. **Дмитрах, І. М.** Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб. / За заг. ред. **В. В. Панасюка**. – Том 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / **І. М. Дмитрах, Л. Тот, О. Л. Білий, А. М. Сиротюк.** – Львів: СПОЛОМ, 2012. – 316 с.

Bibliography (transliterated)

1. **Pochmurskyi, V. I., Kryzhanivskyi, Ye. I., Ivasiv, V. M.** ta in. Mekhanika ruinuvannia i mitsnist materialiv: dovidnyk. posib. / za zah. red. **V.V. Panasiuka**, Tom 10: Mitsnist ta dovhovichnist naftohazovoho obladnannia. Lviv - Ivano-Frankivsk: *Fizyko-mekhanichnyi instytut im. H.V. Karpenka NAN Ukrainy; Ivano-Frankivskyi natsion. tekhn. un–t nafty i hazu*, 2006, 1193 s.
2. **Lu, S., Feng Y., Luo F., Qin C., Wang X.** Failure analysis of IEU drill pipe wash out. *International Journal of Fatigue*, 2005, Vol. **27**, P. 1360–1365. doi:10.1016/j.ijfatigue.2005.07.012.
3. **Ivasiv, V. M., Hrydzhuk, Ia. S., Yurych A. R.** Analiz prychyn ruinuvannia elementiv burylnoi kolony. *Tekhnolohicheskii audit i rezervy proizvodstva*, 2014, **№6/4 (20)**, S. 15-17.
4. **Luo, S., Wu S.** Effect of stress distribution on the tool joint failure of internal and external upset drill pipes, *Materials and Design*, 2013, Vol. **52**, P. 308-314. doi:10.1016/j.matdes.2013.05.073.
5. **Zhu, X. Dong, L., Tong, H.** Failure analysis and solution studies on drill pipe thread gluing at the exit side of horizontal directional drilling. *Engineering Failure Analysis*, 2013, Vol. **33**, P. 251 – 264. doi:10.1016/j.engfailanal.2013.05.017.
6. **Murthy, G. V. S., Das, G., Das, S. K., Parveen, N., Singh, S.,R.** Hardbanding failure in a heavy weight drill pipe. *Engineering Failure Analysis*, 2011, Vol. **18**, P. 1395-1402. doi:10.1016/ j.engfailanal.2011.03.014.
7. **Macdonald, K. A., Bjune, J. V.** Failure Analysis of Drillstrings. *Engineering Failure Analysis*, 2007, Vol. **14**, Is. 8, P. 1641 - 1666, doi:10.1016/j.engfailanal.2006.11.073.
8. **Li, F. P., Liu, Y. G., Wang, Y.** Piecing Failure Analysis of Drill Pipe Upset. *Advanced Materials Research*, 2011, Vol. **314 - 316**, P. 1210 - 1213, doi:10.1016/j.engfailanal.2011.06.018.
9. **Zamani, S. M., Hassanzadeh-Tabrizi, S. A., Sharifi, H.** Failure Analysis of Drill Pipe: A Review. *Engineering Failure Analysis*, 2016, Vol. **59**, P. 605-623, doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.10.012.
10. **Moradi, S., Ranjbar, K.** Experimental and Computational Failure Analysis of Drillstrings. *Engineering Failure Analysis*, 2009, Vol. **16**, Is. 3. – P. 923-933, doi:10.1016/j.engfailanal.2008.08.019.
11. **Artym, V. I., Yatsyniak, I. I., Hrytsiv, V. V.** [ta in.] Analiz koroziino-vtomnych ruinuvan elementiv burylnoii kolony. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 2012, **№ 2 (43)**, S. 197-202.
12. **Fridman, Ya. B.** Mekhanicheskiie svoistva metalov. Mekhanicheskiie ispytaniia. Konstruktsionnaia prochnost: u 2 t., M.: *Mashynostroieniie*, 1974, T. 2, s. 368.
13. Raschioty i ispytaniia na prochnost. Metody mekhanicheskikh ispytanii metallov. Opredeleniie kharakteristik treshchinostoikosti (viazkosti razrusheniia) pri staticheskom nahruzhenii. **HOST 25.506-85** – M.: Izd-vo standartov, 1985, 62 s.
14. **Dmytrach, I. M., Tot, L., Bilyi, O. L., Syrotiuk, A. M.,** Mekhanika ruinuvannia i mitsnist materialiv: dovidnyk. posib. / za zah. red. **V. V. Panasiuka**, Tom 13: Pratsezdatnist materialiv i elementiv konstruktsii z hostrokinzevymy kontsentratoramy napruzhen, Lviv: CPOLOM, 2012, 316 s.

Відомості про авторів (About authors)

Витязь Олег Юлійович – кандидат технічних наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, директор інституту нафтогазової інженерії; м. Івано-Франківськ, Україна; e-mail: o.vytyaz@gmail.com.

Oleg Yuliiovych Vytyaz – Scientific Degree (Ph. D.), Docent, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Director of Institute of Petroleum Engineering, Ivano-Frankivsk, Ukraine; e-mail: o.vytyaz@gmail.com.

Грабовський Роман Степанович – доктор технічних наук, професор, кафедра будівельної механіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна; e-mail: hrabovskyy.r@gmail.com.

Roman Stepanovych Hrabovskyi – Doctor of Technical Sciences (Ph. D.), professor, Department of construction mechanics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine; e-mail: hrabovskyy.r@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Витязь, О. Ю. Експрес-оцінювання умов руйнування елементів експлуатованих труб бурильних колон при спуско-підіймальних операціях / **О. Ю. Витязь, Р. С. Грабовський** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*, Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 30-38. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.05.

Please cite this article as:

Vytyaz, O., Hrabovskyi, R. Express-evaluation of conditions of operated drill pipe elements failure in tripping. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 30–38, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.05.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Витязь, О. Ю. Экспресс-оценка условий разрушения элементов эксплуатируемых труб бурильных колонн при спуско-подъемных операциях / **О. Ю. Витязь, Р. С. Грабовский** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*, Харьков: НТУ «ХПИ» . – 2017. – № 7 (1229) . – С. 30-38. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.05.

АННОТАЦИЯ *Продолжительность спуско-подъемных операций у процессе бурения глубоких скважин составляет до 60 % от общего производственного времени. Экспериментально оценен силовой критерий разрушения металла бурильных труб и замков (K_{Jc}) та определены условия, при которых во время спуско-подъемных операций возможно разрушение элементов эксплуатируемых бурильных труб, содержащих внешнюю или внутреннюю поперечную кольцевую трещину. Кроме этого, определено дополнительное условие разрушения элементов эксплуатированных бурильных труб при меньших от критического коэффициента интенсивности напряжений значений - характеристическую глубину внешней или внутренней поперечной кольцевой трещины, поскольку с незначительным увеличением глубины этой трещины коэффициент интенсивности напряжений в ее вершине быстро возрастает до критических значений K_{Jc} металла труб бурильной колонны. Установлена взаимосвязь критических и характеристических глубин внешней или внутренней поперечных кольцевых трещин в бурильных трубах и замках с весом бурильной колонны. Показано, что внутренние поперечные кольцевые трещины при спуско-подъемных операциях бурильных колонн на глубинах более 2 км являются более опасными чем внешние, тогда как в интервале глубин от 1 км до 2 км более опасны внешние поперечные кольцевые трещины. Предложено экспресс-оценку условий разрушения элементов эксплуатируемых бурильных труб, которая дает возможность интерпретировать результаты их технического диагностирования.*

Ключевые слова: *условия разрушения бурильных труб; критический коэффициент интенсивности напряжений; критический размер внешней или внутренней поперечной кольцевой трещины; характеристическая глубина внешней или внутренней поперечной кольцевой трещины*

Надійшла (received) 04.03.2017

УДК 539.3 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.06

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ К ВАРЬИРОВАНИЮ ЕЕ ИНЕРЦИОННО-ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

А. В. ГРАБОВСКИЙ*

Кафедра теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, УКРАИНА
e-mail: grabovskiy@tmm-sapr.org

АННОТАЦИЯ *В статье исследовано влияние варьирования инерционно-жесткостных характеристик на изменение собственных частот и собственных форм колебаний (перемещения и эквивалентные напряжения) для прямоугольной, защемленной по контуру, пластины. Показана актуальность приведенной задачи. Решение получено с использованием метода конечных элементов. Показана возможность с высокой точностью аппроксимировать изменение собственных частот, собственных форм (а также положения зон пучностей и узлов) линейной зависимостью от изменения варьируемых инерционно-жесткостных параметров.*
Ключевые слова: *Свободные колебания, динамическая система, собственные частоты, собственные формы колебаний, чувствительность.*

DETERMINATION OF THE SENSITIVITY OF OWN FREQUENCIES AND MODES VIBRATIONS OF A RECTANGULAR PLATE TO THE VARIATION OF ITS INERTIAL STIFFNESS CHARACTERISTICS

A. GRABOVSKIY

Department theory and systems of automated design of mechanisms and machines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT *The article is a logical continuation of a series of works published previously. It investigated the effect of varying inertial stiffness characteristics of the change of natural frequencies and natural modes for a rectangular, clamped along the contour of the plate. As variable parameters acts thickness variation characteristic element within square plate, and changing the added mass, situated in a fixed place. As a study of their own forms of oscillations are the equivalent displacement and stress. When this pattern investigated natural modes in general and specific sections. A series of calculations were performed using the finite element method.*
Thus, the determined effect of varying the parameters (thickness and weight) to change their own forms and natural frequencies of the plate. The paper studied on its own forms and movements equivalent stress. All results are normalized relative to the point with the maximum value of its own form for the basic version.
The article confirmed the ability to accurately approximate the change in natural frequencies, natural modes (as well as the position of nodes and anti-nodes zones) linear dependence on the change of variable inertia, stiffness parameters.
Keywords*: Free vibration; dynamic system; eigen mode; mode shapes; sensitivity*

Введение

Задача о поиске собственных частот и собственных форм колебаний ставится для всех динамических систем [1, 2] как составная часть задачи об отстройке от резонансных частот. Например, в статье [3] авторы выполняют поиск собственных частот и форм (по перемещениям) металлоконструкции солнечных электростанций при разных углах поворотов. При этом для поиска собственных частот используется метод конечных элементов, встроенный в коммерческий программный комплекс ANSYS WorkBench. В статье [4] авторы исследуют собственные частоты и собственные формы (по перемещениям и эквивалентным напряжениям) предварительно напряженных мембранных конструкций, в частности, дирижабля. Авторы показывают, как внутреннее давление дирижабля и его длина влияют на собственную частоту. Встречаются также работы, в которых авторы рассматривают ортотропные материалы [5], в которых исследуют, как будет меняться частота при изменении угла армирования волокнами. Также исследуются собственные частоты и собственные формы больших цилиндрических резервуаров, которые стоят на упругом основании (грунте) [6].

Таким образом, в литературе встречается множество работ по отстройке систем от резонансных частот [7, 8], однако не было найдено работ, в которых авторы целенаправленно управляют собственными формами путем изменения массо-инерционных характеристик динамической системы. Такая задача была поставлена и осуществляются попытки ее решения.

© А. В. ГРАБОВСКИЙ, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Как было показано в предыдущих работах [9 – 11], управление собственными частотами и формами колебаний является актуальной и важной задачей как с научной, так и практической точек зрения. В частности, в статье [9] был предложен подход к исследованию чувствительности собственных частот и собственных форм колебаний системы с двумя степенями свободы к варьированию параметров динамической системы. Собственные формы колебаний определялись из условий достижения условных минимумов функции Рэлея. Предложены соотношения для определения компонент чувствительности с использованием конечных разностей. В статье [10] был выполнен дополнительный анализ поведения динамической системы с двумя степенями свободы согласно выкладкам, описанным в статье [9]. В статье [11] подход, предложенный в [9 – 10], был расширен на многомассовые дискретные системы, а иллюстрирующие расчеты были выполнены для системы с тремя степенями свободы. Проведено сравнение решения, выполненного на основе минимизации функции Рэлея, которое сравнивалось с параллельно выполненным решением на основе задачи о собственных значениях для системы дифференциальных уравнений, составленных методом Даламбера. В процессе расчетов была выполнена оценка влияния жесткостей и масс различных компонент на собственные частоты и собственные формы колебаний.

Предлагаемая статья является развитием проделанной ранее работы и расширяет предложенную теорию на пластинчатые системы.

Постановка задачи

Ставятся задачи выполнить анализ влияния изменения инерционно-жесткостных характеристик отдельных элементов прямоугольной пластины на собственные частоты и соответствующие им собственные формы колебаний.

В качестве исследуемого объекта была выбрана прямоугольная пластина, защемленная по контуру (рис. 1). Метод анализа – метод конечных элементов (МКЭ).

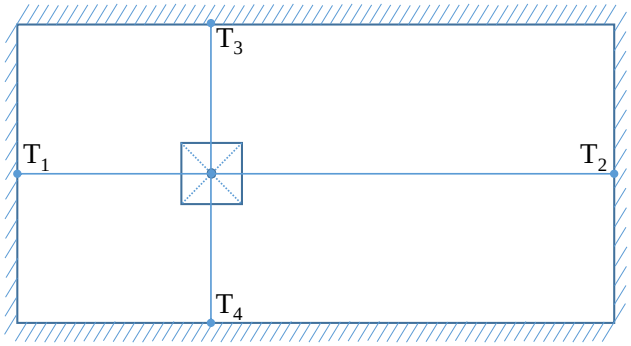


Рис. 1 – Исследуемая прямоугольная пластина

При этом исследуемыми характеристиками выступают собственные частоты, собственные формы (по перемещениям и эквивалентным напряжениям), причем исследуются формы как всей пластины, так и в срезе вдоль путей T_1T_2, T_3T_4 (см. рис. 1).

Варьирование инерционно-жесткостных параметров прямоугольной пластины осуществляется в двух постановках:

Задача 1. Пластина, с размерами, $a \times b$, имеющая общую толщину $h_0 = 1$ *мм*, у которой варьируется толщина квадратного элемента внутри $h_0(1+\alpha)$, $\alpha \in [-0.2, 0.2]$ с размерами $a_2 \times b_2$ (рис. 2), то есть изменение α составляет ± 20%. Варьируемый элемент связан с исследуемой пластиной совместной сеткой, таким образом, перемещения и углы поворота на границе между разными частями пластины равны. Также стоит отметить, что длина b_2 составляет 10 % от длины b, а ширина a_2 – 20 % от a.

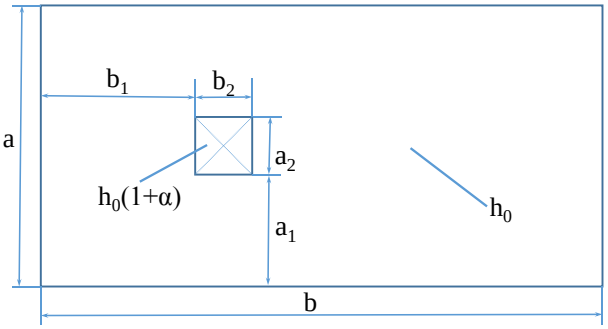


Рис. 2 – Прямоугольная пластина с варьируемой толщиной внутреннего элемента

Задача 2. Пластина равной толщины, у которой присутствует изменяемая добавочная масса $m = m_0(1+\beta)$, $\beta \in [0, 0.127]$ *г*.

В задачах 1 и 2 обозначены $\alpha_1 = \alpha$, $\alpha_2 = \beta$.

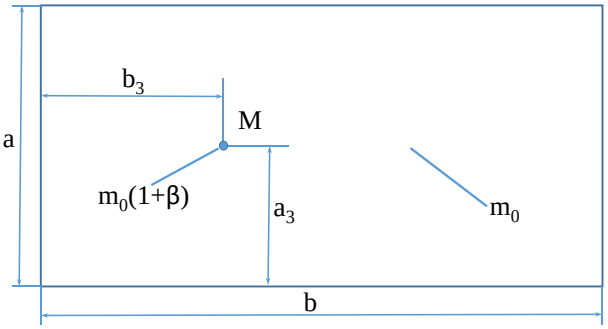


Рис. 3 – Прямоугольная пластина с изменяющейся добавочной массой в точке M

Метод решения

Рассматриваемую задачу, как уже отмечалось, предлагается решать при помощи метода конечных элементов. Для понимания процесса приведем основные уравнения для решения поставленной

задачи. Разрешающее уравнение динамической системы для поиска собственных частот и собственных форм колебаний имеет вид [12]:

$$\mathbf{M}\ddot{x}+\mathbf{C}x=0, \quad (1)$$

где **M** – суммарная матрица масс пластины (в том числе и присоединенная), **C** – матрица жесткости.

Стоит отметить, что при решении задачи 1 будут вноситься изменения как в матрицу жесткости **C**, так и матрицу масс **M**, а при решении задачи 2 будут вноситься изменения только в матрицу масс **M**.

Уравнение для поиска собственных частот и собственных форм колебаний имеет вид:

$$(\mathbf{K}-\omega^2\mathbf{M})\varphi=0, \quad (2)$$

где ω – собственные частоты динамической системы, φ – вектор собственных значений (собственная форма). Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо найти ω и φ. Поиск этих характеристик осуществляется с применением алгоритма Ланцоша, который является наиболее эффективным при симметричной матрице собственных значений [3].

При решении уравнения (2) можно заметить, что коль скоро для пластины можно выделить некоторые параметры p_k (толщина прямоугольного включения в пластине (задача 1), добавленная масса (задача 2)), которые могут быть подвергнуты варьированию путем малого изменения параметров α_k.

$$p_k = p_0 (1 + \alpha_k), \quad (3)$$

то получаем параметрическое семейство решений:

$$\omega_i^2 = \omega_i^2(\alpha_k); \quad \varphi_i = \varphi_i(\alpha_k). \quad (4)$$

В работах [9 – 11] показано, что при малых α_k решения (4) можно с удовлетворительной точностью линеаризовать по параметрам α_k, образующим вектор α:

$$\omega_i^2(\alpha) \approx \omega_i^2(0)\left[1+\sum_k \frac{\partial \omega_i^2}{\partial \alpha_k}\cdot \alpha_k\right] \quad (5)$$

$$\varphi_i(\alpha) \approx \varphi_i(0)\left[1+\sum_k \frac{\partial \varphi_i}{\partial \alpha_k}\cdot \alpha_k\right] \quad (6)$$

При этом для вычисления компонент чувствительности

$$\nabla_{ik}^{\omega}=\frac{\partial \omega_i^2}{\partial \alpha_k}, \quad \nabla_{ik}^{\varphi}=\frac{\partial \varphi_i}{\partial \alpha_k}. \quad (7)$$

можно применить различные методы. В предлагаемом подходе динамические компоненты чувствительности вычисляются через конечно-разностные соотношения:

$$\nabla_{ik}^{\omega} \approx \frac{\omega_i^2(\overline{\alpha_k}) - \omega_i^2(0)}{\alpha_k^*}, \quad (8)$$

$$\nabla_{ik}^{\varphi} \approx \frac{\varphi_i(\overline{\alpha_k}) - \varphi_i(0)}{\alpha_k^*}. \quad (9)$$

Здесь $\overline{\alpha_k}$ – массив параметров α с нулевыми компонентами, за исключением *k*-й компоненты, равной пробному значению α_k^*. Как и ранее [9 – 11], решения при таких значениях $\overline{\alpha_k}$ назовем «реперными», имея в виду, что они служат опорными для определения конечно-разностных аппроксимаций компонент массива чувствительностей ∇_{ik}^{ω}, ∇_{ik}^{φ}.

Для вычисления «реперных» решений можно использовать МКЭ. Таким образом, соотношения (5), (6) при вычислении ∇_{ik}^{ω}, ∇_{ik}^{φ} по формулам (7) дают возможность определять тенденции изменения собственных частот и собственных форм колебаний исследуемого объекта при варьировании параметров α. При этом можно исследовать различные аспекты, порождаемые в ходе данных процессов. Во-первых, можно провести анализ влияния изменения α и на собственные частоты и на собственные формы колебаний. В частности, можно определить изменение положения зон узловых линий и пучностей как по перемещениям, так и по напряжениям. Во-вторых, учитывая линейность изменения собственных частот и собственных форм колебаний по параметрам α, можно добиваться изменения пространственного положения этих пучностей и узлов, отводя их в желательную зону из нежелательной.

В качестве иллюстрации далее будут рассмотрены примеры по анализу реакции исследуемой пластины (задачи 1 и 2) на изменение параметров толщины и добавленной массы.

Численное решение задачи

Задача решалась численным методом конечных элементов, реализованным в ANSYS WorkBench. Пластина разбивалась сеткой, состоящей из 9300 квадратных конечных элемента типа shell.

На следующих рисунках (рис. 4, 5) приведены спектр первых десяти собственных частот и некоторые собственные формы пластины в базовой постановке

(т. е. при $\alpha_k = 0$), а именно толщина у всей пластины одинаковая, а добавачная масса отсутствует.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

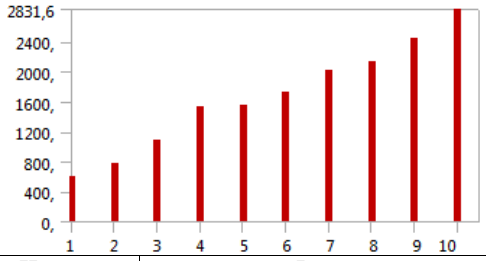


Рис. 4 – Диаграмма первых десяти собственных частот прямоугольной пластины

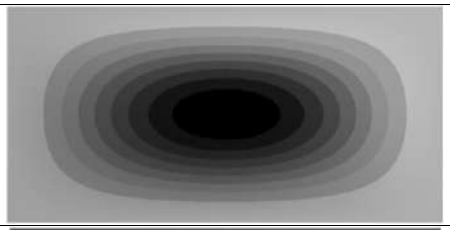
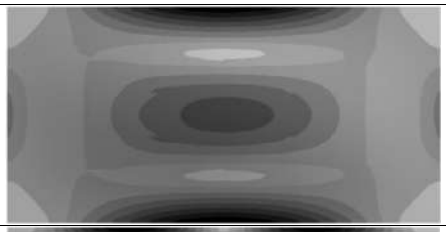
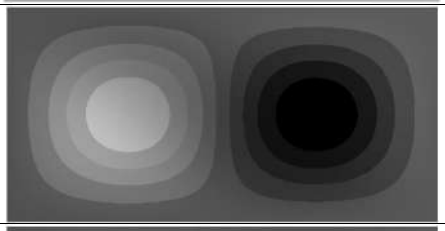
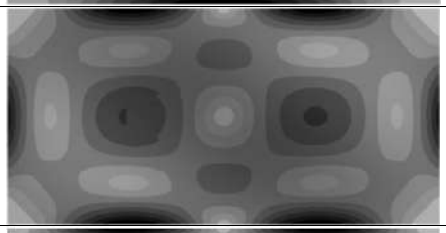
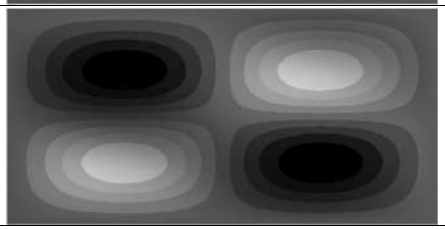
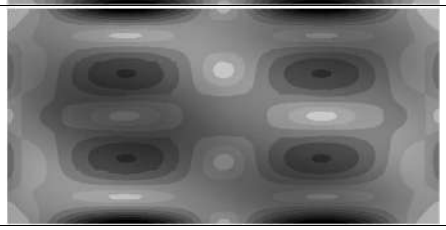
№ СЧ	Частота, Гц	Форма перемещений	Форма эквивалентных напряжений
1	597,33		
2	767,99		
6	1721,4		

Рис. 5 – Некоторые собственные частоты и собственные формы колебаний пластины в базовой постановке

Далее была выполнена серия расчетов с варьированием толщины внутреннего квадратного элемента (задача 1). Значения толщины были следующими: 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1, 1.05, 1.1, 1.15, 1.2 от базовой. При этом получены следующие результаты (рис. 6 - 11).

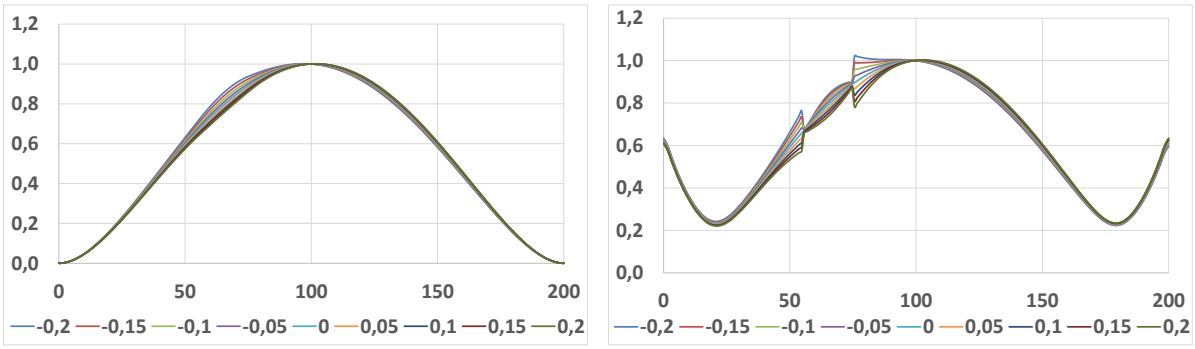


Рис. 6 – График изменение первой собственной формы вертикальных перемещений и эквивалентных напряжений от параметра α вдоль пути T_1T_2 (рис. 1)

Кроме графика среза собственной формы вдоль пути, были получены графики чувствительности собственной формы μ_{ij} от изменения параметров α и β вдоль пути T_1T_2 и T_3T_4:

$$\mu_{ij} = \left(\frac{\lambda_{ij}(\alpha,\beta)}{\lambda_{ij}(\alpha,\beta)|_{max}} - \frac{\lambda_{ij}(0,0)}{\lambda_{ij}(0,0)|_{max}} \right) / p(\alpha,\beta). \qquad (10)$$

где $\lambda_{ij}(\overline{\alpha,\beta})\big|_{max}$ – значение формы $\lambda_{ij}(\alpha,\beta)$ в точке, соответствующей максимуму в форме при нулевых параметрах; $p(\alpha,\beta)$ – приращение соответствующего параметра α или β, т. е. α_1^*, α_2^* (см. выше).

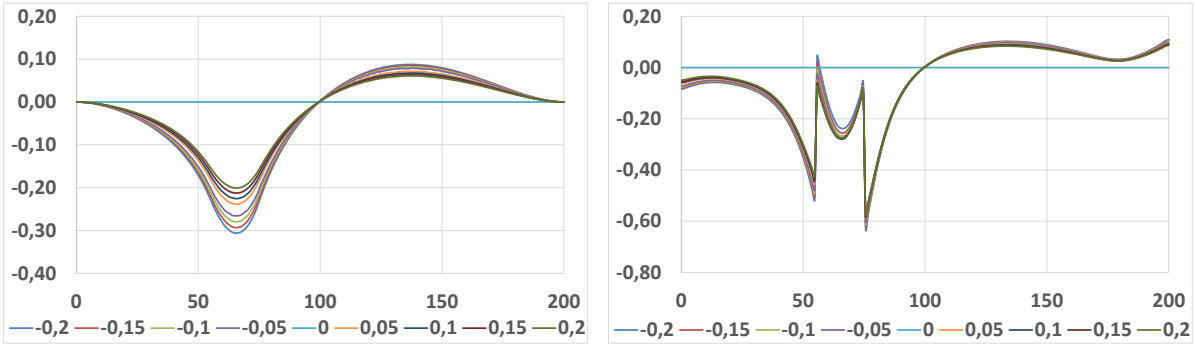


Рис. 7 – График чувствительности первой собственной формы вертикальных перемещений и эквивалентных напряжений от параметра α вдоль пути T_1T_2 (рис. 1)

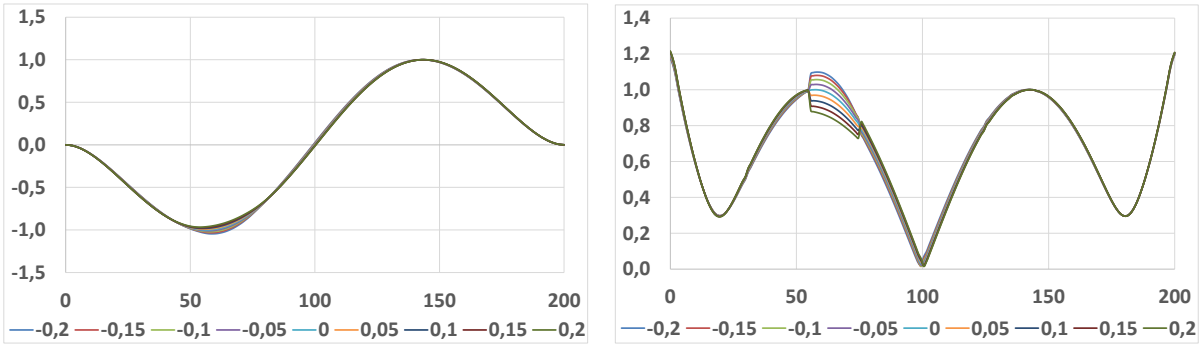


Рис. 8 – График изменение второй собственной формы вертикальных перемещений и эквивалентных напряжений от параметра α вдоль пути T_1T_2 (рис. 1)

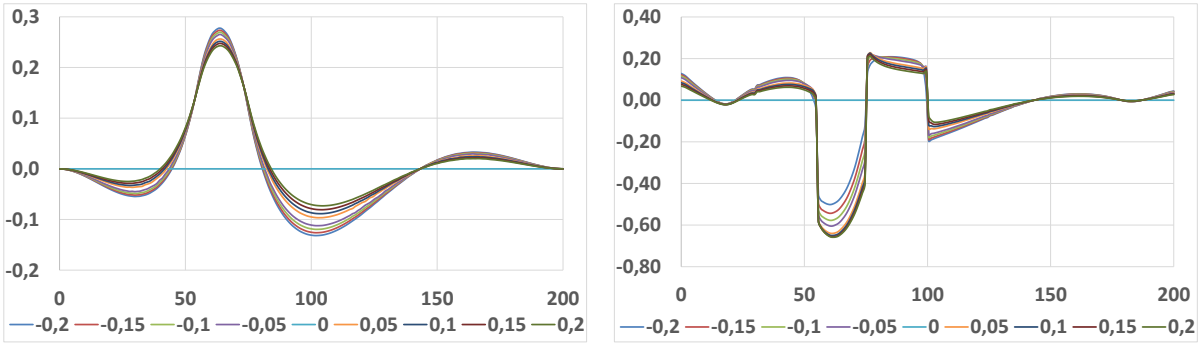


Рис. 9 – График чувствительности второй собственной формы вертикальных перемещений и эквивалентных напряжений от параметра α вдоль пути T_1T_2 (рис. 1)

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

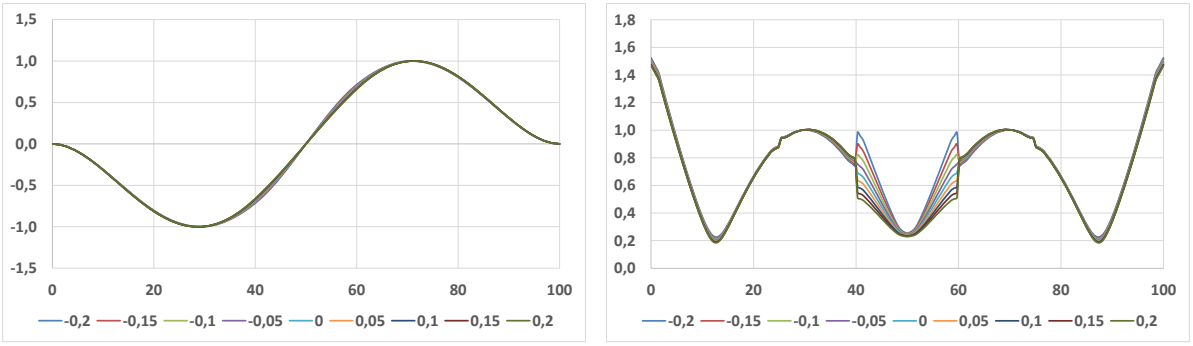


Рис. 10 – График изменение шестой собственной формы вертикальных перемещений и эквивалентных напряжений от параметра α вдоль пути T_3T_4 (рис. 1)

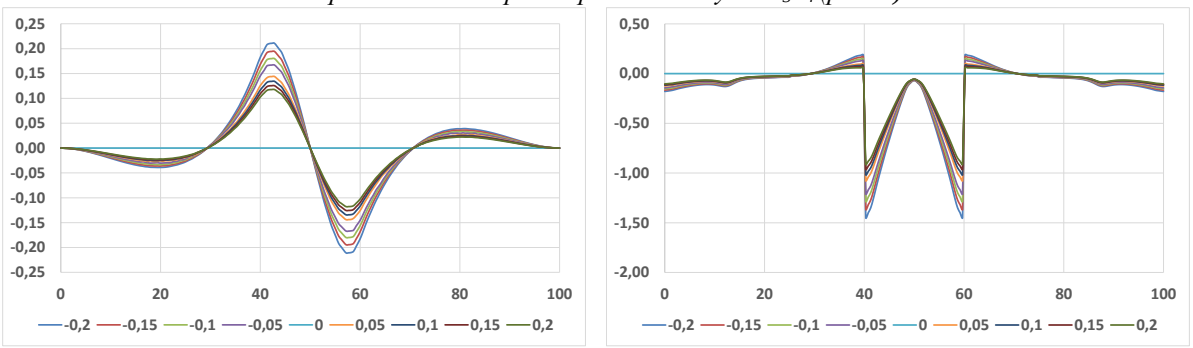
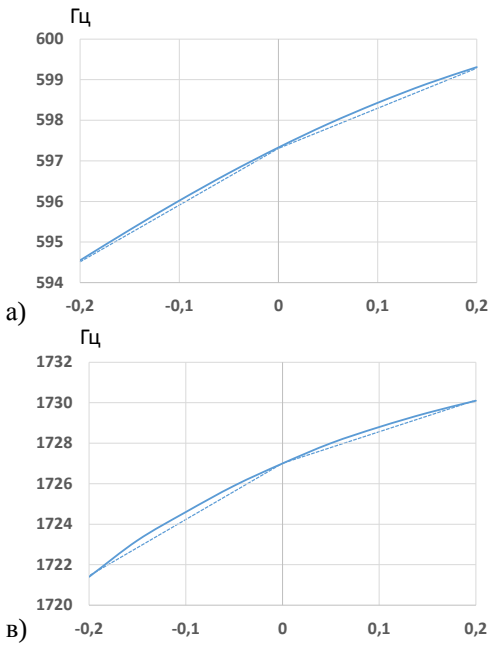


Рис. 11 – График чувствительности шестой собственной формы вертикальных перемещений и эквивалентных напряжений от параметра α вдоль пути T_3T_4 (рис. 1)

Как видно из графиков, при незначительном изменении, в пределах 20%, собственная форма также меняется незначительно. Как и следовало ожидать, чем меньше вносится изменение в систему (т. е. чем меньше параметр α_k^*), тем точнее вычисление чувствительности. С другой стороны, тем уже интервал применимости аппроксимационных зависимостей (5), (6).

Графики изменения 1, 2 и 6 собственной частоты при варьировании параметра α представлены на рис. 12. Анализируя полученные графики, следует отметить, что значение собственной частоты меняется практически линейно (штрихпунктирная линия) относительно базовой конструкции. Эта особенность также была отмечена в работах [7, 8].



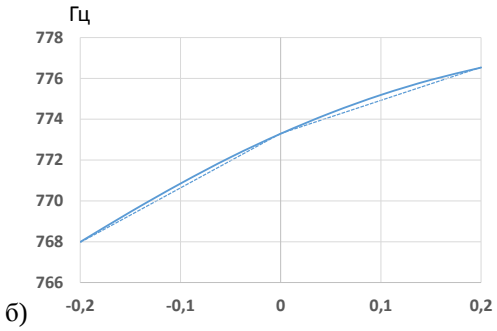


Рис. 12 – Графики изменения собственных частот при варьировании параметра α
а) 1-я СЧ б) 2-я СЧ в) 6-я СЧ

При решении задачи 2 параметр β имел следующие значения: 0, $6.37 \cdot 10^{-4}$, 0.006, 0.013, 0.019, 0.032, 0.064, 0.127 при общей начальной массе пластины 157 грамм. В результате расчета были получены графики, представленные на рис. 13 – 16.

На рис. 17 представлены графики изменения собственных частот колебаний при варьировании β. Стоит отметить, что первая частота меняется практически линейно во всем диапазоне β, при том, что добавочная масса добавлена в произвольном месте относительно максимума перемещений. В то же время, вторая собственная частота меняется существенно нелинейно. Это связано с тем, что добавочная масса находится практически в месте пучности. При этом, например, шестая собственная частота остается постоянной (не зависит от параметра β), потому что добавочная масса находится в узле.

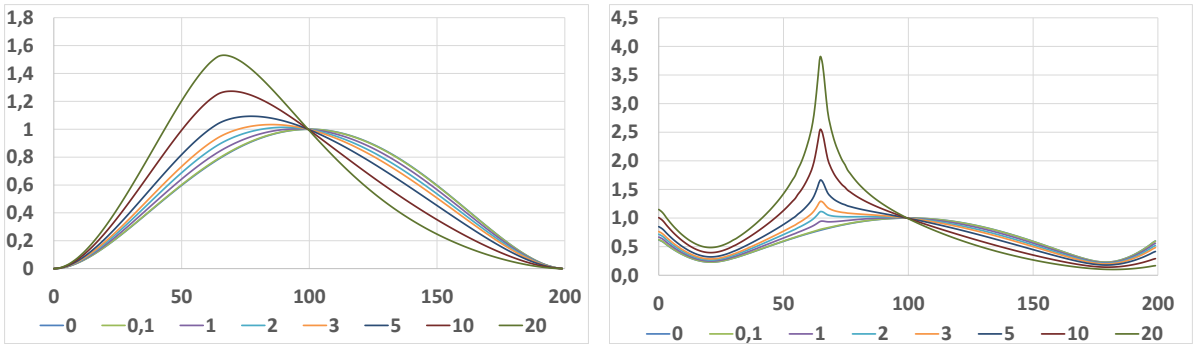


Рис. 13 – График изменение первой собственной формы вертикальных перемещений и эквивалентных напряжений от параметра $\beta \cdot m_0$ вдоль пути T_1T_2 (рис. 1)

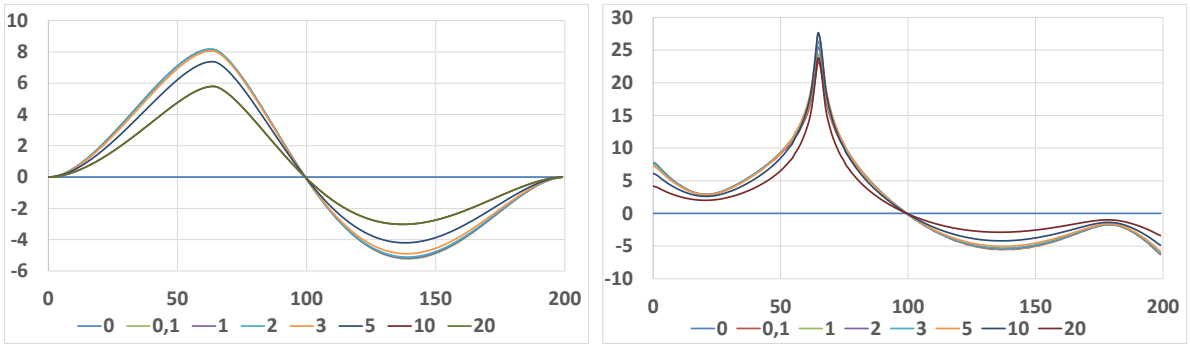


Рис. 14 – График чувствительности первой собственной формы вертикальных перемещений и эквивалентных напряжений от параметра $\beta \cdot m_0$ вдоль пути T_1T_2 (рис. 1)

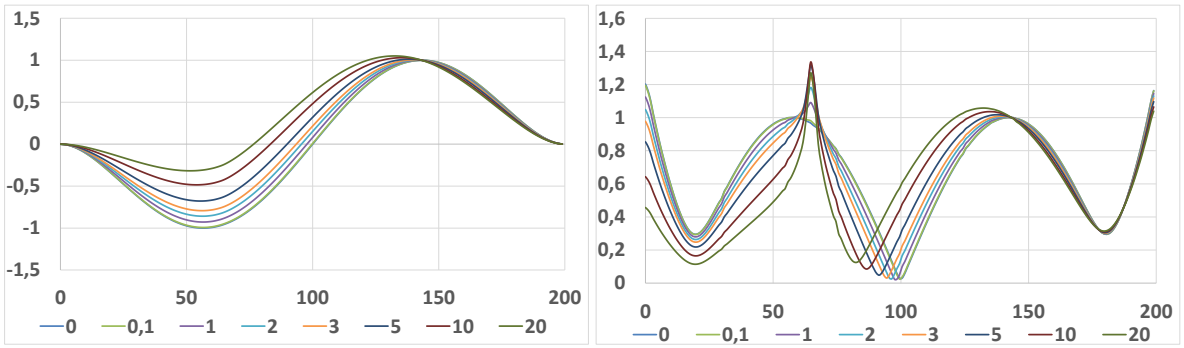


Рис. 15 – График изменение второй собственной формы вертикальных перемещений и эквивалентных напряжений от параметра $\beta \cdot m_0$ вдоль пути T_1T_2 (рис. 1)

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

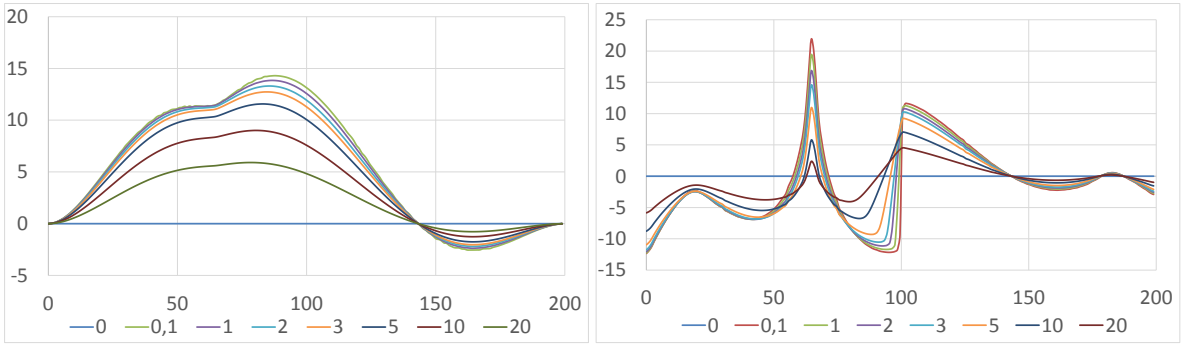
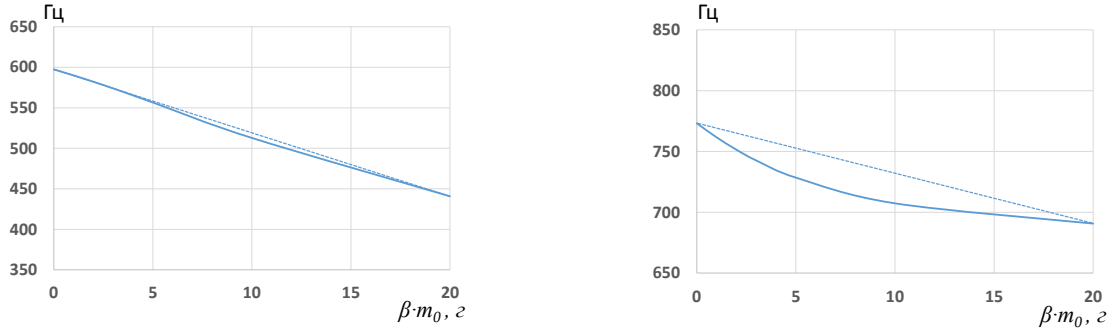


Рис. 16 – График чувствительности второй собственной формы вертикальных перемещений и эквивалентных напряжений от параметра $\beta \cdot m_0$ вдоль пути T_1T_2 (рис. 1)



а) б)

Рис. 17 – Графики изменения собственных частот при варьировании параметра $\beta \cdot m_0$ а) 1-я СЧ б) 2-я СЧ

Заключение

Таким образом, было получено влияние изменения параметров α и β на изменение собственных форм и собственных частот пластины. В статье исследовались собственные формы по перемещениям и эквивалентным напряжениям. Все результаты нормированы относительно точки с максимальной величиной собственной формы для базового варианта.

При этом можно сделать вывод о том, что подтверждена возможность с высокой точностью аппроксимировать изменение собственных частот, собственных форм (а также положения зон пучностей и узлов) линейной зависимостью от изменения варьируемых инерционно-жесткостных параметров. Т.о., показана применимость подхода, предложенного ранее для систем с конечным числом степеней свободы, к анализу систем с распределенными параметрами.

В дальнейшем планируется применить аналогичный подход к исследованию влияния варьирования инерционно-жесткостных параметров сложных пространственных конструкций на их собственные частоты и собственные формы колебаний.

Список литературы

1. **Liu, A. Q.** Exact Solutions for Free-Vibration Analysis of Rectangular Plates Using Bessel Functions / **A. Q. Liu, H. L. Chen** // *Journal of Applied Mechanics*. – 2007. – No 74. – P. 1247-1251. – doi:10.1115/1.2744043.
2. **O'Boy, D. J.** Vibration of a rectangular plate with a central power-law profiled groove by the Rayleigh Ritz method / **D. J. O'Boy,V.V. Krylov** // *Applied Acoustics*. – 2016. – No 104. – P. 24 – 32. – doi:10.17028/rd.lboro.2005377.v1.
3. **Qiong, Z.** Modal analysis of trough solar collector / **Z. Qiong, L. Zhengnong, W. Honghua** // *Solar Energy*. – 2017. – Vol. 141. – P. 81 – 90. – doi:10.1016/j.solener.2016.11.026.
4. **Yu, H.** Modal behaviors and influencing factors analysis of inflated membrane structures / **H. Yu, C. Wujun, C. Yufeng, Z. Daxu, Q. Zhenyu** // *Engineering Structures*. – 2017. – Vol. 132. – P. 413–427. – doi:10.1016/j.engstruct.2016.11.037.
5. **Apedo, K. L.** Free vibration analysis of inflatable beam made of orthotropic woven fabric / **K.L. Apedo, S.Ronel, E.Jacquelin, S.Tiem** // *Thin-Walled Structures*. – 2014. – Vol. 78. – P. 1 – 15. – doi:10.1016/j.tws.2013.12.004.
6. **Wei, S.** Free vibration analysis of a hard-coating cantilever cylindrical shell with elastic constraints / **S. Wei, Z. Mingwei, W. Zhuo** // *Aerospace Science and Technology*. – 2017. – Vol. 63. – P. 232–244. – doi:10.1016/j.ast.2017.01.002.
7. **Танченко А. Ю.** Анализ чувствительности прочностных и динамических характеристик машиностроительных конструкций на основе прямого возмущения конечно-элементных моделей / **Н. А. Ткачук, А. Ю. Танченко, А. Н. Ткачук, П. В.Чурбанов, И. Я. Храмцова, О. А. Ищенко** // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. – Харків : НТУ "ХПІ", 2012. – №22. – С. 147-169.

8. **Танченко А. Ю.** Влияние толщины панелей на спектр собственных частот колебаний корпусов транспортных средств специального назначения / **А. Ю. Танченко** // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. – Харків : НТУ "ХПІ", 2013. – №23. – С. 138-145.
9. **Грабовский, А. В.** Чувствительность собственных форм колебаний систем с несколькими степенями свободы к варьированию параметров динамической системы / **А. В. Грабовский, Н. А. Ткачук, Н. Н. Ткачук, А. Ю. Танченко, И. В. Мазур** // *Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Транспортное машиностроение*. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2015. – № 43. – С. 25 - 29.
10. **Грабовский, А. В.** Зависимость собственных частот и собственных форм колебаний от инерционно-жесткостных характеристик систем с конечным числом степеней свободы / **А. В. Грабовский** // *Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2015. – № 46. – С. 11 - 16.
11. **Грабовский, А. В.** Влияние варьируемых инерционно-жесткостных параметров на характеристики динамических многомассовых систем / **А. В. Грабовский** // *Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 17 - 22. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.03.
12. **Clough, R. W.** Dynamics of structures / **R. W. Clough, J. Penzien** // *McGraw-Hill*. – 1993. – 752 p.

Bibliography (transliterated):

1. **Liu, A. Q., Chen, H. L.** Exact Solutions for Free-Vibration Analysis of Rectangular Plates Using Bessel Functions. *Journal of Applied Mechanics*, 2007, **74**, 1247-1251, doi:10.1115/1.2744043.
2. **O'Boy, D. J., Krylov, V. V.** Vibration of a rectangular plate with a central power-law profiled groove by the Rayleigh Ritz method. *Applied Acoustics*, 2016, **104**, 24 – 32, doi:10.17028/rd.lboro.2005377.v1.
3. **Qiong, Z., Zhengnong, L., Honghua, W.** Modal analysis of trough solar collector. *Solar Energy*, 2017, **141**, 81 – 90, doi:10.1016/j.solener.2016.11.026.
4. **Yu, H., Wujun, C., Yufeng, C., Daxu, Z., Zhenyu, Q.** Modal behaviors and influencing factors analysis of inflated membrane structures. *Engineering Structures*, 2017, **132**, 413–427, doi:10.1016/j.engstruct.2016.11.037.
5. **Apedo, K. L., Ronel, S., Jacquelin, E., Tiem, S.** Free vibration analysis of inflatable beam made of orthotropic woven fabric. *Thin-Walled Structures*, 2014, **78**, 1 – 15, doi:10.1016/j.tws.2013.12.004.
6. **Wei, S., Mingwei, Z., Zhuo**, **W.** Free vibration analysis of a hard-coating cantilever cylindrical shell with elastic constraints. *Aerospace Science and Technology*, 2017, **63**, 232–244, doi:10.1016/j.ast.2017.01.002.
7. **Tanchenko, A. Yu., Tkachuk, N. A., Churbanov, P. V., Khramtsova, I. Ya., Ishchenko, O. A.** Analiz chuvstvitel'nosti prochnostnykh i dinamicheskikh kharakteristik mashinostroitel'nykh konstruktsiy na osnove pryamogo vozmushcheniya konechno-elementnykh modeley. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu "Kharkivs'kiy politekhnichniy institut"*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2012, **22**, 147-169.
8. **Tanchenko, A. Yu.** Vliyanie tolshchiny paneley na spektr sobstvennykh chastot kolebaniy korpusov transportnykh sredstv spetsial'nogo naznacheniya. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu "Kharkivs'kiy politekhnichniy institut"*, Kharkiv : NTU "KhPI", 2013, **23**, 138-145.
9. **Grabovskiy, A. V., Tkachuk, N. A.**, **Tkachuk**, **N. N., Tanchenko**, **A. Yu., Mazur, I. V.** Chuvstvitel'nost' sobstvennykh form kolebaniy sistem s neskol'kimi stepenyami svobody k var'irovaniyu parametrov dinamicheskoy sistemy. [The sensitivity of the natural modes of systems with several degrees of freedom to variations in the parameters of the dynamic system]. *Bulletin of NTU «KhPI». Seriya: Transportnoe mashinostroenie. – Kharkiv: NTU «KhPI»*, 2015, **43**, 25 - 29.
10. **Grabovskiy, A. V.** Zavisimost' sobstvennykh chastot i sobstvennykh form kolebaniy ot inertsionno-zhestkostnykh kharakteristik sistem s konechnym chislom stepeney svobody. [The dependence of natural frequencies and natural modes of inertial stiffness characteristics of systems with a finite number of degrees of freedom]. *Bulletin of NTU «KhPI». Seriya: Novye resheniya v sovremennykh tekhnologiyakh. – Kharkiv: NTU «KhPI»*, 2015, **46**, 11
11. **Grabovskiy, A.** The effect of variable inertia-stiffness parameters on dynamic multi-mass systems. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **12** (1184), 17-22. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.03.
12. **Clough, R. W.** Dynamics of structures / **R. W. Clough, J. Penzien** // *McGraw-Hill*. – 1993. – 752 p.

Сведения об авторах (About authors)

Грабовский Андрей Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, кафедра теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: grabovskiy@tmm-sapr.org.

Andrey Grabovskiy – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, Department theory and systems of automated design of mechanisms and machines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: grabovskiy@tmm-sapr.org.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Грабовский, А. В. Определение чувствительности собственных частот и форм колебаний прямоугольной пластины к варьированию ее инерционно-жесткостных характеристик / **А. В. Грабовский** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 39-48. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.06.

Please cite this article as:

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Grabovskiy, A. Determination of the sensitivity of own frequencies and modes vibrations of a rectangular plate to the variation of its inertial stiffness characteristics. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 39-48. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.06.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Грабовський, А. В. Визначення чутливості власних частот і форм коливань прямокутної пластини до варіювання її інерційно-жорсткістних характеристик / **А. В. Грабовський** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 39-48. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.06.

АНОТАЦІЯ *У статті досліджено вплив зміни інерційно-характеристик жорсткості на зміну власних частот і власних форм коливань (переміщення і еквівалентні напруження) для прямокутної, затисненої по контуру, пластини. Показана актуальність наведеної задачі. Рішення отримано з використанням методу скінченних елементів. Показана можливість з високою точністю апроксимувати зміну власних частот, власних форм (а також положення зон пучностей і вузлів) лінійної залежністю від зміни варійованих інерційно-жорсткістних параметрів.*

Ключові слова: *Вільні коливання; динамічна система; власні частоти; власні форми коливань; чутливість*

Поступила (received) 28.02.2017

УДК 621.793.7 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.07

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАЗМОВИХ ПОРОШКОВИХ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ З ZrO_2–7%Y_2O_3 ЗА ДОПОМОГОЮ ПЕРЕДРЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

О. М. ДУБОВИЙ, А. А. КАРПЕЧЕНКО, С. І. ШКУРАТ, М. М. БОБРОВ, Є. Ю. НЕДЕЛЬКО

Кафедра матеріалознавства і технології металів, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, УКРАЇНА
**email: laborantmtm@gmail.com*

АНОТАЦІЯ *У роботі досліджена можливість підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з ZrO_2 – 7%Y_2O_3 передрекристалізаційною термічною обробкою та встановлені її оптимальні температурно-часові параметри, що забезпечують підвищення твердості на 13% та зниження теплопровідності керамічного шару на 15% у порівнянні зі станом після напилення за рахунок субструктурних змін. Проведений аналіз мікроструктури та фазового складу покриттів.*
Ключові слова: *діоксид цирконію; термічна обробка; теплопровідність; теплозахисне плазмове покриття; полігонізація*

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF INCREASING PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ZrO_2-7% Y_2O_3 PLASMA POWDER THERMAL BARRIER COATINGS BY PRE-RECRYSTALLIZATION HEAT TREATMENT

O. M. DUBOVYI, A. A. KARPECHENKO, S. I. SHKURAT, M. M. BOBROV, Ye. Yu. NEDEL'KO

Department of Material Science and technology of metals, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Mykolaiv, UKRAINE

ABSTRACT *This article discusses the problem of increasing the physical and mechanical properties of thermal barrier plasma sprayed coatings from the powder ZrO_2-7% Y_2O_3, which are widely used to protect against corrosion and to reduce gas temperature of gas turbine engine blades surface. Analyzed the current methods provide enhanced properties of these coatings and revealed the necessity of the use predrecrystallization heat treatment to solve this problem. Yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings were produced by atmospheric plasma spraying. These coatings were subjected to heat treatment in air at 1200 °C and 1300 °C from 5, 10, 15, 20, 25 and 30 min. The structural characteristics of powders and coatings were evaluated using optical microscope.*

It is found that the optimum heat treatment conditions of thermal barrier plasma sprayed coatings from the powder ZrO_2-7% Y_2O that enhances hardness by 13% and reduced the thermal conductivity of the ceramic layer is 15% compared with the state after deposition by changes substructure is heated to a temperature of 1300 ° C, aged for 15 minutes and cooling in air. The phase analyses of coatings were conducted by X-ray method. The phase analysis of the ceramic layer after heat treatment, showed the following phase content,%: monoclinic - 5; tetragonal - 25; cubic - 70. It is shown that the rapid cooling prevents phase transformation: with increasing cooling rate during heat treatment with 0.02 ° C/sec to 34 ° C/sec tetragonal phase content increased to 40% and the content of monoclinic - not fixed.
Keywords: *zirconia dioxide; heat treatment; thermal conductivity; thermal barrier plasma sprayed coating; poligonization*

Вступ

Широке поширення теплозахисних покриттів обумовлено зростанням потужності, ККД і робочої температури газотурбінних двигунів (ГТД), необхідністю захисту їх деталей від агресивного впливу високотемпературного газового потоку. Традиційне теплозахисне покриття, напилене на поверхню підкладки з жароміцного сплаву, є багатошаровою композицію: внутрішній металевий жаростійкий шар на основі сплавів типу MeCrAlY і зовнішній керамічний шар з низьким рівнем теплопровідності на основі діоксиду цирконію, частково стабілізованого оксидом ітрію ZrO_2–7%Y_2O_3 (YSZ). Використання даних покриттів на лопатках забезпечує можливість підвищення температури газового потоку і підвищує їх працездатність за рахунок зниження температури поверхні жароміцного сплаву.

Удосконалення теплозахисних покриттів необхідно для поліпшення їх службових характеристик, в першу чергу, зниження теплопровідності зовнішнього керамічного шару, що дозволить зменшити термічне навантаження на жаростійкий металевий шар та напилену деталь і підвищення терміну їх служби на деталях з жароміцних сплавів в умовах теплозмін.

© О. М. ДУБОВИЙ, А. А. КАРПЕЧЕНКО, С. І. ШКУРАТ, М. М. БОБРОВ, Є. Ю. НЕДЕЛЬКО, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нанесення багатошарових теплозахисних покриттів проводиться з використанням різних технологічних процесів: магнетронного розпилення, електронно-променевого осадження, плазмового напилення та ін. При конденсаційних методах формується шар діоксиду цирконію з чітко вираженою стовбчастою мікроструктурою, що забезпечує підвищення довговічності покриттів в умовах теплозмін [1]. Однак покриття, нанесені за допомогою атмосферного плазмового напилення, характеризуються значно нижчими показниками коефіцієнту теплопровідності (0,7…0,9 Вт/м·К), у порівнянні з конденсаційними покриттями (1,8…2 Вт/м·К), що пояснюється переважно перпендикулярним розміщенням границь між частинками (ламелями) та пор по відношенню до градієнта зміни температури [2].

Одним з напрямків поліпшення властивостей покриттів є розвиток напилюваних матеріалів, що полягає у легуванні ZrO_2 рідкоземельними оксидами. Вони забезпечують формування кластерів легуючої речовини, які, в свою чергу, знижують питому теплопровідність, однак їх вміст негативно позначається на термоциклічній довговічності покриття [3].

Подальшого підвищення функціональних властивостей напилених покриттів можна досягти наноструктуруванням. Відомо [4], що наноструктуровані YSZ покриття мають теплопровідність на 40 % нижче та характеризуються підвищеною термоциклічною довговічністю. Подача ультрадисперсних порошків до плазмового струменя здійснюється у вигляді агломератів [5] або суспензії [6], що пов'язано з трудомісткою підготовкою напилюваних матеріалів та додатковою конструктивною модернізацією обладнання.

Розроблено спосіб деформаційно-термічної обробки (передрекристалізаційна термічна обробка) напилених покриттів із металів та сплавів при температурі близькій до температурного порогу рекристалізації [7], що забезпечує підвищення твердості на 30…70% та зниження теплопровідності на 30%. Однак відсутні дослідження щодо впливу згаданої термічної обробки на фізико-механічні властивості теплозахисних покриттів з ZrO_2–$7\%Y_2O_3$, що найбільш поширені у газотурбобудуванні.

Мета роботи

Дослідження можливості підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з ZrO_2–$7\%Y_2O_3$ передрекристалізаційною термічною обробкою.

Виклад основного матеріалу

У роботі в якості підкладки під нанесення плазмового теплозахисного покриття використовували нікелевий жароміцний сплав. Для підготовки поверхні зразків, безпосередньо перед напиленням, використовували установку струменево-абразивної обробки марки 026-7 «Ремдеталь». Ситову класифікацію застосовуваних порошків проводили на лабораторній установці модель 029, використовуючи сітку номерів 004 і 008. У результаті просівання виділено порошки фракції 40…80 мкм.

Порошок сплаву Co-Cr-Al-Y-Si перед напиленням нагрівали у сушильній шафі ШСВ 3,5.3,5.6/3,5 при температурі 150 °С протягом 5 годин. Керамічний порошок ZrO_2–$7\%Y_2O_3$ марки ЦрОИ-7 висушували в лабораторній електричній печі типу СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1 при температурі 700 °С протягом 5 годин.

Вагу порошків для отримання механічної суміші здійснювали на лабораторних вагах загального призначення, що забезпечують зважування з похибкою не більше 0,05 г за ДСТУ 7270: 2012. В результаті отримана механічна порошкова суміш, що складається з 90% (мас.) Co-Cr-Al-Y-Si і 10% (мас.) ZrO_2–7% Y_2O_3.

Напилення на підкладку теплозахисного градієнтного покриття здійснювали в три етапи:

1. Напилення підшару з порошку Co-Cr-Al-Y-Si;

2. Нанесення проміжного шару з порошкової механічної суміші Co-Cr-Al-Y-Si + 10% (мас.) ZrO_2–7% Y_2O_3;

3. Напилення керамічного шару з порошку ZrO_2 – 7% Y_2O_3 (близько 0,3 мм).

Напилення підшару Co-Cr-Al-Y-Si і проміжного шару Co-Cr-Al-Y-Si + 10% (мас.) ZrO_2–7% Y_2O_3 здійснювалося у режимі, близькому до зазначеного у роботі [8].

Безпосередньо після нанесення підшару і проміжного шару заданої товщини напилювали керамічний шар з ZrO_2–7% Y_2O_3 у наступному режимі:

Сила струму, А…….305
Напруга, В…….……115
Плазмотвірний газ……...аргон
Тиск плазмотвірного газу, МПа…..0,15
Транспортуючий газ…….стиснене повітря
Дистанція напилення, мм ……80

Середня величина деформації частинок керамічного шару складала 70…80%.

Для поліпшення властивостей, спікання кераміки і зниження внутрішніх напружень, що виникли у процесі формування теплозахисних градієнтних плазмових покриттів, проводили додатково термічну обробку. Термічну обробку за прийнятою технологією здійснювали у вакуумній печі радіаційного нагрівання СНО-1-3-1/16Н1 у наступних режимах: вакуум $2 \cdot 10^{-2}$ Па; температура витримки

1050 ± 5 °С; час витримки 2 години; охолодження разом з піччю у вакуумі до температури навколишнього середовища зі швидкістю ≈0,02 °С/с.

Фазовий аналіз керамічного шару після термічної обробки, здійснений на дифрактометрі ДРОН-3 показав наступний вміст фаз, %: моноклінної – 5; тетрагональної – 25; кубічної – 70. Відомо, наприклад [9], що довговічність покриття визначається перед усім вмістом тетрагональної фази і підвищується зі збільшенням останньої. Нами встановлено, що при збільшенні швидкості охолодження при термічній обробці з 0,02 °С/с до 34 °С/с вміст тетрагональної фази підвищуються до 40%, а вміст моноклінної – не фіксується.

Для визначення режиму передрекристалізаційної обробки треба, хоча б приблизно, знати величину температурного порогу рекристалізації. Температурний поріг рекристалізації ZrO_2–7% Y_2O_3 за різними джерелами лежить у діапазоні від 1000 °С до 1400 °С [10]. У якості джерела нагрівання застосовували карбідкремнієвий нагрівач типу КЕНА – ВТ з робочою температурою на поверхні нагрівача до 1450 °С. Для контролю температури використовували ППТ термопару тип S (платина - 10% родій/платина).

Мікротвердість *Hμ* визначалася на приладі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 200 г. Знімки мікроструктур отримували за допомогою цифрової камери *Delta Optical HDCE-20C*, що укомплектована програмним забезпеченням для обробки зображень *Scope Image* 9.0, на оптичному металографічному мікроскопі ММУ-3. Пористість визначали за допомогою металографії планіметричним методом. Дослідження теплопровідності покриттів проводили за допомогою вимірювача ИТ-λ-400, похибка вимірювань якого становить ±10%.

Обговорення результатів

Вибір оптимальних температурно-часових параметрів, які забезпечують максимальну твердість після напилення, передрекристалізаційної термічної обробки покриттів здійснювали за показниками мікротвердості. Попередні дослідження проводили при нагріванні до 1100 °С з витримкою 10, 20, 30 хв і швидкістю охолодження 34 °С/с. Ефекту зміцнення при цьому не зафіксовано, тому у подальшому застосовували вищі показники температури.

Результати впливу тривалості витримки на мікротвердість покриттів при температурі 1200 °С та 1300 °С з охолодженням до кімнатної температури зі швидкістю 34 °С/с представлені на рис. 1. Нагрівання до більш високих температур не застосовують через імовірність підплавлення границь зерен металевих сплавів. У відповідності до діаграми стану системи ZrO_2–Y_2O_3 [11] фазові перетворення у кераміці складу ZrO_2–(6-8)% Y_2O_3 відбуваються в інтервалі температур 600 – 800 °С за евтектоїдним механізмом – тетрагональна модифікація при охолодженні розпадається на моноклінну і кубічну. Такі ж висновки можна зробити при аналізі діаграми, яка наведена в роботі [12]. Авторами робіт [13,14] вказано, що швидкість евтектоїдного перетворення в системі ZrO_2–Y_2O_3 досить низька і прискорене охолодження дозволяє його уникнути. Крім цього, фазові перетворення в системі ZrO_2–Y_2O_3 здійснюється зі значним температурним гістерезисом. Мікротвердість керамічного шару після напилення склала 11,5 ГПа.

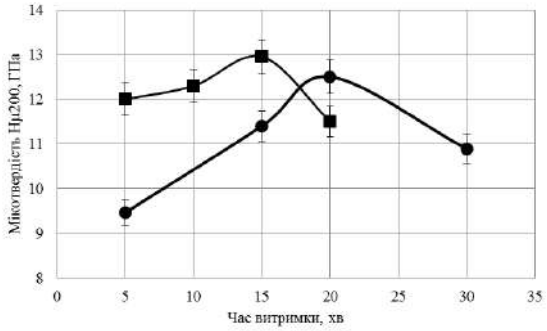
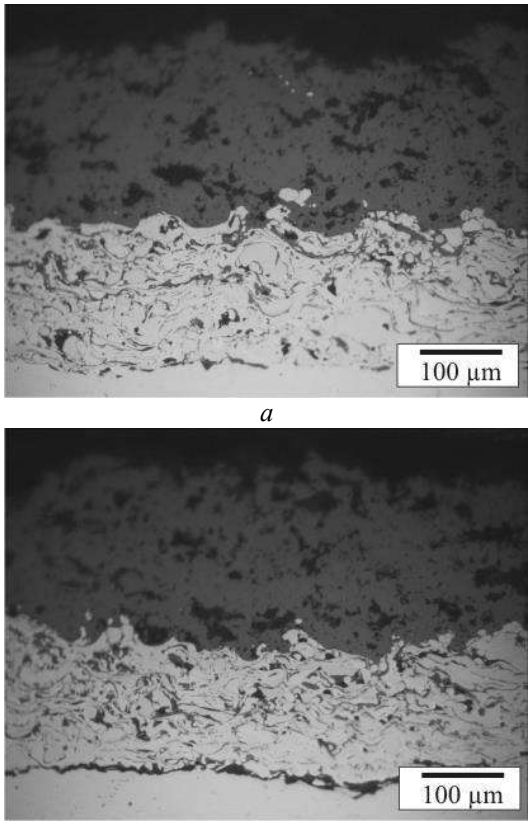


Рис. 1 - Залежність мікротвердості плазмових теплозахисних покриттів з ZrO_2+7% Y_2O_3 від тривалості витримки при передрекристалізаційній термічній обробці:
● – температура 1200 °С; ■ – температура 1300 °С

Згідно з представленими даними встановлено, що залежність носить екстремальний характер з виразним максимумом, при цьому відповідну температуру і витримку можна вважати оптимальними. Значення мікротвердості керамічного шару підвищується після передрекристалізаційної термічної обробки при температурі 1200 °С і витримці 20 хв на 10%, при температурі 1300 °С, витримці 15 хв – 13%. Отже, при підвищенні температури точка максимального зміцнення зміщується у діапазон менших витримок, що пов'язано, можливо, зі збільшенням швидкості полігонізаційних процесів за рахунок термічної активації.

Представлені мікроструктури теплозахисного плазмового градієнтного покриття (рис. 2) складаються з трьох послідовно напилених шарів: перший підшар - Co-Cr-Al-Y-Si товщина якого становить 110 мкм; другий (проміжний) шар - механічна суміш Co-Cr-Al-Y-Si + 10% (мас.) ZrO_2 – 7% Y_2O_3 товщиною 90 мкм; третій шар - ZrO_2 – 7% Y_2O_3 товщиною 280 мкм. Підшар і проміжний шари слабо диференціюються, мають лускату будову, що пов'язано з достатнім проплавленням металевої складової покриття. У проміжному шарі проглядається сіра фаза ZrO_2 – 7% Y_2O_3. Пористість керамічного шару у обох випадках складає близько 10%. Величина деформації керамічних частинок складає 76%.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)



а

б

Рис. 2 - Мікроструктури теплозахисного градієнтного покриття:
а – після напилення; б – після оптимальної передрекристалізаційної термічної обробки

Порівняльний аналіз мікроструктур показав, що змін у структурі покриттів до і після термообробки не спостерігається. Це свідчить про те, що зміцнювальний ефект забезпечують структурні елементи, розмір яких менший за 0,5 мкм, що пояснюється роздільною здатністю людського ока та оптичного мікроскопу.

Для визначення теплопровідності виготовляли зразки лише керамічного шару без підкладки та проміжних шарів товщиною 0,5…0,8 мм діаметром 15 мм. Температура випробувань – 25 °С. Результати досліджень наведені на рис. 3.

Аналіз приведених результатів показує, що передрекристалізаційна термічна обробка забезпечує зниження коефіцієнта теплопровідності на 15 %. Оскільки пористість покриття не змінилася при термічній обробці (рис. 2), то дане зниження теплопровідності забезпечується лише за рахунок субструктурних змін.

Таким чином, перспективи подальшого розвитку досліджень полягають у детальному вивчені впливу вказаної термічної обробки на субструктуру теплозахисних покриттів з ZrO_2–7%Y_2O_3 із застосуванням методів рентгенофазового та рентгеноструктурного аналізу.

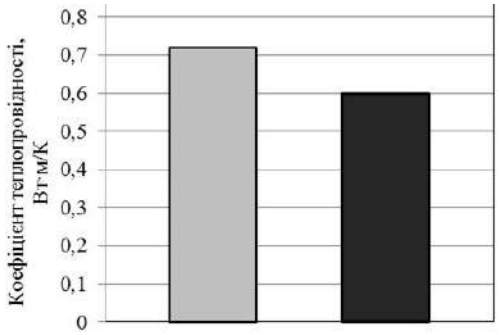


Рис. 3 - Результати визначення коефіцієнта теплопровідності плазмових теплозахисних покриттів з ZrO_2 – 7% Y_2O_3:
□ – після напилення, ■ – після оптимальної передрекристалізаційної термічної обробки

Висновки

1. Експериментально підтверджена можливість підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з ZrO_2 – 7%Y_2O_3 передрекристалізаційною термічною обробкою.

2. Визначений оптимальний режим передрекристалізаційної термічної обробки теплозахисного градієнтного плазмового покриття з ZrO_2 – 7%Y_2O_3 що забезпечує підвищення твердості на 13% та зниження теплопровідності керамічного шару на 15% у порівнянні зі станом після напилення за рахунок субструктурних змін. Режим полягає у нагріванні до температури 1300 °С, витримці протягом 15 хв та охолодженні на повітрі.

Список літератури

1. **Яковчук, К. Ю.** Теплопроводность и термоциклическая долговечность конденсационных термобарьерных покрытий / **К. Ю. Яковчук** // *Автоматическая сварка* - 2014. - № 4. – С. 25 – 31.
2. **Schulz, U.** Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings / **U. Schulz, C. Leyens, K. Fritscher et al.** // *Aerosp. Sci. Technol.* – 2003.- № 7. – P.73. doi: 10.1016/S1270-9638(02)00003-2
3. **Zhong, X**. Thermal shock behaviour of toughened gadolinium zirconate/YSZ double-layered thermal barrier coating / **X. Zhong, H. Zhao, X. Zhou et al.** // *J. of alloy and compounds*. – 2014. – № 593. – P. 50 – 55. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.01.060
4. **Jing, W**. Microstructure and thermal properties of plasma sprayed thermal barrier coatings from nanostructured YSZ / **W. Jing, G. Hong, Z. Le, L. Wang, G. Sheng** // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2010. – № 19 (6). – P. 1186 – 1194. doi: 10.1007/s11666-010-9535-7
5. **Diez, P**. The influence of powder agglomeration methods on plasma sprayed yttria coatings / **P. Diez, R.W. Smith** // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 1993. – № 2 (2). – P. 165 – 172. doi: 10.1007/BF02652025
6. **Tingaud, O**. Al_2O_3-ZrO_2 finely structured multilayer architectures from suspension plasma spraying / **O. Tingaud, A. Denoirjean, J-F. Coudert, P. Fauchais** //

Journal of Thermal Spray Technology. – 2010. – № 19. – P. 207 – 218. doi: 10.1007/s11666-009-9436-9
7. Пат. 88755 Україна, МПК C 23 C 4/18. Спосіб нанесення покриттів / **О. М. Дубовий, Т. А. Янковець, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов**; заявник и патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № a 2009 02658, заявл. 23.03.2009; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21.
8. **Борисов, Ю. С.** Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник / **Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко и др.** // К.: «Наукова думка», 1987. – 544 с.
9. **Ивашко, В. С.** Технологические возможности плазменного напыления теплозащитных покрытий / **В. С. Ивашко, А. А. Верстак, А. Ф. Ильюшенко** // *Газотермические и вакуумные покрытия в энергетике и двигателестроении: Сб. науч. трудов Ин-т электросварки им. Е. О. Патона*. – 1989. – С. 33 – 42.
10. **Канаки, А. В.** Особенности структуры и фазового состава порошков системы ZrO_2-MgO / **А. В. Канаки, С. П. Буякова, С. Н. Кульков** // *Известия высших учебных заведений*. – 2013. - № 7/2. – С. 251 – 255.
11. **Tetsuo, N.** The liquidus curve of the ZrO_2-Y_2O_3 system as measured by a solar furnace / **N. Tetsuo, M. Massao, T. Yamrada** // *Bulletin of Chemical Society of Japan*. – 1970. – V 43. – P. 2614 – 2616. doi: 10.1246/bcsj.43.2614
12. **Горелов, В.** Фазовая диаграмма систем ZrO_2-Y_2O_3 в области малых содержаний оксида иттрия / **В.П. Горелов** // *Тр. Ин-та электрохимии УНЦ АН СССР*. - 1978. – № 28. – С. 69 – 75.
13. **Глушкова, В.** Исследование особенностей твердых растворов в системе ZrO_2-Y_2O_3 в монокристаллическом состоянии / **В.Б. Глушкова, В. В. Осико, Л. Г. Щербакова. и др.** // *Изв. АН СССР. Неорг. мат*. – 1977. Т 13. – № 12. – С. 2197 – 2201.
14. **Портной, К.** Синтез и исследование свойств сложные окислов редкоземельных элементов и циркония / **К.И. Портной, Н. И. Тимофеева, С. Е. Салибеков. и др.** // *Изв. АН СССР. Неорг. мат*. – 1972. Т 8. – № 2. – С. 406 – 408.

Bibliography (transliterated)

1. **Yakovchuk, K. Yu.** Teploprovodnost i termotsiklicheskaya dolgovechnost kondensatsionnyih termobarernyih pokryitiy [Thermal conductivity and durability thermocyclic condensing of thermal barrier coating], *Avtomaticheskaya svarka [Automatic welding]*, 2014, **4**, 25-31.
2. **U. Schulz**, Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings, *Aerosp. Sci. Technol.* **7**, 2003, 73. doi: 10.1016/S1270-9638(02)00003-2
3. **Zhong, X.** Thermal shock behaviour of toughened gadolinium zirconate/YSZ double-layered thermal barrier coating, *J. of alloy and compounds*, 2014, **593**, 50 – 55. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.01.060
4. **Jing W.** Microstructure and thermal properties of plasma sprayed thermal barrier coatings from nanostructured YSZ, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, **19**, 1186 – 1194. doi: 10.1007/s11666-010-9535-7
5. **Diez P.** The influence of powder agglomeration methods on plasma sprayed yttria coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, 1993, **2**, 165 – 172. doi: 10.1007/BF02652025
6. **Tingaud, O.** Al_2O_3-ZrO_2 finely structured multilayer architectures from suspension plasma spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, **19**, 207 – 218. doi: 10.1007/s11666-009-9436-9
7. **Dubovyy O. M., Yankovets' T. A., Karpechenko A. A., Zhdanov O. O.** Patent. Sposib nanesennya pokryttiv [Method of spraying coating], 2009,21.
8. **Borisov, Yu. S., Harlamov, Yu. A., Sidorenk, S. L.** Gazotermicheskie pokryitiya iz poroshkovyih materialov. Spravochnik [Thermal spray coating material powder. Directory]. Kyiv. «Scientific thought», 1987, 544.
9. **Ivashko, V. S., Verstak, A. A.,. Ilyushenko A. F** Tehnologicheskie vozmozhnosti plazmennogo napyileniya teplozaschitnyih pokryitiy [Technological capabilities of plasma spraying thermal barrier coatings], *Gazotermicheskie i vakuumnyie pokryitiya v energetike i dvigatelestroeni [Thermal and vacuum coating power and propulsion engineering]*, 1989, **33** – 42.
10. **Kanaki, A. V., Buyakova S. P., Kulkov S. N.** Osobennosti strukturyi i fazovogo sostava poroshkov sistemyi ZrO2-MgO [Features of the structure and phase composition of the powder system ZrO_2-MgO], *Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy [News of Higher Schools]*, 2013, **7/2**, 251-255.
11. **Tetsuo, N., Massao M., Yamrada T.** The liquidus curve of the ZrO_2-Y_2O_3 system as measured by a solar furnace, *Bulletin of Chemical Society of Japan*, 1970, **43**, 2614 – 2616. doi: 10.1246/bcsj.43.2614
12. **Gorelov, V. P.** Fazovaya diagramma sistem ZrO_2-Y_2O_3 v oblasti malyih soderzhaniy oksida ittriya [Phase diagram of ZrO_2-Y_2O_3 systems in the region of small yttrium oxide content] *Tr. In-ta elektrohimii UNTs AN SSSR [Proceedings of the Institute of Electrochemistry UNTs AN SSSR]*, 1978, **28**, 69-75.
13. **Glushkova, V. B., Osiko V. V., Scherbakova L. G.** Issledovanie osobennostey tverdyih rastvorov v sisteme ZrO_2-Y_2O_3 v monokristallicheskom sostoyanii [Investigation of the features of solid solutions in the ZrO_2-Y_2O_3 system in a single-crystal state] *Izv. AN SSSR. Neorg. mat. [News of AN SSSR. Inorganic materials]*, 1977, **12**, 2197-2201.
14. **Portnoy, K. I., Timofeeva N. I., Salibekov S. E.** Sintez i issledovanie svoystv slozhnyie okislov redkozemelnyih elementov i tsirkoniya [Synthesis and study of the properties of complex oxides of rare-earth elements and zirconium] *Neorg. mat. [News of AN SSSR. Inorganic materials]*, 1972, **2**, 406-408.
.

Відомості про авторів (About authors)

Дубовий Олександр Миколайович **–** доктор технічних наук, професор, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, завідувач кафедрою матеріалознавства і технології металів, м. Миколаїв, Україна; e-mail: oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua.

Oleksandr Mykolayovych Dubovyy – Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Head of Department Material science and technology of metals, Mykolaiv, Ukraine; e-mail: oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Карпеченко Антон Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, доцент кафедри матеріалознавства і технології металів, м. Миколаїв, Україна; e-mail: karpechenkoanton@gmail.com.

Anton Anatoliyovych Karpechenko – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Docent, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Docent of Department Material science and technology of metals, Mykolaiv, Ukraine; e-mail: karpechenkoanton@gmail.com.

Шкурат Сергій Іванович – кандидат хімічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, доцент кафедри матеріалознавства і технології металів, м. Миколаїв, Україна.

Serhiy Ivanovych Shkurat - Candidate of Chemical Sciences (Ph.D.), Docent, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Docent of Department Material science and technology of metals, Mykolaiv, Ukraine.

Бобров Максим Миколайович – кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна; e-mail: laborantmtm@gmail.com.

Maksim Mikolayovich Bobrov - Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Scientific Associate, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Mykolaiv, Ukraine; e-mail: laborantmtm@gmail.com.

Неделько Євгеній Юрійович - Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, інженер, м. Миколаїв, Україна; e-mail: ynedelko76@gmail.com.

Yevheniy Yuriyovyc Nedel'ko - National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, engineer, Mykolaiv, Ukraine; e-mail: ynedelko76@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Дубовий, О. М. Дослідження можливості підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з ZrO_2–7%Y_2O_3 передрекристалізаційною термічною обробкою / **О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, С. І. Шкурат, М. М. Бобров, Є. Ю. Неделько** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 49-54. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.07.

Please cite this article as:

Dubovyy, O., Karpechenko, A., Shkurat, S., Bobrov, M., Nedel'ko, Ye. Investigation possibilities of increase physical and mechanical properties of plasma powder thermal barrier coatings ZrO_2-7% Y_2O_3 by predrecrystallization heat treatment *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 49-54, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.07.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Дубовой, А. Н. Исследование возможности повышения физико-механических свойств плазменных порошковых теплозащитных покрытий из ZrO_2–7%Y_2O_3 предрекристаллизационной термической обработкой / **А. Н. Дубовой, А. А. Карпеченко, С. И. Шкурат, М. Н. Бобров, Е. Ю. Неделько** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – 7 (1229). – С. 49-54. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.07.

АННОТАЦИЯ В *работе исследована возможность повышения физико-механических свойств плазменных порошковых теплозащитных покрытий из ZrO_2-7%Y_2O_3 предрекристаллизационной термической обработкой и установлены ее оптимальные температурно-временные параметры, обеспечивающее повышение твердости на 13% и снижение теплопроводности керамического слоя на 15% по сравнению с состоянием после напыления за счет субструктурных изменений. Проведенный анализ микроструктуры и фазового состава покрытий.*

Ключевые слова: *диоксид циркония; термическая обработка; теплопроводность; теплозащитное плазменное покрытие; полигонизация*

Надійшла (received) 28.02.2017

УДК 004.942 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.08

ЗАСТОСУВАННЯ CAD-СИСТЕМ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИХ ЗАДАЧ З ВРАХУВАННЯМ ІЗОТРОПНОГО ЗМІЦНЕННЯ

А. Я. КАРВАЦЬКИЙ[1*], Т. В. ЛАЗАРЄВ[2], С. В. ЛЕЛЕКА[2], А. Ю. ПЕДЧЕНКО[2]

[1] кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, УКРАЇНА
[2] НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, УКРАЇНА
[*]email: admin@rst.kpi.ua

АНОТАЦІЯ *На базі методу скінченних елементів розроблено числові методики для розв'язання нелінійної пружно-пластичної задачі з врахуванням ізотропного зміцнення за двома алгоритмами. Програмна реалізація числової методики виконана на мові програмування CAD-системи Mathcad та базується на програмному коді для розв'язання тривимірних задач статичної пружності. За допомогою розробленого програмного забезпечення отримано результати числових експериментів під час навантаження внутрішнім тиском товстостінного сталевого циліндра та виконано їх зіставлення з даними числового аналізу, одержаного з використанням програмних продуктів ANSYS Mechanical APDL. Встановлено, що максимальне значення похибки визначення фізичних полів не перевищує 3,62 %за алгоритмом 1 і 1,11 %– за алгоритмом 2.*
Ключові слова: *скінченний елемент; ізотропне зміцнення; пружно-пластична задача; білінійний закон; Mathcad*

CAD-SYSTEMS APPLICATION FOR SOLVING THE ELASTOPLASTIC PROBLEMS WITH ISOTROPIC HARDENING

A. KARVATSKII[1], T. LAZARIEV[2], S. LELEKA[2], A. PEDCHENKON[2]

[1] Research center "Resource-saving technologies", Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kiev, UKRAINE
[2] Department of chemical, polymer and silicate engineering, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kiev, UKRAINE

ABSTRACT *The modern analysis of the scientific publications shows that sometimes the works which are dedicated to the numerical methods of solving the nonlinear elastoplastic problems lack the detailed algorithm description, intermediate calculations helping to obtain the main correlations and formulas. It complicates the coherence and the process of the appropriate program codes development. The given paper is considered as an attempt to solve these issues taking the elastoplastic problems with isotropic hardening as an example. The work is aimed to develop the numerical methodologies using 2 algorithm approaches when solving the nonlinear elastoplastic problem with isotropic hardening. The methodologies are based on the finite elements method. The formulated mathematical model of the elastoplastic problem is based on the mechanical motion balance equation in the incremental formulation using the mechanical model for the material with isotropic hardening according to bilinear law. The used step by step algorithm is based on the elastoplastic dependence between stress and deformation. The algorithm fulfills the condition of finding the intermediate solutions of the problem. The used reverse incremental algorithm is based on the usage of stress in order to find the equivalent plastic deformations using the reverse Euler's method. The numerical model is realized using the programming language of the CAD-system Mathcad and is based on the programming code for solving 3-dimensional problems of the static pressure. The results of the numerical experiments were compared with the application of the designed software with the data analysis obtained with the usage of the programming products of ANSYS Mechanical APDL. The comparison showed violation in the physical fields up to 3,62 % for the algorithm 1 and 1,11 % for the algorithm 2.*
Keywords*: finite element; isotropic hardening; elastic-plastic problem; bilinear law; Mathcad*

Вступ

Аналіз публікацій показує, що в розглянутих роботах, присвячених числовим методам розв'язання нелінійних пружно-пластичних задач [1–7], інколи бракує детального опису алгоритмів, проміжних викладок для отримання основних співвідношень та формул, що ускладнює їх однозначне розуміння та є особливо важливим під час розробки відповідних програмних кодів.

Дана стаття може розглядатися як певна спроба в деякій мірі вирішити вказані проблеми на прикладі розв'язання задачі пластичності з ізотропним зміцненням.

Ціль роботи

Розробити на основі методу скінченних елементів числові методики, що дають змогу використовувати різні алгоритмічні підходи під час розв'язання пружно-пластичних задач з врахуванням ізотропного зміцнення матеріалу. Провести зіставлення результатів числових експериментів, виконаних на базі розробленого авторського програмного забезпечення, з даними числового аналізу, виконаного з використанням апробованих програмних продуктів.

© А. Я. КАРВАЦЬКИЙ, Т. В. ЛАЗАРЄВ, С. В. ЛЕЛЕКА, А. Ю. ПЕДЧЕНКО, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Виклад основного матеріалу

Математична модель пружно-пластичної задачі базується на рівнянні рівноваги механічного руху в інкрементальній формі з використанням механічної моделі для матеріалу з ізотропним зміцненням за білінійним законом [3–9]

$$\nabla \cdot \dot{\boldsymbol{\sigma}} + \dot{\mathbf{f}} = 0, \qquad (1)$$

де ∇ – оператор Гамільтона, м$^{-1}$; $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$ –симетричний тензор прирощення напруження 2-го рангу, Па; $\dot{\mathbf{f}}$ –вектор прирощення об'ємних сил, Н/м^3.

Згідно з інкрементальною теорією пластичності прирощення непружних пластичних деформацій $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}$ розглядаються як початкові [3, 8]. Тоді тензор прирощення напруження $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$ (1) виражається законом Гука, записаним через тензор прирощення повних деформацій $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ і тензор прирощення початкового напруження $\dot{\boldsymbol{\sigma}}^0$

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = 2G\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \frac{2G\nu}{1-2\nu}\mathrm{tr}\left(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}\right)\mathbf{I} - \dot{\boldsymbol{\sigma}}^0, \qquad (2)$$

де $\dot{\boldsymbol{\sigma}}^0 = 2G\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} + \frac{2G\nu}{1-2\nu}\mathrm{tr}\left(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}\right)\mathbf{I}$ – симетричний тензор прирощення початкових напружень, Па; $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2}\left(\nabla\dot{\mathbf{u}} + \dot{\mathbf{u}}\nabla\right) = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{el} + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}$ – симетричний тензор прирощення повних деформацій; $\dot{\mathbf{u}}$ – вектор прирощення переміщень, м; $\mathrm{tr}\left(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}\right) = \dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{33}$ – слід тензора прирощення деформацій; $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{el}, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}$ – пружна і пластична складові тензора прирощення повних деформацій, відповідно; $G = \frac{E}{2\left(1+\nu\right)}$ – пружний модуль зсуву, Па; E – модуль пружності під час одновісного розтягу, Па; ν – коефіцієнт Пуассона; $\mathbf{I}$ – одиничний тензор другого рангу.

У разі ізотропного зміцнення умову текучості матеріалу можна записати таким чином [3–8]

$$F\left(\boldsymbol{\sigma}, \varepsilon_{eq}^{pl}\right) = f\left(\boldsymbol{\sigma}\right) - \sigma_y\left(\varepsilon_{eq}^{pl}\right), \qquad (3)$$

де F – функція поверхні текучості матеріалу; $f\left(\boldsymbol{\sigma}\right)$ – скалярна функція тензора напруження $\boldsymbol{\sigma}$, яка для випадків ізотропного зміцнення та ідеальної пластичності являє собою еквівалентне напруження за Мізесом $\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2}\mathbf{S}:\mathbf{S}}$; $\mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} - \frac{1}{3}\mathrm{tr}\left(\boldsymbol{\sigma}\right)$ – тензор девіаторних напружень, Па; $(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку тензорів; $\sigma_y\left(\varepsilon_{eq}^{pl}\right) = \sigma_{y0} + h\varepsilon_{eq}^{pl}$ – границя текучості матеріалу, в якій враховується ізотропне зміцнення за лінійним законом, Па; $\varepsilon_{eq}^{pl} = \frac{1}{1+\nu}\sqrt{\frac{2}{3}\boldsymbol{\varepsilon}^{pl}:\boldsymbol{\varepsilon}^{pl}}$ – еквівалентна деформація за Мізесом; σ_{y0} – початкове значення границі текучості матеріалу, Па; h –модуль зміцнення, Па.

У разі виконання рівності $\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}}$, закон пластичної течії вважається асоціативним.

Початкові умови для (1)–(3):

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} = 0; \\ \dot{\boldsymbol{\sigma}}^{0} = 0. \end{cases} \qquad (4)$$

Граничні умови для (1)–(3):

– прирощення вектора переміщення

$$\dot{\mathbf{u}}\big|_{S_u} = 0, \qquad (5)$$

де S_u – поверхня (або точка поверхні), на якій задано переміщення, м^2;

– симетрії

$$\mathbf{n}\cdot\mathbf{u}\big|_{S_{su}} = 0, \qquad (6)$$

де $\mathbf{n}$ – вектор зовнішньої нормалі до поверхні тіла; S_{su} – поверхня симетрії тіла, м^2;

– зовнішній тиск

$$\left(\hat{\sigma}\cdot\mathbf{n}\right)\cdot\mathbf{n}\big|_{S_p} = p, \qquad (7)$$

де p –зовнішній тиск, який задано на поверхні S_p, Па;

– зовнішня сила, що прикладена в деякій точці тіла

$$\mathbf{F}_P = \int\limits_{\Delta S_p} \hat{\boldsymbol{\sigma}}\cdot\mathbf{n}dS, \qquad (8)$$

де $\mathbf{F}_P$ – вектор зовнішньої сили в точці P, Н; ΔS_p – елементарна площадка поверхні тіла в околі точки P, м^2.

Система рівнянь (1)–(8) є повним математичним формулюванням пружно-пластичної задачі з врахуванням ізотропного зміцнення матеріалу.

Для розв'язання задачі (1)–(8) скористаємося методом скінченних елементів (МСЕ). Розглянемо два алгоритми розв'язання задачі пружно-пластичності [3–9], їх програмну реалізацію та виконаємо порівняння отриманих результатів з іншими числовими розв'язками [11].

Покроковий алгоритм1 [6, 7], що базується на пружно-пластичній залежності між напруженнями і деформаціями, в якому передбачається виконання

умови про знаходження проміжних розв'язків задачі в околі поверхні текучості.

Розглянемо основні співвідношення МСЕ, що стосуються алгоритму 1 і частково алгоритму 2,які записано з використанням одноіндексної форми тензорів, характерної для МСЕ:

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}; \quad (9)$$

$$\mathbf{K}\dot{\mathbf{u}} = \beta\dot{\mathbf{F}}; \quad (10)$$

$$\mathbf{K}\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{f}_{\dot{\sigma}^0}; \quad (11)$$

$$\left\{\varepsilon^{el}\right\} = \left[B\right]\left\{u\right\}; \quad (12)$$

$$\left\{\sigma^{el}\right\} = \left[D^{el}\right]\left\{\varepsilon^{el}\right\}; \quad (13)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\begin{matrix}\left(\sigma_1-\sigma_2\right)^2+\left(\sigma_2-\sigma_3\right)^2+\\+\left(\sigma_3-\sigma_1\right)^2+6\left(\sigma_4^2+\sigma_5^2+\sigma_6^2\right)\end{matrix}}; \quad (14)$$

$$\left\{\dot{\varepsilon}^{el}\right\} = \left[B\right]\left\{\dot{u}\right\}; \quad (15)$$

$$\left\{\dot{\sigma}^{el}\right\} = \left[D^{el}\right]\left\{\dot{\varepsilon}^{el}\right\}; \quad (16)$$

$$\left\{\dot{\sigma}^{ep}\right\} = \left[D^{ep}\right]\left\{\dot{\varepsilon}^{el}\right\}; \quad (17)$$

$$\left\{\dot{\varepsilon}^{pl}\right\} = \gamma\left\{\frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}}\right\}\left\{\frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}}\right\}^T\left[D^{el}\right]\left\{\dot{\varepsilon}^{el}\right\}; \quad (18)$$

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}(1+\nu)}\sqrt{\begin{matrix}\left(\varepsilon_1-\varepsilon_2\right)^2+\left(\varepsilon_2-\varepsilon_3\right)^2+\\+\left(\varepsilon_3-\varepsilon_1\right)^2+\frac{3}{2}\left(\varepsilon_4^2+\varepsilon_5^2+\varepsilon_6^2\right)\end{matrix}}; \quad (19)$$

$$\sigma_y = \sigma_{0y} + h\varepsilon_{eq}^{pl}, \quad (20)$$

де $\mathbf{K} = \sum_{e=1}^{E}\left[k^{(e)}\right]$ – матриця системи лінійних алгебричних рівнянь (СЛАР) МСЕ; (e) – індекс скінченних елементів (СЕ); E – кількість СЕ, на які дискретизована розрахункова область Ω; $\left[k^{(e)}\right]$ – матриця жорсткості СЕ; $\mathbf{F} = \sum_{e=1}^{E}\left\{f^{(e)}\right\}$ – вектор вільних членів СЛАР; β – коефіцієнт прирощення навантаження; $\mathbf{f}_{\dot{\sigma}^0} = \sum_{e=1}^{E}\int_{V^{(e)}}\left[B^{(e)}\right]^T\left\{\dot{\sigma}^0\right\}dV$ – вектор вільних членів СЛАР, пов'язаний з початковими напруженнями в СЕ; $V^{(e)}$ – об'єм СЕ; $\left[B^{(e)}\right] = \left[B\right]$ – матриця градієнтів СЕ; $\left\{\dot{\varepsilon}^{pl}\right\}$ – тензор прирощення пластичних деформацій СЕ; $\left\{\varepsilon^{el}\right\}$ – тензор пружних деформацій СЕ; $\{u\}$ – вектор вузлових переміщень СЕ; $\left\{\dot{\sigma}^{el}\right\}$ – тензор прирощення пружних напружень СЕ; $\left[D^{el}\right]$ – матриця пружних констант СЕ (в загальному випадку це тензор четвертого рангу); σ_{eq} – еквівалентне напруження за Мізесом СЕ; $\left\{\dot{\sigma}^{ep}\right\}$ – тензор прирощення істинних напружень в пружно-пластичних СЕ; $\left[D^{ep}\right] = \left[D^{el}\right] - \gamma\left[D^{el}\right]\left\{\frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}}\right\}\left\{\frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}}\right\}^T\left[D^{el}\right]$ – матриця пружно-пластичних властивостей СЕ; $\gamma = \left[h + \left\{\frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}}\right\}\left[D^{el}\right]\left\{\frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}}\right\}^T\right]^{-1}$; $\left\{\frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}}\right\} = \left\{\frac{\partial f}{\partial\{\sigma\}}\right\} = \frac{3}{2}\frac{\{S\}}{\sigma_{eq}}$ – похідна за тензором напруження від функції поверхні текучості або градієнт функції пластичності, який є перпендикуляром до поверхні пластичності в точці з тензором напруження $\boldsymbol{\sigma}$; $\{S\}$ – тензор девіаторних напружень СЕ; $\left\{\dot{\varepsilon}^{el}\right\}$ – тензор прирощення пружних деформацій СЕ; $\{\dot{u}\}$ – вектор прирощення вузлових переміщень СЕ.

Послідовність дій за алгоритмом 1.

1. Розв'язується лінійна пружна задача за умови повного силового навантаження (9) [3, 8] і знаходяться вектори переміщення у вузлах СЕ $\{u\}$ за нульових початкових напружень $\left\{\dot{\sigma}^0\right\} = 0$. Далі визначаються тензори пружних деформацій $\left\{\varepsilon^{el}\right\}$ і напружень $\left\{\sigma^{el}\right\}$ в СЕ за формулами (12), (13), відповідно. Визначаються еквівалентні напруження за Мізесом σ_{eq} (14) і обчислюється масштабний множник $\lambda_0 = \sigma_y / \sigma_{eq,\max}$ (де $\sigma_{eq,\max}$ – максимальне значення, $\sigma_y = \sigma_{y0}$ – початкове значення границі текучості за умови, що $\varepsilon_{eq}^{pl} = 0$).Виконується масштабування векторів переміщення $\{u\}\lambda_0$, тензорів пружних деформацій $\left\{\varepsilon^{el}\right\}\lambda_0$ і напружень $\left\{\sigma^{el}\right\}\lambda_0$ по всіх СЕ, щоб початковий розв'язок задачі відповідав поверхні текучості. Запам'ятовуються поточні переміщення $\{u\} = \{u\}\lambda_0$ і напруження $\{\sigma_1\} = \left\{\sigma^{el}\right\}\lambda_0$ в кожному СЕ. Наразі нульове наближення отримано.

2. Задається кількість кроків навантаження N_β та визначається коефіцієнт прирощення навантаження $\beta << \lambda_0$ за формулою $\beta = \frac{1-\lambda_0}{N_\beta}$, тобто $\lambda_0 + \beta N_\beta = 1$. Виконується присвоєння $\varepsilon_{eq}^{pl} = 0$ – еквівалентні пластичні деформації по всіх СЕ.

3. Початок циклу по $k = 1\ldots N_\beta$ з прирощення навантаження або покрокового циклу. Виконується мале прирощення навантаження $\beta\dot{\mathbf{F}}$ і розв'язується СЛАР МСЕ відносно вузлових значень прирощення переміщень вигляду (10) та визначаються вектори

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

прирощення вузлових переміщень $\{\dot{u}\}^k$. В кожному СЕ знаходяться тензори прирощення пружних деформацій $\{\dot{\varepsilon}^{el}\}^k$ (15) і напружень $\{\dot{\sigma}^{el}\}^k$ (16),поточні пружні напруження $\{\sigma_2\}=\{\sigma_1\}+\{\dot{\sigma}^{el}\}^k$ та за $\{\sigma_2\}$ обчислюються еквівалентні напруження за Мізесом σ_{eq} (14). З використанням нестрогої нерівності $\{\sigma_2\}\geq\sigma_y$ визначається список пластичних СЕ, в яких обчислюються тензори прирощення істинних напружень з використанням пружно-пластичної залежності між напруженнями і деформаціями $\{\dot{\sigma}^{ep}\}^k$ (17), прирощення початкових напружень $\{\dot{\sigma}^0\}^k=\{\dot{\sigma}^{el}\}^k-\{\dot{\sigma}^{ep}\}^k$ і прирощення пластичної деформації $\{\dot{\varepsilon}^{pl}\}^k$ (18), за значеннями яких визначаються прирощення еквівалентних пластичних деформацій $\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl}$ (19). У якості першого наближення використовуються прирощення початкових пластичних напружень $\{\dot{\sigma}^0\}^k$.Вузлові значення векторів прирощення переміщення накопичуються за формулою $\{\dot{u}\}=\{\dot{u}\}+\{\dot{u}\}^k$. Поточні значення прирощення напруження запам'ятовуються в пластичних СЕ за формулою $\{\sigma_2\}=\{\sigma_1\}+\{\dot{\sigma}^{ep}\}$, а в пружних за – $\{\sigma_2\}=\{\sigma_1\}+\{\dot{\sigma}^{el}\}$ та виконується присвоєння $\{\sigma_1\}=\{\sigma_2\}$. Еквівалентні пластичні деформації накопичуються в пластичних СЕ $\varepsilon_{eq}^{pl}=\varepsilon_{eq}^{pl}+\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl}$.За отриманим значеннями ε_{eq}^{pl} уточняється значення границі текучості матеріалу σ_y (20) по пластичних СЕ.

4. Цикл за початковими напруженнями $m=1,2,\ldots$. За умови, що $\mathbf{F}=0$, за отриманими в п. 3 прирощеннями початкових напружень $\{\dot{\sigma}^0\}$ із розв'язання СЛАР МСЕ вигляду (11)отримуються вузлові значення векторів прирощення переміщень $\{\dot{u}\}^m$, тензори прирощення пружних деформацій $\{\dot{\varepsilon}^{el}\}^m$ (15) і напружень $\{\dot{\sigma}^{el}\}^m$ (16), поточні пружні напруження $\{\sigma_2\}=\{\sigma_1\}+\{\dot{\sigma}^{el}\}^m$ та за $\{\sigma_2\}$ обчислюються еквівалентні напруження за Мізесом σ_{eq} (14). На підставі нерівності $\{\sigma_2\}\geq\sigma_y$ визначається список пластичних СЕ, в яких обчислюються тензори прирощення істинних напружень $\{\dot{\sigma}^{ep}\}^m$ (17), прирощення початкових напружень $\{\dot{\sigma}^0\}^m=\{\dot{\sigma}^{el}\}^m-\{\dot{\sigma}^{ep}\}^m$ і прирощення пластичної деформації $\{\dot{\varepsilon}^{pl}\}^k$ (18), за якими визначаються прирощення еквівалентних пластичних деформацій $\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl}$ (19). Отриманий тензор $\{\dot{\sigma}^0\}^m$ тепер є новими початковими напруженнями. Поточні значення переміщень напруження запам'ятовуються в пластичних СЕ за формулою $\{\sigma_2\}=\{\sigma_1\}+\{\dot{\sigma}^{ep}\}$. Виконуються присвоєння $\{\dot{u}\}=\{\dot{u}\}+\{\dot{u}\}^m$, $\varepsilon_{eq}^{pl}=\varepsilon_{eq}^{pl}+\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl}$, $\{\sigma_1\}=\{\sigma_2\}$. Уточняється значення границі текучості матеріалу σ_y (20) по пластичних СЕ. Виконується перевірка: $\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl}\leq\delta_\varepsilon$. Якщо перевірка не виконуються, то розрахунки повторюються з п. 4, у зворотному випадку відбувається перехід до п. 5.

5. Виконується присвоєння $k=k+1$. Перевірка, якщо $k\leq N_\beta$, то виконується перехід в п. 3, у зворотному випадку обчислюються повні еквівалентні деформації ε_{eq}^{tot} (19) і пружні еквівалентні деформації $\varepsilon_{eq}^{el}=\varepsilon_{eq}^{tot}-\varepsilon_{eq}^{pl}$ по всіх СЕ. На цьому розв'язання задачі завершено.

Зворотний інкрементарний алгоритм 2 [3, 10] базується на використанні пробних напружень для знаходження еквівалентних пластичних деформацій за зворотним метод Ейлера.

Розглянемо основні формули алгоритму 2:

$$\{\varepsilon^{tr}\}=[B]\{u^{tr}\}; \tag{21}$$

$$\{\sigma^{tr}\}=[D^{el}]\{\varepsilon^{tr}\}; \tag{22}$$

$$\mathbf{S}^{tr}=\boldsymbol{\sigma}^{tr}-\mathrm{tr}(\boldsymbol{\sigma})\mathbf{I}; \tag{23}$$

$$\bar{\sigma}^{tr}=\sigma_{eq}^{tr}=\sqrt{\tfrac{3}{2}S_{ij}^{tr}S_{ij}^{tr}}=\sqrt{\tfrac{3}{2}\left[S_1^2+S_2^2+S_3^2+2\left(S_4^2+S_5^2+S_6^2\right)\right]}; \tag{24}$$

$$F\left(\mathbf{S},\sigma_y\left(\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)\right)=\sqrt{\tfrac{3}{2}\mathbf{S}:\mathbf{S}}-\sigma_y\left(\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)=0; \tag{25}$$

$$\bar{\sigma}^{tr}-3G\Delta\bar{e}^{\,pl}=\sigma_y\left(\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)\text{ або }\bar{\sigma}^{tr}-3G\Delta\bar{e}^{\,pl}=\sigma_{0y}+h\Delta\bar{e}^{\,pl}; \tag{26}$$

$$\Delta\bar{e}^{\,pl}=\frac{\bar{\sigma}^{tr}-\sigma_y}{3G-h}; \tag{27}$$

$$\sigma_y\left(\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)=\sigma_{y0}+h\Delta\bar{e}^{\,pl}; \tag{28}$$

$$\mathbf{S}=\frac{\mathbf{S}^{tr}}{1+\dfrac{3G}{\sigma_y\left(\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)}\Delta\bar{e}^{\,pl}}; \tag{29}$$

$$\mathbf{n}=\frac{\partial F}{\partial\boldsymbol{\sigma}}=\frac{3}{2}\frac{\mathbf{S}}{\sigma_y}; \tag{30}$$

$$\Delta\boldsymbol{\sigma}^0=-2G\left(\Delta\mathbf{e}^{pl}-\Delta\mathbf{e}^{pl}\big|_{old}\right), \tag{31}$$

де $\{\varepsilon^{tr}\}$ – тензор пробних пружних деформацій СЕ; $\{u^{tr}\}$ – вектор пробних вузлових переміщень СЕ; $\{\sigma^{tr}\}$ – тензор пробних пружних напружень СЕ; $\mathbf{S}^{tr}$ –

тензор пробних девіаторних напружень СЕ; $\bar{\sigma}^{tr}=\sigma^{tr}_{eq}$ – еквівалентні напруження за Мізесом; $\Delta\bar{e}^{\,pl}$ – прирощення еквівалентних пластичних деформацій; $\mathbf{S}$ – тензор девіаторних пружних деформацій; $\mathbf{n}$ – градієнт функції пластичності; $\Delta\sigma^0$ – тензор прирощення початкових напружень; $\Delta\mathbf{e}^{pl}$ – тензор прирощення пластичних деформацій.

Для отримання (26) з (25) використовуються такі перетворення:

– інтегрування рівняння закону пластичної течії в диференціальній формі $d\mathbf{e}^{pl}=d\bar{e}^{\,pl}\mathbf{n}$ з використанням зворотного методу Ейлера дає рівняння у вигляді прирощень тензора пластичних девіаторних деформацій,тобто закон пластичної течії

$$\Delta\mathbf{e}^{pl}=\Delta\bar{e}^{\,pl}\mathbf{n}\,; \qquad (32)$$

– комбінуючи рівняння тензора девіаторний напружень з рівнянням для швидкості деформацій $d\boldsymbol{\varepsilon}=d\boldsymbol{\varepsilon}^{el}+d\boldsymbol{\varepsilon}^{pl}$, отримуємо

$$\mathbf{S}=2G\left(\mathbf{e}^{el}\big|_t+\Delta\mathbf{e}-\Delta\bar{e}^{\,pl}\mathbf{n}\right), \qquad (33)$$

де t – поточний час;

– перетворення (33) з використанням градієнта функції пластичності $\mathbf{n}=\frac{3}{2}\frac{\mathbf{S}}{q}$ разом з умовою Мізеса (25) дає

$$\begin{aligned}\mathbf{S}&=2G\left(\mathbf{e}^{el}\big|_t+\Delta\mathbf{e}-\Delta\bar{e}^{\,pl}\mathbf{n}\right)\to\mathbf{S}+2G\Delta\bar{e}^{\,pl}\mathbf{n}=\\&=2G\left(\mathbf{e}^{el}\big|_t+\Delta\mathbf{e}\right)\to\mathbf{S}+2G\frac{3}{2}\frac{\mathbf{S}}{q}\Delta\bar{e}^{\,pl}=\\&=2G\hat{\mathbf{e}}\to\mathbf{S}+\mathbf{S}\frac{3G}{q}\Delta\bar{e}^{\,pl}=\\&=2G\hat{\mathbf{e}}\to\left(1+\frac{3G}{q}\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)\mathbf{S}=2G\hat{\mathbf{e}},\end{aligned} \qquad (34)$$

де $\hat{\mathbf{e}}=\mathbf{e}^{el}\big|_t+\Delta\mathbf{e}$ – тензор повних деформацій; $q=\bar{\sigma}\left(\bar{\varepsilon}^{\,pl}\right)$ – границя текучості;

– скалярний добуток рівняння (34) самого на себе дає

$$\begin{aligned}&\left(q+3G\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)^2(\mathbf{S}:\mathbf{S})=\\&=(q2G)^2(\hat{\mathbf{e}}:\hat{\mathbf{e}})\to\left(q+3G\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)^2(\mathbf{S}:\mathbf{S})=\\&=\frac{3}{2}(\mathbf{S}:\mathbf{S})4G^2\hat{\mathbf{e}}:\hat{\mathbf{e}}\to\left(q+3G\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)^2=\\&=3G^2(2\hat{\mathbf{e}}:\hat{\mathbf{e}})\to q+3G\Delta\bar{e}^{\,pl}=\\&=\sqrt{3}G\left(\sqrt{2\hat{\mathbf{e}}:\hat{\mathbf{e}}}\right)\to q+3G\Delta\bar{e}^{\,pl}=\\&=3G\left(\sqrt{\frac{2}{3}\hat{\mathbf{e}}:\hat{\mathbf{e}}}\right)\to q+3G\Delta\bar{e}^{\,pl}=\\&=3G\tilde{e}\to 3G\tilde{e}-3G\Delta\bar{e}^{\,pl}=q,\end{aligned} \qquad (35)$$

де $q^2=\frac{3}{2}(\mathbf{S}:\mathbf{S})$; $\tilde{e}=\sqrt{\frac{2}{3}\hat{\mathbf{e}}:\hat{\mathbf{e}}}$ – повна еквівалентна девіаторна деформація;

– виконуючи в (35) заміни $\bar{\sigma}^{tr}=3G\tilde{e}$ і $q=\sigma_y\left(\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)$, остаточно отримується вираз для прирощення еквівалентної пластичної деформації $\Delta\bar{e}^{\,pl}$ (26)

$$\bar{\sigma}^{tr}-3G\Delta\bar{e}^{\,pl}=\sigma_y\left(\Delta\bar{e}^{\,pl}\right); \qquad (36)$$

– з використанням в (34) заміни $\mathbf{S}^{tr}=2G\hat{\mathbf{e}}$ і $q=\sigma_y\left(\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)$ отримується формула для визначення девіаторних пружних деформацій (29)

$$\left(1+\frac{3G}{\sigma_y\left(\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)}\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)\mathbf{S}=\mathbf{S}^{tr}. \qquad (37)$$

Послідовність дій за алгоритмом 2.

1. Розв'язується лінійна пружна задача за повного навантаження (9). Отримується вектор пробних переміщень у вузлах $\{u^{tr}\}$. Виконується присвоєння: $k=1$ – номер ітерації, $\Delta\mathbf{e}^{pl}\big|_{old}=0$ – початкові пластичні деформації.

2. Визначаються тензори пробних деформацій $\{\varepsilon^{tr}\}$ (21), пробних напружень $\{\sigma^{tr}\}$ (22), пробних девіаторних напружень (23), а також пробні еквівалентні напруження за Мізесом $\bar{\sigma}^{tr}=\sigma^{tr}_{eq}$ (24) по всіх СЕ.

3. Визначається список пластичних скінченних елементів з використанням умови $\sigma^{tr}_{eq}\ge\sigma_y\left(\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)$ (для $k=1$, $\sigma_y=\sigma_{0y}$). Далі в пластичних СЕ визначаються прирощення еквівалентних пластичних деформацій за формулою $\Delta\bar{e}^{\,pl}$ (27) (у разі нелінійної залежності $\sigma_y\left(\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)$ для визначення $\Delta\bar{e}^{\,pl}$ використовується метод Ньютона [10,12]), уточняється значення границі текучості матеріалу в пластичних СЕ $\sigma_y\left(\Delta\bar{e}^{\,pl}\right)$ (28), тензор девіаторних пружних деформацій $\mathbf{S}$ за формулою (29) та еквівалентні напруження за Мізесом $\bar{\sigma}^{tr}$ (24), визначаються градієнт функції пластичності $\mathbf{n}$ (30), тензор прирощення пластичних деформацій $\Delta\mathbf{e}^{pl}$ (32) та знаходяться еквівалентні пластичні деформації $\bar{\varepsilon}^{\,pl}=\varepsilon^{pl}_{eq}=\Delta\bar{e}^{\,pl}$, $\Delta\bar{e}^{\,pl}=\sqrt{\frac{2}{3}\Delta\mathbf{e}^{pl}:\Delta\mathbf{e}^{pl}}$.

4. Визначається тензор початкових пластичних напружень за формулою (31). Розв'язується пружна задача за умови $\mathbf{F}=0$ і навантаженням початковими напруженнями (11) та визначається вектор переміщення $\mathbf{u}^{k+1}=\mathbf{u}^k+\Delta\mathbf{u}^k$. Виконується перевірка

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

$\left|\Delta\mathbf{u}\right| \le \delta_u$ або $\left|\Delta\dot{\boldsymbol{\sigma}}^0\right| \le \delta_{\Delta\sigma^0}$. Якщо нерівності виконуються, то ітерації закінчено і відбувається перехід у п. 5. У зворотному випадку виконується присвоєння $k = k+1$ і здійснюється перехід у п. 2 та розв'язання задачі повторюється.

5. По всіх СЕ обчислюються $\left\{\varepsilon^{tot}\right\}$, $\left\{\sigma_{eq}\right\}$, $\left\{\varepsilon_{eq}^{el}\right\} = \left\{\varepsilon_{eq}^{tot}\right\} - \left\{\varepsilon_{eq}^{pl}\right\}$, де $\left\{\varepsilon_{eq}^{tot}\right\}$ визначається за формулою (19).

Програмна реалізація алгоритмів та тести. Для виконання тестування викладених у роботі числових методик розв'язання нелінійної пружно-пластичної задачі з врахуванням ізотропного зміцнення використано тетраедні СЕ з чотирма вузлами. Дискретизація розрахункової області виконувалася в середовищі вільно відкритого програмного забезпечення для автоматизованої генерації сіток Gmsh [13], а для візуалізації результатів розрахунків застосовано – ParaView [14], який також є вільно відкритим програмним кодом.

Програмна реалізація числової методики виконана на мові програмування CAD-системи Mathcad [15] та базується на програмному коді для розв'язання тривимірних задач статичної пружності, наведеного в [16]. Оцінка точності розрахунків проведена за допомогою зіставлення з числовими розв'язками, отриманими за допомогою іншого програмного забезпечення [11]. У якості геометричного об'єкта для моделювання обрано порожнистий циліндр за граничних умов Дирихле і Неймана (закріплення і навантаження надлишковим тиском).

Числова модель задачі пружно-пластичності являє собою четверту частину порожнистого циліндра, яку побудовано за допомогою спеціального geo-файлу в програмі Gmsh, та виконано дискретизацію на тетраедні СЕ (рис. 1).

Тестування розроблених у середовищі Mathcad програмних кодів для розв'язання задачі пружно-пластичності з ізотропним зміцненням (1)-(8) за двома алгоритмами виконано на прикладі матеріалу з фізичними властивостями близькими до вуглецевої сталі.

Тест. Задача пружно-пластичності з врахуванням ізотропного зміцнення товстостінного циліндра з радіусами $r_1/r_2 = 0,05/0,08$ м і висотою h=0,005 м. Матеріал сталь – $E = 2\cdot10^{11}$ Па, $\nu = 0,3$, σ_{y0} = 320 МПа, h = 1,5 ГПа. Тиск в середині циліндра становить p = 150 МПа.

Дані числового моделювання фізичних полів з використанням розробленого програмного забезпечення показано на рис. 1, а результати порівняння наведено в табл. 1, 2.

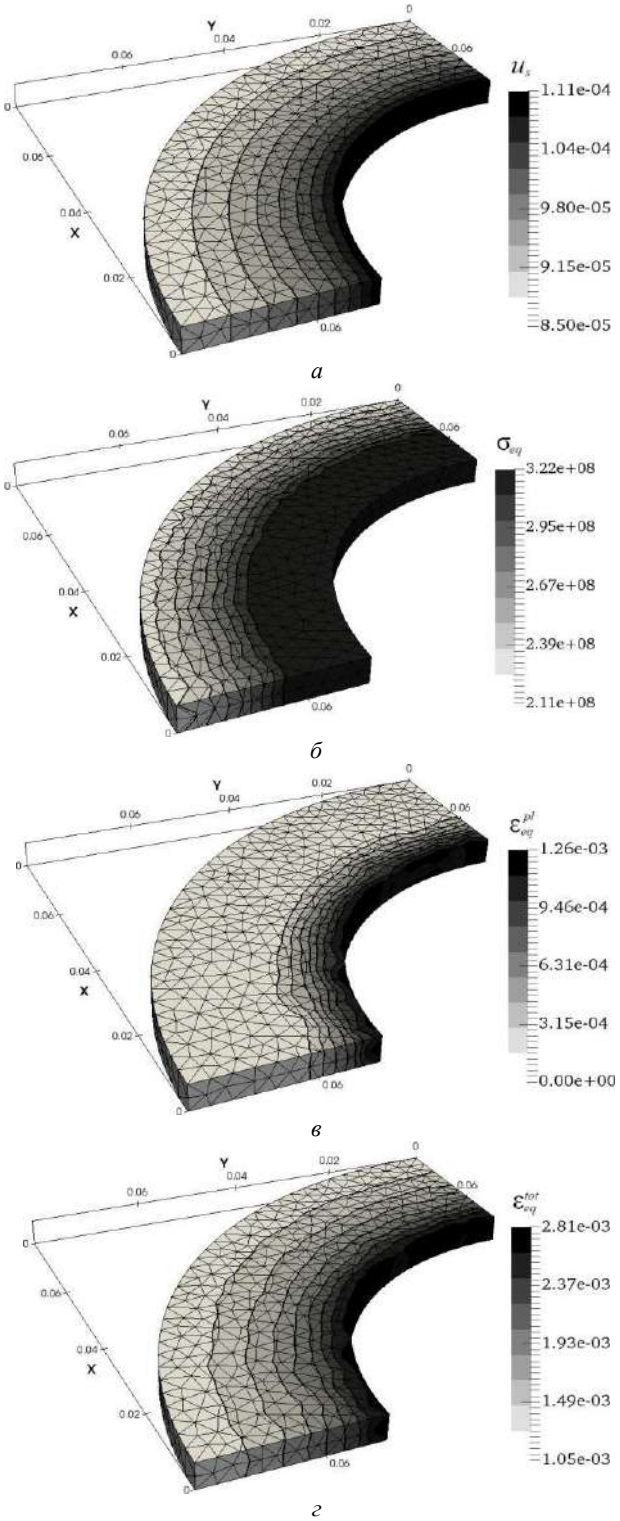


Рис. 1 – Результати числового розв'язання пружно-пластичної задачі з врахуванням ізотропного зміцнення за алгоритмом 1 (вузлів 771, СЕ – 2366):
а – поле сумарних переміщень u_s, м;
б – поле еквівалентних напружень, σ_{eq}, Па;
в – поле еквівалентних пластичних деформацій ε_{eq}^{pl};
г – поле повних еквівалентних деформацій ε_{eq}^{tot}

Таблиця 1 – Результати порівняння за алгоритмом 1

Досліджувана величина	ANSYS [8], вузлів 1974, СЕ – 7402	Mathcad – авторський код, вузлів 771,СЕ – 2366	Похибка, %
u_s, м	$8{,}69\cdot10^{-5}$–0,000112	$8{,}496\cdot10^{-5}$–0,0001109	2,24–0,94
σ_{eq}, МПа	214–322	210,988–322,371	1,41–-0,12
ε_{eq}^{el}	0,001072–0,001609	0,001055–0,001639	1,61–-1,87
ε_{eq}^{pl}	0,001217	0,0012612	3,62
ε_{eq}^{tot}	0,001071–0,002826	0,001055–0,002812	1,61–0,51

Таблиця 2 – Результати порівняння за алгоритмом 2

Досліджувана величина	ANSYS [8], Вузлів 1974, СЕ – 7402	Mathcad – авторський код, вузлів 771,СЕ – 2366	Похибка, %
u_s, м	$8{,}69\cdot10^{-5}$–0,000112	$8{,}662\cdot10^{-5}$–0,0001118	0,32–0,137
σ_{eq}, МПа	214–322	214,927–321,746	0,43–0,078
ε_{eq}^{el}	0,001072–0,001609	0,001075–0,001598	0,34–0,66
ε_{eq}^{pl}	0,001217	0,001231	1,11
ε_{eq}^{tot}	0,001071–0,002826	0,001075–0,002829	0,34–-0,1

Обговорення результатів

Аналіз порівняння результатів показує, що дані моделювання за розробленим програмними кодами збігаються з числовим розв'язком [11]. При цьому максимальне значення похибки визначення фізичних полів не перевищує 3,62 % за алгоритмом 1 і 1,11 % – за алгоритмом 2. Алгоритм 2 порівняно з алгоритмом 1 потребує ітерацій в 5 і більше разів для досягнення приблизно однакової точності розрахунків. Розглянуті алгоритми можна також застосовувати як до задач ідеальної пластичності, так і з реальними властивостями металів з незначними модифікаціями.

Висновки

На базі методу скінченних елементів розроблено числові методики та програмне забезпечення для розв'язання нелінійної пружно-пластичної задачі за двома алгоритмами та виконано зіставлення результатів числових експериментів з даними числового аналізу, виконаного з використанням програмних продуктів ANSYS Mechanical APDL. Встановлено, що максимальне значення похибки визначення фізичних полів не перевищує 3,62 % за алгоритмом 1 і 1,11 % – за алгоритмом 2.

Подальші дослідження доцільно продовжити у напрямку розробки методик та алгоритмів розв'язання контактних задач механіки твердого деформованого тіла з врахуванням нелінійної поведінки матеріалів.

Список літератури

1 **Duda, F. P.** A phase-field/gradient damage model for brittle fracture in elastic–plastic solids / **F. P. Duda, A. Ciarbonetti, P. J. Sánchez** [at al.] // *International Journal of Plasticity*. – 2015. – Vol. 65. – P. 269–296. – doi: 10.1016/j.ijplas.2014.09.005.

2 **Pronina, Y.** Analytical solution for the general mechanochemical corrosion of an ideal elastic–plastic thick-walled tube under pressure / **Y. Pronina** // *International Journal of Solids and Structures*. – 2013. – Vol. 50, Issues 22 – 23. – P. 3626 – 3633. – doi: 10.1016/j.ijsolstr.2013.07.006.

3 **Zienkiewicz, O. C.** The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. – 7th ed. / **O. C. Zienkiewicz**, **R. L. Taylor**and **D. D. Fox**. – 2014. – *Publ. by Elsevier Ltd*. – 624 p.

4 **De Borst, R.** Non-linear finite element analysis of solids and structures. – 2nd ed. / **R. De Borst**, **M. A. Crisfield**, **J. C. Remmers** [et al.]. – 2012. – *John Wiley&SonsLtd*. – 516. p.

5 **Crisfield, M. A.** Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. Vol. 1: ESSENTIALS / **M. A. Crisfield**. – 2000. – *John Wiley&SonsLtd*. – 345 p.

6 **Зенкевич, О.** Метод конечних элементов в технике: монографія / **О. Зенкевич** ; пер. с англ. ; под ред. Б. Е. Победри. – *Москва: Мир*, 1975. – 543 с.

7 **Pommier, S.** Incremental model for fatigue crack growth based on a displacement partitioning hypothesis of mode I elastic–plastic displacement fields / **S. Pommier, R. Hamam** // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2006. – Vol. 30, issue 7. – p. 582–598 – doi: 10.1111/j.1460-2695.2007.01128.x.

8 **Бреббия, К.** Методы граничных элементов / **К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел** ; пер. с англ. Корнейчука Л. Г. ; под ред. Э. И. Григолюка. – *М. : Мир*, 1987. – 524 с.

9 **Simo, J. C.** Consistent tangent operators for rate-independent elastoplasticity / **J. C. Simo, R. L. Taylor** // *Comp. methods in applied mechanics and engineering*. – 1985. – Vol. 48. – P. 101–118.

10 **Khennane, A.** Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus / **A. Khennane.** – *Taylor & Francis Group*. – 2013. – 453 p.

11 **Lawrence, K. L.** Ansys Tutorial Release 13: Structural & Thermal Analysis Using the Ansys Mechanical Apdl Release 13 Environment / **K. L. Lawrence.** – *Schroff Development Corp*. – 2011. – 178 p.

12 **Argyros, I. K.** Weaker conditions for the convergence of Newton's method / **I. K. Argyros, S. Hilout** // *Journal of Complexity*. – 2012. – Vol. 28, Issue 3. – P. 364–387. – doi: 10.1016/j.jco.2011.12.003.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

13 Gmsh. a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. – Access mode: http://geuz.org/gmsh/.
14 Para View. An open-source, multi-platform data analysis and visualization application [Electronic resource]. – (http://www.paraview.org/).
15 Mathcad. Engineering math software that allows perform, analyze, and share your most vital calculations [Electronic resource]. – (http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad/).
16 **Карвацький, А. Я.** Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів: навч. посіб. / **А. Я. Карвацький.** – *К.: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка»*. – 2015. – 392 с.

Bibliography (transliterated)

1 **Duda, F. P.Sánchez, P. J.,** at al. A phase-field/gradient damage model for brittle fracture in elastic–plastic solids. *International Journal of Plasticity*, 2015, **65**, 269-296. doi: 10.1016/j.ijplas.2014.09.005.
2 **Pronina, Y.** Analytical solution for the general mechanochemical corrosion of an ideal elastic–plastic thick-walled tube under pressure. *International Journal of Solids and Structures*, 2013, **50** (22-23), 3626-3633. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2013.07.006.
3 **Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L.,** and **Fox, D. D.** The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. - 7th ed. *Publ. by Elsevier Ltd*, 2014, 624.
4 **De Borst, R., Crisfield, M. A., Remmers J. C.,** et al. Non-linear finite element analysis of solids and structures. - 2nded. *John Wiley&SonsLtd*, 2012, 516.
5 **Crisfield, M. A.**Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. Vol. 1: ESSENTIALS. *John Wiley&SonsLtd*, 2000, 345.
6 **Zenkevich, O.** Metod konechnykh eljementov v tekhnyke: monoghrafija [The finite element method in the technique: a monograph]. Translated from English, ed. By B. E. Pobedri, *Moscow: Myr*, 1975, 543.
7 **Pommier, S.,** and **Hamam, R.** Incremental model for fatigue crack growth based on a displacement partition in ghypothesis of mode I elastic–plastic displacement fields. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2006, **30** (7), 582-598. doi: 10.1111/j.1460-2695.2007.01128.x.
8 **Brebbija, K.,**Telles**, Zh.,** and **Vroubel, L.** Metody ghranychnykh eljementov [Boundary element methods]. Translated from English by Kornejchuk L. G., edited by Je. I. Grigoljuk, *Moscow: Myr*, 1987, 524.
9 **Simo, J. C.,** and **Taylor, R. L.** Consistent tangent operators for rate-independent elastoplasticity. *Comp. methods in applied mechanics and engineering*, 1985, **48**, 101-118.
10 **Khennane, A.** Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus. *Taylor & Francis Group*, 2013, 453.
11 **Lawrence, K. L.** Ansys Tutorial Release 13: Structural & Thermal Analysis Using the Ansys Mechanical Apdl Release 13 Environment. *Schroff Development Corp*, 2011, 178.
12 **Argyros, I. K.,** and **Hilout, S.** Weaker conditions for the convergence of Newton's method. *Journal of Complexity*, 2012, **28**(3), 364-387. doi: 10.1016/j.jco.2011.12.003.
13 Gmsh. a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities, http://geuz.org/gmsh/.
14 Para View. An open-source, multi-platform data analysis and visualization application,http://www.paraview.org/.
15 Mathcad. Engineering math software that allows perform, analyze, and share your most vital calculations, http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad/.
16 **Karvatskii, A. Ya.**Metod skinchennykh elementiv u zadachakh mekhaniky suciljnykh seredovyshh. Proghramna realizacija ta vizualizacija rezuljtativ: navch. posib. [Finite element method in problems of continuum mechanics. Software implementation and visualization of results: teach. Guidances]. *Kyiv: NTUU «KPI» PPIPPC "Polytechnica"*, 2015, 392.

Відомості про авторів (About authors)

Карвацький Антон Янович – доктор технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор, кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: anton@rst.kpi.ua.

Anton Karvatskii – Doctor of Science (D. Sc.), Professor, Senior Researcher, Professor, Department of chemical, polymer and silicate engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: anton@rst.kpi.ua.

Лазарєв Тарас Валерійович – кандидат технічних наук, науковий співробітник, НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: t_lazarev@rst.kpi.ua.

Taras Lazariev – Candidate of Sciences (Ph. D.), Researcher, Research center "Resource-saving technologies", National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: t_lazarev@rst.kpi.ua.

Лелека Сергій Володимирович – кандидат технічних наук, науковий співробітник, НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: sleleka@rst.kpi.ua.

Serhii Leleka – Candidate of Sciences (Ph. D.), Researcher, Research center "Resource-saving technologies", National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: sleleka@rst.kpi.ua.

Педченко Анатолій Юрійович – молодший науковий співробітник, НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського », м. Київ, Україна; e-mail: anatolek@rst.kpi.ua.

Anatoliy Pedchenko – Junior researcher, Research center "Resource-saving technologies", National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: anatolek@rst.kpi.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Карвацький, А. Я. Застосування CAD-систем для розв'язання пружно-пластичних задач з врахуванням ізотропного зміцнення / **А. Я. Карвацький, Т. В. Лазарєв, С. В. Лелека, А. Ю. Педченко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 55-63. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.08.

Please cite this article as:

Karvatskii, A., Lazariev, T., Leleka, S., Pedchenko, A. CAD-systems application for solving the elastoplastic problems with isotropic hardening. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 55–63, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.07.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Карвацкий, А. Я. Применение CAD-систем для решения упругопластических задач с учетом изотропного укрепления / **А. Я. Карвацкий, Т. В. Лазарев, С. В. Лелека, А. Ю. Педченко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 55-63. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.07.

АННОТАЦИЯ *На базе метода конечных элементов разработаны численные методики для решения нелинейной упругопластической задачи с учетом изотропного упрочнения по двум алгоритмам. Программная реализация численной методики выполнена на языке программирования CAD-системы Mathcad и базируется на программном коде для решения трехмерных задач статической упругости. С помощью разработанного программного обеспечения получены результаты численных экспериментов при погрузке внутренним давлением толстостенного стального цилиндра и выполнено их сопоставление с данными численного анализа, выполненного с использованием программных продуктов ANSYS Mechanical APDL. Установлено, что максимальное значение погрешности определения физических полей не превышает 3,62 % по алгоритму 1 и 1,11 % – по алгоритму 2.*

Ключевые слова: *конечный элемент; изотропное укрепление; упругопластическая задача; билинейный закон; Mathcad*

Надійшла (received) 17.01.2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

УДК 622.834:622.862.3 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.09

О ДИНАМИКЕ БОКОВЫХ ПОРОД ПРИ ИХ ВНЕЗАПНОМ ОБРУШЕНИИ

В. А. КОЛОМИЕЦ[1], Д. А. ЧЕПИГА[2]*, И. В. ИОРДАНОВ[2], Н. Н. ВЛАСЕНКО[2], С. С. АЛЕКСАНДРОВ[2]

[1]ШУ «Южнодонбасское №1», г.Угледар, УКРАИНА
[2]ГВУЗ «ДонНТУ» МОН Украины, г.Покровск, УКРАИНА
[*]daria.chepiha@donntu.edu.ua

АННОТАЦИЯ *В результате проведенных аналитических исследований, с целью изучения динамики боковых пород при их внезапном обрушении, получены зависимости изменения частоты, периода колебаний и координат точек тела (балки – непосредственной кровли) в случае опирания на неподвижную шарнирную опору и на упругое основание. Сделан вывод, что при разработке пластов в сложных горно-геологических условиях на больших глубинах предпочтительней применять полную закладку выработанного пространства или широкие податливые полосы, что позволит снизить уровень травматизма горнорабочих.*
Ключевые слова*: травматизм; горное давление; колебания; динамика боковых пород; закладочный массив; податливая опора*

ABOUT DYNAMICS OF SIDE ROCK IN THEIR SUDDEN COLLAPSE

V. KOLOMIETS [1], D. CHEPIGA[2*], I. IORDANOV[2], N. VLASENKO, S. ALEKSANDROV [2]

[1]Mine management «Yuzhnodonbasskoe №1», Ugledar, UKRAINE
[2]Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, UKRAINE

ABSTRACT *As a result of analyzes, with the aim of studying the dynamics of the wall rocks at their sudden collapse, prepared according to changes in the frequency, the oscillation period and the coordinate points of the body (the beam - just a roof) for bearing on a fixed pivot bearing and on an elastic foundation. The effects of fluctuations in the beam bending state of rocks mined seam roof with different methods of roof management - a complete collapse (deduction at the chock) and stowing. Fluctuations of this type are associated with the flexural deformation of beams, abbrev fluctuations in the load bearing beams. As the cargo considered heaped rock walls and supporting beams - just rock roof. Comprehensive research method was used with the use of theoretical mechanics, contact mechanics and the theory of elasticity. It is concluded that the development of reservoirs in difficult geological conditions at great depths is preferable to use a complete stowing or wide pliable strips. Tabbed array or pliable supports, which are based on breed and close the main roof as a result of their separation, eliminate negative phenomena manifested in the solid when a sudden collapse of the wall rocks or planting of the main roof. These solutions will improve the stability of development workings and as a consequence, reduce the level of injuries miners from landslides and collapses.*
Keywords: *rate of accidents; rock pressure; vibration; speaker wall rocks; filling mass; soft support*

Введение

Общеизвестно, что при добыче полезных ископаемых в подземных условиях приходится считаться с целым рядом факторов, приводящих к повышенной опасности для людей и объектов. Так, в реальных условиях разработки угольных пластов на современных глубинах, породы междупластья представляют собой чередующиеся слои угольных пластов и прослоев. Отличительная особенность такого массива заключается в том, что во всех случаях контакт между слоями представлен глинистыми разностями. В зонах разгрузки, глинистые породы, увеличиваясь в объеме во времени, способствует отрыву слоев более прочных пород и формируют условия обрушения, что приводит к снижению устойчивости горных выработок и травмированию горнорабочих.

Достигнутый уровень травматизма по исследуемому опасному производственному фактору (за последние 10 лет удельный вес смертельного травматизма при проведении и перекреплении выработок составляет около 32%, на сопряжении выработок – 11%) позволяет считать, что действующие меры по предотвращению обвалов и обрушений в угольной отрасли являются недостаточными. Значительное число завалов лав и подготовительных выработок связано с созданием аварийных ситуаций, которые происходили в результате нарушения горнорабочими требований ПБ при ведении горных работ по добыче угля, проведении и ремонте выработок и по неустановленным причинам.

Наиболее часто повторяющимися причинами аварий и несчастных случаев в результате обвалов и обрушений горных пород являются нарушения паспортов крепления (62%), несоответствие паспортов крепления горно-геологическим условиям (8%) и отсутствие или неисправность крепи (23%) [1]. Однако детальный анализ аварий позволяет сделать вывод о том, что во многих случаях не организационные причины, а недостаточная

© В. А. КОЛОМИЕЦ, Д. А. ЧЕПИГА, И. В. ИОРДАНОВ, Н. Н. ВЛАСЕНКО, С. С. АЛЕКСАНДРОВ, 2017

изученность природы обрушений и, в связи с этим, принятие ошибочных технических решений, обуславливает травматизм по рассматриваемому опасному производственному фактору. Поэтому разработка эффективных мероприятий, направленных на повышение устойчивости боковых пород и горных выработок при разработке угольных пластов, будет способствовать не только эффективной отработке запасов, но и повышению безопасности труда горнорабочих.

Анализ исследований и публикаций

Традиционно считается, что проявления горного давления в выработках зависят от совокупного влияния многих горно-геологических факторов, к которым первостепенно следует относить напряженное состояние пород и их физико-механические свойства. Изучение особенностей проявления горного давления в выработках на большой глубине [2] позволило установить, что характер его опасных проявлений определяется не только напряженным состоянием массива горных пород и их физико-механическими свойствами, но и спецификой формирования последнего, обусловившей неупругое деформирование при объемном сжатии, а также способность деформироваться и разрушаться при разгрузке.

Опыт работы шахт Донбасса показывает, что с ростом глубины горных работ в угольном массиве начинает проявляться такой природный фактор, как расслоения боковых пород, оказывающий существенное влияние на состояние горных выработок и приводящий к возможному травматизму, в результате обрушений расслоившихся пород. Подработанные и расслоившиеся породы непосредственной кровли, оседающие на хаотически обрушенные слои представляют собой блочный массив, состоящий из балок различной длины. Причем породы непосредственной кровли изгибаются и неконтролируемо оседают позади очистного забоя, создавая неблагоприятную геомеханическую обстановку. Установлено [3,4], что в зависимости от горно-геологических условий, зона расслоения боковых пород составляет по нормали к напластованию 4-8м. Негативные последствия создавшейся геомеханической обстановки могут проявляться в том, что основная кровля разрабатываемого пласта, не имея подпора в выработанном пространстве, внезапно обрушается, что способствует проявлению динамических нагрузок, нестационарных колебаний, а так же возможному завалу горных выработок [5].

Очевидно, возникающие в различных условиях колебания инженерных сооружений, к которым следует относить боковые породы, при неблагоприятных обстоятельствах, в т.ч. при внезапных обрушениях боковых пород, могут вызвать значительные деформации и напряжения, а так же их разрушения. Поэтому понятие устойчивости рассматриваемых систем, тесно связано с учением о колебаниях [5-9].

В динамических задачах, в частности, в задачах о колебаниях, положение точек системы изменяется с течением времени и установленные координаты являются функциями времени [5,9]. Основная задача динамического исследования состоит в нахождении этих функций, т.е. в определении закона движения системы.

Эффективность отработки угольных пластов и безопасность ведения горных работ на шахтах Донбасса, в значительной степени зависит не только от состояния горных выработок, но и от способа управления кровлей в очистном забое. Как показало изучение процесса сдвижений и деформаций горных пород [10], при выемке пластов в нарушенной толще происходит образование характерных зон сдвижения, на динамику и параметры которых в значительной степени влияет способ управления кровлей в лаве. Наиболее интенсивно процесс сдвижения под- и надработанной толщи развивается и протекает при полном обрушении кровли в лавах или удержанием кровли на кострах, наименее интенсивно – при полной закладке выработанного пространства [3].

Исследованиями ДонУГИ и ДонНТУ ранее было установлено, что закладочный массив предотвращает развитие сдвижений горных пород в окрестности выработок и создает зоны устойчивости пород впереди и позади очистного забоя. Механизм взаимодействия закладочного массива с оседающими породами висячего бока заключается в закрытии над закладочным массивом трещин разлома пород кровли. При таком их взаимодействии с закладочным массивом уменьшается концентрация напряжений в призабойном пространстве и длина зоны проявлений опорного давления [10]. Очевидно, существенно изменить геомеханическую обстановку в окрестности горных выработок можно за счет размещения позади очистного забоя в выработанном пространстве податливой опоры. Это позволит осуществлять управление деформированными боковыми породами вблизи призабойного пространства и далеко позади лавы. Такой подход является одним из главных направления повышения устойчивости горных выработок и создания безопасных условий труда горнорабочих [11].

В качестве параметрического обеспечения геомеханических расчетов устойчивости боковых пород, наиболее часто используются деформационные показатели, определяемые статическим методом приложения нагрузки. Однако при этом необходимо принимать во внимание ряд условий, для которых характерен динамический вид нагружения, с учетом показателей, учитывающих колебания рассматриваемых систем.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Постановка задачи

С целью изучения динамики боковых пород при их внезапном обрушении были проведены аналитические исследования с использованием основных положений теоретической механики, теории колебаний, механики контактных взаимодействий и теории упругости [12,13,16,17,20-25]. Было изучено влияние изгибных колебаний балок на состояние пород кровли разрабатываемого пласта при различных способах управления кровлей – полным обрушением (удержанием на кострах) и закладкой выработанного пространства. Колебания этого вида связаны с изгибной деформацией балок, т.е. колебаний груза на несущих балках. В качестве груза рассматриваются обрушившиеся боковые породы, а несущей балки – породы непосредственной кровли.

Изложение материала и результаты

На рис. 1*а* показана шарнирно опертая балка длиной *l*, (м), которая совершает изгибные колебания. К балке приложена сила *P*, (Н). Для составления уравнения движения воспользуемся известным принципом Д`Аламбера [12,14,15]. С этой целью выделим на некотором расстоянии *x* от начала координат бесконечно малый элемент длиной *dx* (рис.1*а*).

а) *б)*

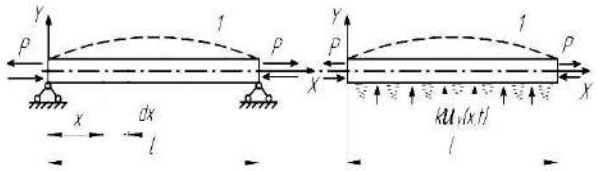


Рис. 1 – Расчетная схема к определению колебаний балки: а) неподвижная шарнирная опора; б) упругое основание: 1 – форма колебаний, l – длина балки, (м), $kU_y(x,y)$ - реакция упругого основания, P – приложенная сила, (Н)

На рис. 2 показаны силы, действующие на бесконечно малый элемент в процессе колебания балки. При малых колебаниях нормальную силу *N* можно считать постоянной и равной внешней силе *P*. Однако угол между этими силами и осью *X* к сечению *x+dx* получает приращение.

Считаем, что

$$cos\frac{\partial u_y}{\partial x} = 1 \text{ и } sin\frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{\partial u_y}{\partial x}, \qquad (1)$$

и приравняв нулю сумму проекций на ось У всех сил, действующих на выделенный элемент, получим

$$-\frac{m_0\partial^2 u_y}{\partial t^2}\partial x + Q_y - \left(Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial x}\partial x\right) + P\left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2}\partial x\right) - P\frac{\partial u_y}{\partial x} = 0, \qquad (2)$$

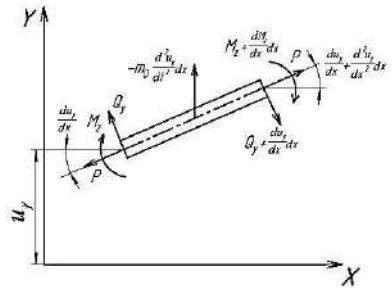


Рис. 2 – Силы, действующие на бесконечно малый элемент в процессе колебаний

или $$m_0\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + \frac{\partial Q_y}{\partial x} - P\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = 0, \qquad (3)$$

где m_0 – погонная масса балки, (кг/м); Q_y - перерезывающая сила, (Н).

При условии равенства нулю момента всех сил, приложенных к выделенному бесконечно малому элементу, нормальные силы дают члены большого порядка малости, вследствие чего имеем соотношение

$$Q_y = \frac{\partial M_z}{\partial x} \qquad (4)$$

где M_z – изгибающий момент (Н· м).

Воспользуемся дифференциальным уравнением упругой линии балки

$$M = EJ\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \qquad (5)$$

и выражение (3) принимает вид

$$m_0\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + EJ\frac{\partial^4 u_y}{\partial x^4} - P\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = 0, \qquad (6)$$

где J - осевой момент инерции поперечного сечения, м^4;

что отвечает теории Бернулли-Эйлера [15].

Считаем, что рассматриваемая балка (рис. 1), совершает гармонические колебания. Тогда, частные решения (6) в форме

$$u_{yr}(x,t) = v_r(x)\sin(\omega t + \varphi), \qquad (7)$$

относительно $v_r(x)$ можно представить в виде линейного дифференциального уравнения вида

$$EJv_r^{IV}(x) - Pv_r^{II}(x) - m_0\omega^2 v_r(x) = 0 \qquad (8)$$

В результате различного вида действия осевой силы P, форму колебаний балки $U_r(x)$, которая

характеризует закон изменения амплитуд перемещений, можно представить в виде

$$u_r(x) = sin\frac{\pi r}{l}x, \quad (9)$$

а $$v_r(x) = C_{2r}\sin\frac{\pi r}{l}x. \quad (10)$$

Тогда, с учетом этих выражений в (8) получим

$$EJ(\frac{\pi r}{l})^4 + P(\frac{\pi r}{l})^2 - m_0\omega^2 = 0 \quad (11)$$

Из выражения (11)

$$\omega^2 = \frac{EJ}{m_0}(\frac{\pi r}{l})^4 + \frac{P}{m_0}(\frac{\pi r}{l})^2 \quad (12)$$

или $$\omega^2 = \frac{\pi^4 r^4 EJ}{m_0 l^4}\left(1 + \frac{Pl^2}{\pi^2 r^2 EJ}\right). \quad (13)$$

Согласно [5,16,17], при r = 1, выражение

$$P_{кр.} = \frac{\pi^2 r^2 EJ}{l^2}, \quad (14)$$

соответствует предельному значению силы, т.е. эйлеровой нагрузке. Доказано, что при $P > P_{кр.}$, в рассматриваемой системе имеет место бифуркация, т.е. ее разрушение [15].

При действии на балку растягивающей силы имеем

$$\omega = \omega_0\sqrt{1 + \frac{P}{P_{кр.}}}, \quad (15)$$

где ω_0 – частота собственных колебаний балки, $\frac{1}{c}$.

В случае, когда к балке приложена сжимающая сила, то

$$\omega = \omega_0\sqrt{1 - \frac{P}{P_{кр.}}}, \quad (16)$$

Из чего следует, что при $P_{сж.} = P_{кр.}$, частота колебаний $\vartheta = 0$.

Выражение для определения величины осевых колебаний (ω_0) без действия определяется по выражению [17] и справедлива для балок с неподвижной шарнирной опорой и на упругом основании, [5,17] имеет

$$\omega_0 = \frac{\pi^2 r^2}{l^2}\sqrt{\frac{EJ}{m_0}}, \quad (17)$$

где E – модуль упругости пород непосредственной кровли – балки, Н/м^2.

Возвращаясь к вышеизложенному, следует отметить, что формула Эйлера дает истинное значение нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости рассматриваемой системы в случае, когда ее гибкость больше или равна предельной гибкости самой системы. Показатель последней зависит от модуля упругости пород непосредственной кровли, т.е. физико-механических свойств пород. Обычно потеря устойчивости системы сопровождается перемещениями, возникновением пластических деформаций или разрушением. Доказано [15,17], что возможны случаи, когда система потеряв устойчивость, переходит в режим колебаний.

На рис.3 представлена корреляция величины эйлеровой нагрузки от длины балки – пород непосредственной кровли. Кривая 1 характеризует границу бифуркации, за пределами которой находится зона неустойчивых пород (А). Отмечено, что при минимальной длине балки, рассматриваемая система в зависимости от действия усилий выдерживает максимальные значения максимальных нагрузок. С увеличением длины балки, статический прогиб последней увеличивается, а, следовательно, в таких условиях рассматриваемая система испытывает действие дополнительных нагрузок в виде изгибающих усилий. Зона А находится за переделами границы и характеризует зону неустойчивого состояния пород кровли, в результате действия различной направленности нагрузок. По сути, в зоне А, с момента наступления критического состояния до момента разрушения, деформации системы нарастают крайне быстро. Из этого следует, что при расчете на устойчивость пород непосредственной кровли, критическая нагрузка всегда будет подобна разрушающей в результате действия в них различных усилий (растягивающих, сжимающих, изгибающих).

Данный подход справедлив для балок с неподвижной шарнирной опорой или на упругом основании.

Теперь рассмотрим балку, лежащую на упругом основании типа Винклера [5,15,16]. Считаем, что в процессе колебаний балка не может оторваться от упругого основания (рис.1,*б*). Со стороны основания на колеблющуюся балку действует реакция

$$q_y(x,t) = -ku_y(x,t), \quad (18)$$

где k – коэффициент постели упругого основания.

Коэффициент постели упругого основания определяется исходя из рекомендаций [16].

Для рассматриваемой балки дифференциальное уравнение колебаний можно записать, согласно [5,15] в виде

$$m_0\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + EJ\frac{\partial^4 u_y}{\partial x^4} = q_y. \quad (19)$$

С учетом свободных колебаний балки выражение (20) принимает вид

$$m_0\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + EJ\frac{\partial^4 u_y}{\partial x^4} + ku_y = 0 \quad (20)$$

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

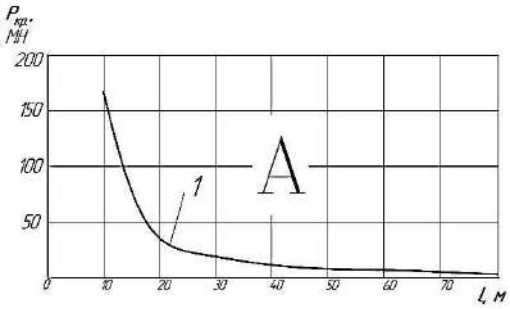


Рис. 3 - Изменение величины эйлеровой нагрузки ($P_{кр.}$, МН) от длины балки (l, м): А – зона неустойчивого состояния системы; кривая 1 – граница бифуркации

Полученное выражение описывает изгибные колебания подпружиненной балки модели Бернулли-Эйлера [15].

С учетом амплитуд перемещений

$$u_{yr}(x,t) = v_r(x)\sin(\omega t + \varphi) \qquad (21)$$

получим обыкновенное линейное дифференциальное уравнение

$$EJ v_r^{IV}(x) - (m_0\omega^2 - k)v_r(x) = 0 \qquad (22)$$

Или

$$v_r^{IV}(x) - \alpha_r^4 v_r(x) = 0, \qquad (23)$$

при условии, что

$$\alpha_r^4 = \frac{m_0\omega^2 - k}{EJ}. \qquad (24)$$

Следует отметить, что выражение (23) совпадает с видом уравнения свободных колебаний балки постоянного сечения [17]. Частными решениями этого выражения являются функции $ch\ \alpha_r x, sh\ \alpha_r x, \cos\alpha_r x$ и $\sin\alpha_r x$. Тем не менее, при исследовании колебаний балки, лежащей на упругом основании, за частные решения, целесообразно принимать функции А.Н. Крылова [15-17].

Рассмотрим случай, когда к концам рассматриваемой балки приложены растягивающие силы P (рис. 1б), тогда с учетом (11) дифференциальное уравнение свободных колебаний балки имеет вид

$$m_0\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + EJ\frac{\partial^4 u_y}{\partial x^4} - \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + k u_y = 0, \qquad (25)$$

а частное решение этого уравнения можно записать как

$$EJ v_r^{IV}(x) - P v_r^{II}(x) - (m_0\omega^2 - k)v_r(x) = 0. \qquad (26)$$

Учитывая форму колебаний

$$v_r(x) = C_{2r}\sin\frac{\pi r}{l}x, \qquad (27)$$

после соответствующих преобразований имеем

$$EJ(\frac{\pi r}{l})^4 + P(\frac{\pi r}{l})^2 - m_0\omega^2 + k = 0. \qquad (28)$$

окончательно получим

$$\omega = \omega_0\sqrt{\left(1 + \frac{P}{P_{кр.}}\right) + \frac{k}{m_0}}, \qquad (29)$$

А в случае действия сжимающей силы

$$\omega = \omega_0\sqrt{\left(1 - \frac{P}{P_{кр.}}\right) + \frac{k}{m_0}}. \qquad (30)$$

Учитывая то, что период колебательного движения рассматриваемой системы можно определить как [5,6]

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \qquad (31)$$

выполним расчеты для ее различного состояния, т.е. при различной длине балки – непосредственной кровли. Последняя имеет шарнирно-неподвижную опору или упругое основание. Вообще, колебательное свойство рассматриваемой системы не следует компаундировать с признаком периодичности, т.к. внезапно возникающие динамические нагрузки не обладает свойством тактовой повторяемости.

На рис. 4*а,б,в* приведены зависимости, отражающие изменение частоты и периода колебаний балки – непосредственной кровли от ее длины при различных видах опор и с учетом отсутствия или действия сжимающих (1*а*, 2*б*) (растягивающих 3*б*, 4*б*) усилий. Причем последние соответствовали величине P=0,6$P_{кр.}$.

Установлено, что во всех рассматриваемых случаях, с увеличением длины балки частота ее колебаний уменьшается, а период колебаний увеличивается. Такая тенденция имеет место и в случае свободного опирания балки, при отсутствии вдоль ее оси растягивающих или сжимающих усилий (рис. 4а). В случае, когда балка имеет неподвижную шарнирную опору (рис. 4б), и на нее действуют сжимающие или растягивающие усилия, частота и период колебаний такой балки в сравнимых условиях различается в 2 раза (рис. 4б). Для балки с опорой на закладочный массив, имеем условия, при которых частота и период колебаний совпадают, вне зависимости то того подвержена балка действию сжимающих или растягивающих усилий (рис. 4а).

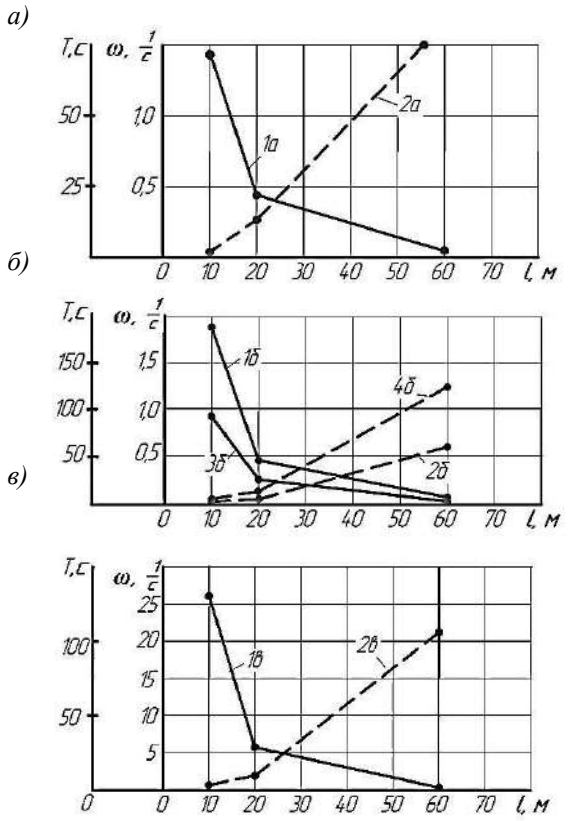


Рис. 4 - Изменение круговой частоты (ω $_0$, $\frac{1}{c}$) и периода, (T, c) колебания балки – непосредственной кровли от ее длины (l,м); а) с неподвижной шарнирной опорой и на упругом основании, без действия осевой силы: 1а, 2а – соответственно частота и период колебаний; б) с неподвижной шарнирной опорой, при действии сжимающих или растягивающих усилий, когда P=0,6$P_{кр.}$: 1б, 2б, 3б, 4б – соответственно частота и период колебаний при сжатии и растяжении; в) на упругом основании, при действии сжимающих или растягивающих усилий, когда P=0,6$P_{кр.}$: 1в, 2в – соответственно частота и период колебаний при сжатии и растяжении.

Теперь определим период колебаний рассматриваемой системы, когда нагрузка в виде обрушившихся боковых пород, движется вдоль балки (рис.4). Период свободных колебаний такой балки можно определить согласно [18]

$$T = \frac{1}{\omega}\sqrt{\frac{m}{m+m_k}}, \qquad (32)$$

где ω – частота колебаний, $\frac{1}{c}$; m – масса балки, кг; m_k – приведенная к середине балки масса обрушившихся пород, кг.

Значение m_k можно определить по выражению

$$m_k = -\frac{q_п l}{\pi}\left(cos\,\frac{\pi x_2}{l} - cos\,\frac{\pi x_1}{l}\right), \qquad (33)$$

где x_1, x_2 - координаты размещения обрушившихся пород на балке, м; $q_п$ – погонная нагрузка, Н/м.

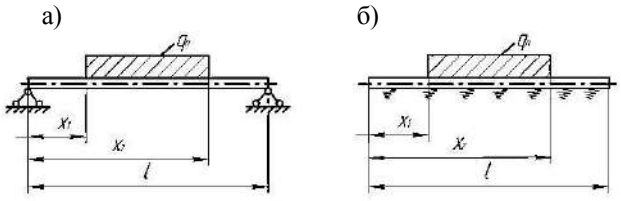


Рис. 5 – Схема к расчету периода колебаний для балки; а) с неподвижной шарнирной опорой; б) на упругом основании: l – длина балки, м; x_1, x_2 – координаты расположения обрушившихся пород, м; $q_п$ – погонная нагрузка, Н/м.

Частота колебаний в данном случае, определяется согласно [17]:

- для балки с неподвижной шарнирной опорой

как $$\omega = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{\delta_{ст.}}}, \qquad (34)$$

где $\delta_{ст.}$ – статический прогиб балки, м;

- для балки на упругом основании как

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m_k}}, \qquad (35)$$

где k – коэффициент упругого основания.

На рис. 6 представлена корреляция изменения периода колебаний балки – пород непосредственной кровли от ее длины. При этом учитывался вид опор и влияние движения обрушившихся пород вдоль балки. В результате выполненных исследований установлено, что при увеличении длины балки, период колебаний увеличивается.

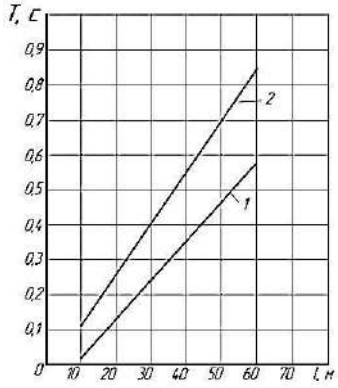


Рис. 6 – Изменение периода колебаний (T, c) балки – пород непосредственной кровли с учетом вариации длины (l, м): 1 – с неподвижной шарнирной опорой; 2 – на упругом основании.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Причем максимальные значения исследуемой величины, когда T=0,86сек, соответствует балке длиной *l*=60м, лежащей на упругом основании. Для балки такой же длины, но имеющей неподвижные шарнирные опоры, период колебаний составляет T=0,53сек, что почти на 30% меньше. Очевидно, объяснить это можно реакцией упругого основания на перемещения вдоль балки обрушившихся пород.

Далее рассмотрим движение точки тела, с учетом обрушившихся на балку боковых пород, при ее гармоническом возбуждении, когда тело вывели из состояния равновесия. Координаты точки тела в таких условиях можно определить по выражению [19,24,25]:

- для балки с неподвижной шарнирной опорой

$$x = \delta_{ст.} t \cdot sin\omega t, \quad (36)$$

где $\delta_{ст.}$ – статический прогиб балки, м;

- для балки на упругом основании

$$x = \frac{m_k}{2m\omega^2} t \cdot sin\omega t, \quad (37)$$

где $\omega = 2\pi\nu$ – угловая или круговая частота, $\frac{1}{с}$.

На рис. 7*а,б,в,г* представлены зависимости изменения координат точки тела в результате гармонических колебаний при различной длине балки – пород непосредственной кровли, которая опирается на неподвижную шарнирную опору (*а,б*) и на упругое основание - закладочный массив (*в,г*). Такие колебания представляют собой волновой процесс, распространяющийся в массиве с некоторой скоростью.

Анализируя результаты выполненных исследований, можно заключить, что отклонения координаты точки тела (*x*, м) от равновесного состояния для балки, имеющий неподвижную шарнирную опору при длине *l*=10м составляет *x*=0,003м, а для балки *l*=20м - *x*=0,12м (рис.7*а,б*). В случае, когда балки такой длины имеют под собой упругое основание - закладочный массив, отклонения составляют, соответственно, *x*=0,0004м и *x*=0,0055м.

На рис.8 балка длиной 60м (кривая 1), имея максимальный прогиб и неподвижную шарнирную опору, находится в наиболее худших условиях, чем балка, опирающаяся на закладочный массив (кривая 2). Изменение координат точек тела в случае, когда балка имеет неподвижную шарнирную опору, происходит скачкообразно, с резким отклонением от положения равновесия.

В случае, когда балка имеет упругое основание, изменение координат точек тела происходит плавно, с растяжкой во времени. Максимальные значения отклонений координаты точек тела от равновесного состояния составляют для случая 1 - *x*=1,5м, а для случая 2 - *x*=0,4м (рис.8). Объяснить это можно, прежде всего, откликом упругого полупространства, т.е. закладочного массива, на осциллирующую силу, приложенную к рассматриваемой системе.

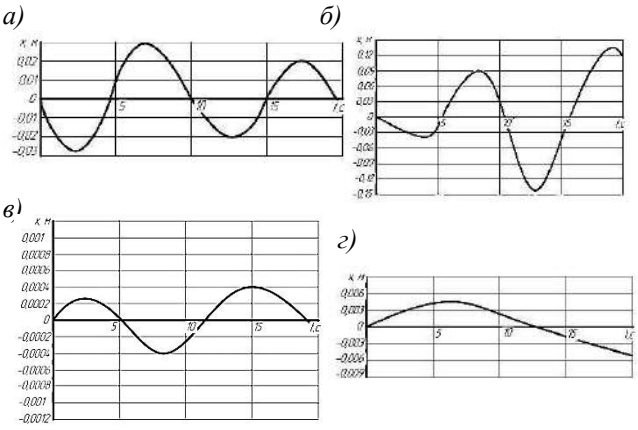


Рис. 7 - Изменение координат точки тела в результате гармонических колебаний при различной длине балки с неподвижной шарнирной опорой (а,б) и на упругом основании (в,г): а), в) l=10м, б), г) l=20м.

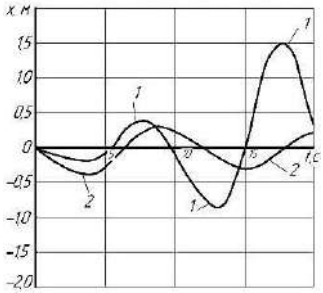


Рис. 8 - Изменение координат точки тела при длине балки l=60м с неподвижной шарнирной опорой (1) и на упругом основании (2)

Таким образом, при разработке угольных пластов на больших глубинах, в результате расслоения боковых пород, опасность возникновения аварийных ситуаций исходит от обвалов и обрушений пород кровли. С точки зрения геомеханики, при таком положении расслоившиеся породы непосредственной кровли изгибаясь, создают неблагоприятную геомеханическую обстановку в окрестности горных выработок. Очевидно, при определенных параметрах зависающей консоли и отсутствии эффективного подпора со стороны выработанного пространства, впоследствии внезапных обрушений боковых пород или осадки основной кровли, вероятность завала горных выработок возрастает. Применение закладки выработанного пространства или широких податливых полос, со стороны выработанного пространства, при минимальном отставании от очистного забоя, позволит существенно изменить геомеханическую обстановку в лучшую сторону.

Вывод

В сложных горно-геологических условиях разработки угольных пластов Донбасса с учетом

установленной динамики боковых пород при их внезапном обрушении, необходимо ориентироваться на способ управления кровлей полной закладкой выработанного пространства или (что предпочтительней из условий трудоемкости процесса) на применение широких податливых полос. Закладочный массив или податливые опоры, на которые опираются породы непосредственной и основной кровли в результате их расслоения, устраняют негативные явления, проявляющиеся в углепородном массиве при внезапных обрушениях боковых пород или посадке основной кровли. Такие решения позволят повысить устойчивость подготовительных выработок и, как следствие, снизить уровень травматизма горнорабочих от обвалов и обрушений.

Список литературы

1. **Левкин, Н. Б.** Предотвращение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины / **Н. Б. Левкин** // Монография. – Донецк: Донбасс, 2002. – 393 с.
2. **Николин, В. И.** Снижение травматизма от проявлений горного давления / **В. И. Николин, С. В. Подкопаев, А. В. Агафонов**. – Донецк: Норд-Пресс. 2005. – 232 с.
3. **Андрушко, В. Ф**. Управление кровлей в сложных горно-геологических условиях / **В. Ф. Андрушко, С. А. Саракитянц, Ю. Г. Спицын**. – К.:Техника, 1985.– 372с.
4. **Авершин, С. Г**. Сдвижение горных пород при подземных разработках. / **С. Г. Авершин** – М.: Углетехиздат, 1947. – 208с.
5. **Пановко, Я. Г**. Основы прикладной теории колебаний и удара / **Я. Г. Пановко** – Л.: Машиностроение, 1976.– 320 с.
6. **Richart, F. E.** Comparison of footing vibration tests with theory / **F. E. Richart, R. V. Whitman** // *J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE*. – 1967. – №93, 6. – P.143-168.
7. **Ehrler, O**. Nonlinear parameters of vibrating foundations / **O. Ehrler** // *J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE*. – 1968. – №94, 6. – P. 1091-1214.
8. **Novak Miles.** Prediction of footing vibrations / **Miles Novak** // *J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE*. – 1970. – №96, 3 – P. 837-861.
9. **Паппард, А.** Физика колебаний / **А. Паппард.** М.: Высшая школа, 1985. – 456 с.
10. **Зборщик, М. П.** Механизм повышения устойчивости кровли в лавах при применении закладки выработанного пространства / **М. П. Збощик, С. В. Подкопаев** // *Уголь Украины*. – 1992. - №5. – с. 20-23.
11. **Пугач, И. И.** Исследования устойчивости боковых пород в сложных горно-геологических условиях / **И. И. Пугач, С. В. Подкопаев, И. В. Иорданов, Д. А. Чепига** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Х.: НТУ «ХПІ». 2016. – №42(1214) – с. 111-116. doi:10/20998/2416-4295.2016.42.18
12. **Жирнов, Н. И**. Классическая механика / **Н. И. Жирнов** – М.: Просвещение, 1980. – 303с.
13. **Бидерман, В. Л**. Теория механических колебаний / **В. Л. Бидерман.** – М: Высшая школа, 1980. – 408с.
14. **Раус, Э.** Динамика системы твердых тел. Т.1 / Под ред. **Ю. А. Архангельского, В. Г.Демина**. – М.: Наука, 1983. – 464 с.
15. **Циглер, Ф**. Механика твердых тел и жидкостей / **Ф. Циглер** – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 912 с.
16. **Тимошенко, С. П**. Сопротивление материалов.Т.2. / **С. П. Тимошенко** – М.: Наука, 1965. – 480 с.
17. **Тимошенко, С. П**. Колебания в инженерном деле / **С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Унвер** – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.
18. **Бондарь, Н. Г.** Динамика железнодорожных мостов / **Бондарь Н. Г., Казей И. И., Лесохин Б. Ф**. – М.; Транспорт, 1965. – 416 с.
19. **Смолин, И. Ю**. Аналитическая динамика и теория колебаний / **И. Ю. Смолин, В. В. Караулов** – Томск: Томский гос. ун-т, 2012. – 172 с.
20. **Джонсон, К.** Механика материалов / **К. Джонсон** – СПб: Изд-во «Лань», 2002. – 672 с.
21. **Adarwal, R. P.** Discrete Oscillation Theory / **R. P. Adarwal, M. Bohner, S. R. Gracw, D. O`Regan** // *Hindwai Publishing Corporatio*n. – 2005. – 951 p.
22. **Baddaour, N.** Recent Advances in vibrations Analysis / **Baddaour N.** Rijeka, Croatia, 2011. – 236 p.
23. **Ebrahimi, F.** Advances in Vibration / analisis Research / **F. Ebrahimi**. – InTech, 2011. – 456 p.
24. **Bottega, W. I.** Engineering Vibrations / **W. I. Bottega**. – CRC Press, Taylor Francis Group, 2006. – 727p.
25. **Meirovitch, L.** Fundamentals of Vibrations / **L. Meirovitch**. Mc Graw-Hill, 2001 – 806 p.

Bibliography: (transliterated)

1. **Levkin, N. B.** Predotvraschenie avariy i travmatizma v ugolnyih shahtah Ukrainyi. Monografiya. Donetsk: Donbass, 2002, 393 p.
2 **Nikolin, I. V. Podkopaev, S. V., Agafonof, A. V.** Snizhenie travmatizma ot projavlenij gornogo davlenija. Doneck: Nord-Press. 2005, 232 p.
3. **Andrushko, V. F., Sarakitjanc, S. A., Spicyn, Ju. G.** Upravlenie krovlej v slozhnyh gorno-geologicheskih uslovijah. K.: Tehnika, 1985, 372 p.
4. **Avershin, S. G.** Sdvizhenie gornyih porod pri podzemnyih razrabotkah. M.: Ugletehizdat, 1947, 208 p.
5. **Panovko, Ya. G.** Osnovyi prikladnoy teorii kolebaniy i udara. L.: Mashinostroenie, 1976, 320 p.
6. **Richart, F. E., Whitman, R. V.** Comparison of footing vibration tests with theory. *J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE*, 1967. № **93**, 6, 143-168.
7. **Ehrler, O**. Nonlineer parameters of vibrating foundations. *J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE*, 1968. **94**, 6, 1091-1214.
8. **Novak Miles.** Prediction of footing vibrations. *J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE*, 1970. **96**, 3, 837-861.
9. **Pappard, A.** Fizika kolebaniy. M.: Vyisshaya shkola, 1985, 456 p.
10. **Zborshhik, M. P**., **Podkopaev, S. V.** Mehanizm povyshenija ustojchivosti krovli v lavah pri primenenii zakladki vyrabotannogo prostranstva // *Ugol' Ukrainy*, 1992, № **5**, 20-23.
11. **Pugach, I., Podkopaev, S., Iordanov, I., Chepiga, D.** Investigation of the stability of wall rocks in difficult mining and geological conditions. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **42** (1214), 111-116, doi: 10/20998/2416-4295.2016.42.18.
12. **Zhirnov, N. I.** Klassicheskaya mehanika. M.: Prosveschenie, 1980, 303 p.
13. **Biderman, V. L.** Teoriya mehanicheskih kolebaniy. M: Vyisshaya shkola, 1980, 408 p.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

14. **Raus, E.** Dinamika sistemyi tverdyih tel. T.1. Pod red. Yu. A. Arhangelskogo, V. G. Demina. M.: Nauka, 1983, 464 p.
15. **Tsigler, F.** Mehanika tverdyih tel i zhidkostey. Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2002, 912 p.
16. **Timoshenko, S. P.** Soprotivlenie materialov. T.2. M.: Nauka, 1965, 480 p.
17. **Timoshenko, S. P., Yang, D. H., Unver, U.** Kolebaniya v inzhenernom dele. M.: Mashinostroenie, 1985, 472 p.
18. **Bondar, N. G., Kazey, I. I., Lesohin B. F.** Dinamika zheleznodorozhnyih mostov. M.; Transport, 1965, 416 p.
19. **Smolin, I. Yu., Karaulov, V. V.** Analiticheskaya dinamika i teoriya kolebaniy. – Tomsk: Tomskiy gos. un-t, 2012, 172 p.
20. **Dzhonson, K.** Mehanika materialov. SPb.: Izd-vo «Lan», 2002, 672 p.
21. **Adarwal, R. P., Bohner, M., Gracw, S. R., O`Regan D.** Discrete Oscillation Theory. *Hindwai Publishing Corporation*. 2005. 951 p.
22. **Baddaour, N.** Recent Advances in vibrations Analysis. Rijeka, Croatia, 2011. 236 p.
23. **Ebrahimi, F.** Advances in Vibration /analisis Research. InTech, 2011. 456 p.
24. **Bottega W. I.** Engineering Vibrations. CRC Press, Taylor Francis Group, 2006. 727 p.
25. **Meirovitch, L.** Fundamentals of Vibrations. Mc Graw-Hill, 2001 – 806 p.

Сведения об авторах (About authors)

Коломиец Владимир Алексеевич – директор, шахтоуправление «Южнодонбасское №1», г. Угледар, Украина; e-mail: ugnodon1@gmail.ru.

Vladimir Kolomiets – manager, mine management «Yuzhnodonbasskoe №1», Ugledar, Ukraine; e-mail: ugnodon1@gmail.ru.

Чепига Дарья Анатольевна – аспирант кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина; e-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua.

Daria Chepiga – graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua.

Иорданов Игорь Вячеславович – кандидат технических наук, соискатель кафедры «Охрана труда», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина; e-mail:gendir@eme.kiev.ua.

Igor Iordanov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Applicant, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: gendir@eme.kiev.ua.

Власенко Николай Николаевч – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая инженерия», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина; e-mail:nikola_v@mail.ru.

Nikolay Vlasenko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail:nikola_v@mail.ru.

Александров Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина, e-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua.

Sergey Aleksandrov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Коломиец, В. А. О динамике боковых пород при их внезапном обрушении / **В. А. Коломиец, Д. А. Чепига, И. В. Иорданов, Н. Н. Власенко, С. С. Александров** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229) . – С. 64-72. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.09.

Please cite this article as:

Kolomiets, V., Chepiga, D., Iordanov, I., Vlasenko, N., Aleksandrov, S. About dynamics of side rock in their sudden collapse. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 64–72, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.09.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Коломієць, В. О. Про динаміку бічних порід при їх раптовому обваленні / **В. О. Коломієць, Д. А.Чепіга, І. В. Іорданов, М. М. Власенко, С. С. Александров** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ» . – 2017. – № 7 (1229) . – С. 64-72. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.09.

АНОТАЦІЯ В результаті проведених аналітичних досліджень, з метою вивчення динаміки бічних порід при їх раптовому обваленні, отримані залежності зміни частоти, періоду коливань і координат точок тіла (балки - безпосередньої покрівлі) у випадку спирання на нерухому шарнірну опору і на пружну основу. Зроблено висновок, що при розробці пластів в складних гірничо-геологічних умовах на великих глибинах краще застосовувати повну закладку виробленого простору або широкі податливі смуги, що дозволить знизити рівень травматизму гірників.

Ключові слова: травматизм; гірничий тиск; коливання; динаміка бічних порід; закладний масив; піддатлива опора

Поступила (received) 03.03.2017

УДК 629.4.027 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.10

ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЇ КОРПУСА БУКСИ НА РЕСУРС ПІДШИПНИКІВ ВАГОНІВ

І. Е. МАРТИНОВ, А. В. ТРУФАНОВА, Н. С. АУЛОВА*

Кафедра «вагонів», Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, УКРАЇНА
**email: nadezhdaaulova@gmail.com*

АНОТАЦІЯ *Багаторічний досвід експлуатації на залізницях України циліндричних буксових підшипників свідчить, що вони мають недостатню надійність. Фактична довговічність залізничних буксових підшипників суттєво менше за розрахункову. Однією з причин є нерівномірне розподілення навантаження як між тілами кочення, так і уздовж твірної роликів. Перспективним напрямком розв'язання цієї проблеми може бути забезпечення раціонального розподілення навантаження на підшипники буксового вузла шляхом створення змінної жорсткості корпусу букси в різних напрямках та надання можливості самовстановлення колісної пари під час руху вагона, особливо на кривих ділянках колії.*
Ключові слова: *буксовий вузол; вантажний вагон; циліндричний підшипник; надійність; довговічність; корпус*

INFLUENCE OF A DESIGN OF AN AXLE BOX ON THE RESOURCE OF BEARINGS

I. E. MARTYNOV, A. V. TRUFANOVA, N. S. AULOVA

Department of vagons, Ukraine State University of Railway Transport, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT *Long experience of exploitation of cylindrical axle bearings on Ukrainian railways shows that reliability of these bearings is low. Real durability of these bearings is muck lower than a calculated durability. One of the reasons is an uneven load distribution, both between rolling elements and along a generatrix. A promising way to solve this problem is to ensure a rational load distribution on the bearings by creating an axle box housing with a variable hardness in different directions and granting to a wheelset an ability of self-alignment during the movement of the wagon, especially on track transition curves. Improvement of safety the Railways in Ukraine can be achieved through the modernization less reliable elements of cars in order to eliminate failures in operation. In this article issues of improving axle boxes of wagon. Analysis of international experience of design and operation of the axle unit bearings suggests that one way to improve the reliability roller bearings may be changing the body of the box. The article analyses scientific publications relevant to the forces acting on the bearing of rolling stock and focuses on the axle-box heating process. The purpose of the research is to determine reasons for a change in the heating temperatures variations and tendencies a depending of the of different axle-boxes of rolling stock.*
Keywords*: axle unit; goods wagon; cylindrical axle; reliability; durability; housing*

Вступ

Забезпечення конкурентоспроможності залізничного транспорту в умовах корінної перебудови економіки країни є важливим завданням науковців та фахівців вітчизняних залізниць. Одним з шляхів вирішення цієї задачі є зниження витрат на утримання вантажних вагонів в експлуатації з метою зменшення собівартості перевезень. З урахуванням того, що переважна більшість вантажних вагонів вже вичерпала свій ресурс і використовується з подовженим терміном експлуатації, витрати матеріальних та трудових ресурсів на підтримання вагонного парку у працездатному стані досягають суттєвих величин.

Постановка проблеми

Безперебійне постачання вантажів споживачам залежить від багатьох факторів, найголовнішим з яких є надійна робота рухомого складу. Не останню роль в забезпеченні надійності відіграє безвідмовна робота буксових вузлів з підшипниками кочення.

Буксовий вузол є одним із найбільш відповідальних елементів ходових частин вагонів, несправність або відмова якого загрожує безпеці руху поїздів. Проблемою сучасних буксових вузлів залишається виникнення їх надмірного нагріву на шляху прямування [1,2,3]. В різні роки на українських залізницях частка відчеплень вагонів на шляху прямування через надмірний нагрів буксових вузлів досягала 60-70 % від загальної кількості відчеплень. До цієї кількості необхідно додати також тисячі випадків відмов буксових вузлів, своєчасно виявлених засобами технічного контролю або оглядачами вагонів за зовнішніми ознаками [4].

Це досить переконливо свідчить про те, що існуюча конструкція буксового вузла з двома циліндричними роликовими підшипниками на гарячій посадці, яка експлуатується на протязі багатьох років на залізницях країн СНД, має недостатню надійність та не забезпечує сучасні умови експлуатації [5,6]. Тому підвищення надійності буксових вузлів залишається вкрай актуальним завданням.

© І. Е. МАРТИНОВ, А. В. ТРУФАНОВА, Н. С. АУЛОВА, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Багато вчених на протязі десятиліть приділяли увагу надійності буксових вузлів. Так, основи теорії розрахунку довговічності підшипників кочення були запропоновані В. Вейбуллом [7] в 1939 р. і одержали подальший розвиток в дослідженнях А. Пальмгрена і Г. Лундберга [8]. Але застосування цієї теорії стосовно залізничних буксових циліндричних підшипників дає результати, які суттєво відрізняються від даних експлуатації. Так, згідно [9] середній строк служби підшипників повинен перевищувати 40 років, а фактично він не перевищує 10 років [10].

Довговічність підшипників кочення залежить від величини контактних напружень, що виникають в зоні контакту роликів та доріжок кочення. Особливість конструкції буксового вузла і сполученої зони з бічної рамою візка полягає в тому, що при експлуатації неминучим є знос корпусу букси, буксового прорізу бокових рам візка і появи при цьому значних зазорів. При русі вагона це призводить до виникнення додаткових коливань візків, забігання бокових рам одна відносно іншої, перенавантаження однієї з букс, що може викликати нерівномірне навантаження на корпус буксового вузла, перекошування кілець буксових підшипників та інші несправності [11]. Відповідно при експлуатаційному перекошуванні кілець контактний тиск розподіляється по доріжкам кочення нерівномірно [12]. Комбіноване (радіальне та осьове) навантаження буксового вузла суттєво впливає на кінематику та динаміку його елементів: вздовж лінії контакту роликів з доріжками кочення кілець підшипника з'являється концентрація радіального навантаження через не співвісність кілець, а по торцях роликів, контактуючих з бортами кілець, виникають значні осьові сили тертя [13, 14, 15]. За умов сприймання такого навантаження найбільші значення напруження виникають на кінцях твірної ролика [16]. Існуюча методика визначення еквівалентного навантаження на буксовий вузол не враховує особливості передачі та розподілення навантаження, умови експлуатації вантажних вагонів, а також тип вантажного вагону та особливості його конструкції.

Згідно з [17] розрахунковий ресурс роликових підшипників залежить від базової динамічної вантажопідйомності та еквівалентного навантаження, що діє на підшипники. Для уточнення результатів запроваджують ряд поправочних коефіцієнтів, які враховують вплив мастильних матеріалів та умов роботи буксового вузла.

Величина динамічної вантажопідйомності встановлюється на підставі розрахунків або випробувань виробниками підшипників.

Еквівалентне навантаження, що діє на підшипники, визначається за наступною формулою:

$$P_e = (X \cdot V \cdot F_r + Y \cdot F_a)\, K_T \cdot K_б, \qquad (1)$$

де X, Y – коефіцієнти відповідно радіального і осьового навантажень; V – коефіцієнт обертання; F_r – радіальне навантаження, кН; F_a – осьове навантаження, кН; K_T – температурний коефіцієнт; $K_б$ – коефіцієнт безпеки (динамічний).

У роботі [10] для розрахунку еквівалентного навантаження пропонується прийняти припущення, що в експлуатації осьові сили відсутні і на буксові вузли вони не діють, тому формула для визначення еквівалентного навантаження матиме наступний вигляд:

$$P_e = F_r \cdot K_T \cdot K_б, \qquad (2)$$

При цьому вважається, що буксовий вузол завантажений по класичній схемі: найбільш навантаженим є верхній ролик, центр якого розташований у напрямку радіального навантаження, що діє на підшипник, а навантаження на інші ролики зменшується пропорційно косинусу кута між напрямними сили та прямою, що з'єднує центр ролика з центром підшипника.

Але стосовно залізничних буксових підшипників така схема не відповідає дійсності [18, 19]. Радіальне навантаження, що діє на буксовий вузол, розподіляється між підшипниками нерівномірно. Неоднакове навантаження рядів роликів знижує загальний строк служби підшипників та підвищує частоту їх замін у ремонтах. На нерівномірність розподілу радіального навантаження між парними підшипниками впливають перш за все особливості конструкції букси (або пристроїв, що передають зусилля від рами візка на підшипники), деформації шийки осі колісної пари, жорсткість ресорного підвішування, точність виготовлення та монтажу елементів і осьові навантаження колісної пари.

З підвищенням швидкостей руху та особливостей його завантаженості, існуючий буксовий вузол не відповідає умовам забезпечення надійного та безперебійного перевезення вантажів. Це може призвести до вибору вантажовласниками іншого виду перевезень. Саме тому вагомою задачею працівників залізничного транспорту є проведення досліджень щодо модернізації рухомого складу та безпосередньо удосконалення буксових вузлів вагонів.

Треба зазначити, що при розгляді питань підвищення довговічності буксових підшипників основна увага приділялася безпосередньо удосконаленню конструкції та технології виготовлення самих підшипників. Питання оптимізації конструкції корпусів букс для забезпечення рівномірного розплавлення навантажень приділялось недостатньо уваги.

Основна мета та задача дослідження

Метою даної роботи є аналіз впливу різних конструкцій корпусів букс на довговічність буксових підшипників.

Основна частина дослідження

Напрямки досліджень оптимізації розподілу радіального навантаження на тіла кочення в підшипниках букс вантажних вагонів можна поділити таким чином:

- вибір раціональної форми контакту бокової рами візка та корпусу букси;
- вибір раціональної форми безпосередньо корпусу букси;
- внесення змін в конструкцію тіл кочення та кілець підшипників.

У подальшому будемо розглядати питання удосконалення конструкції корпусу букси, які, в свою чергу, можна поділити на такі основні напрямки:

- придання зводу корпусу у середній частині більшої жорсткості;
- зменшення відстані між приливами;
- застосування зводу зі змінним перетином.

Так, одним з шляхів удосконалення конструкції корпуса букси є введення у його конструкцію отворів та порожнин різної конфігурації.

Прикладом такої модернізації є буксовий вузол з проточками у корпусі (адаптері), що виконані похилими відносно його повздовжньої осі та рівномірно розташовані від центра прикладення навантаження (рис.1). Здатність металу пружно деформуватись призводить до виникнення у опорного сідла пружних властивостей, що зменшує динамічну взаємодію на підшипники та покращує умови їх роботи [20].

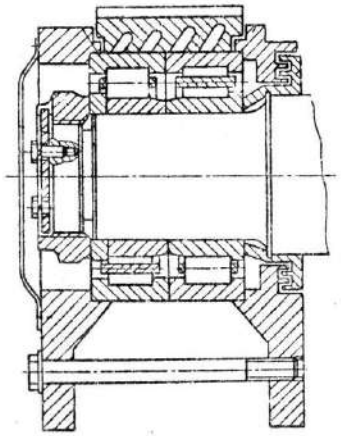


Рис. 1 – Буксовий вузол з проточками

До цього ж напрямку відноситься буксовий вузол з двома повздовжніми прорізами у верхньому зводі корпуса букси (рис. 2). Ролики за кожен оборот потрапляли у навантажену зону та отримані навантаження зростають від нуля до максимального значення і далі знову знижуються до нуля. Додаткові прорізи забезпечують більш сприятливе навантаження роликів [21].

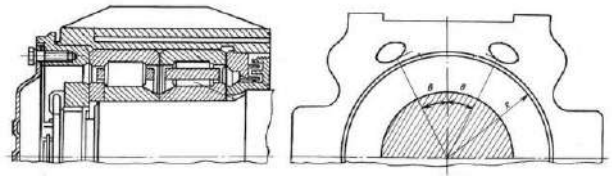


Рис. 2 – Буксовий вузол з прорізами у верхньому зводі корпуса

Запропонована конструкція букси з арочним сприйманням вертикального навантаження (рис. 3) відрізнялася тим, що у суцільнометалевому корпусі у зоні навантаження підшипників була виконана ділянка у вигляді отвору, що відділяла звід корпуса від навантаженої арки.

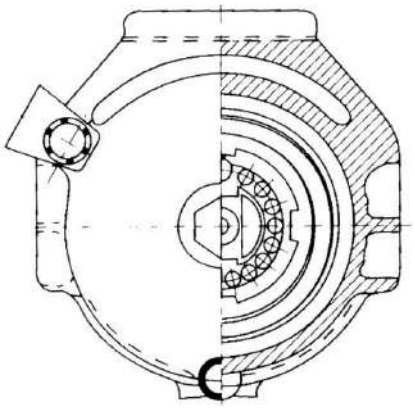


Рис. 3 – Буксовий вузол з вільною ділянкою у верхньому зводі корпуса

Арка у цій буксі виконує роль адаптера, сприймає статичні та динамічні навантаження та передає їх на бокові стінки букси. Звід корпуса охоплює зовнішні кільця за рахунок чого у роботі задіяне більше число роликів. При таких умовах відбувається плавний вхід роликів у зону навантаження, яке рівномірно розподіляється між роликами. Зовнішнє навантаження не передається безпосередньо на звід корпусу, що виключає крайове навантаження роликів при маятниковому коченні бокових рам візків [22].

Але ці пропозиції щодо зміни в конструкціях буксових вузлів не дістали подальшого розвитку. Недоліком цих конструкцій є збільшена трудомісткість виготовлення. Крім того, такі проточки можуть стати джерелом концентрації напружень.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Іншим напрямом удосконалення конструкції буксового вузла є використання пружних елементів.

На початку 80-х років XX сторіччя була запропонована конструкція буксового вузла з еластичною прокладкою, розташованою між адаптером та зовнішнім кільцем [23]. Передбачалось, що ця прокладка забезпечує суттєве поліпшення силових режимів роботи, більш рівномірне розподілення навантаження як між роликами підшипників, так і вздовж твірної. Крім того відбувалась компенсація відхилення від геометрії опорних поверхонь буксового вузла (рис. 4).

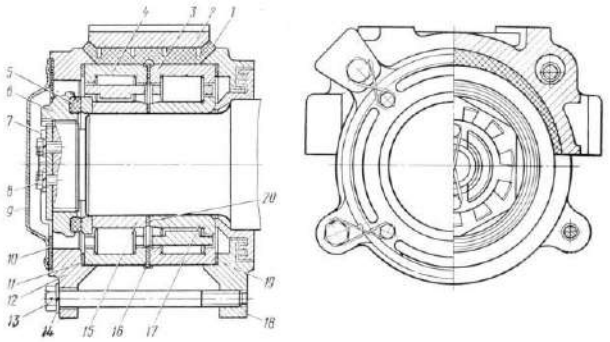


Рис. 4 – Буксовий вузол з еластичною прокладкою

Подібний ефект забезпечував й буксовий вузол з пружним елементом, що встановлювався у отворі на корпусі. У такому буксовому вузлі пружний елемент міг виконуватись з почергово розташованих гумових та металевих пластин (рис. 5). Навантаження від рами візка на буксовий вузол передавалося через пружний елемент, причому елемент деформувався за довжиною та шириною під час експлуатації, сприяючи тим самим оптимальному розподіленню навантажень по елементам буксових вузлів [24].

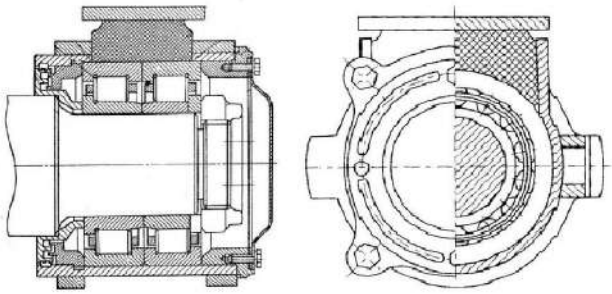


Рис. 5 – Буксовий вузол з пружною прокладкою

Розглядалася ще одна конструкція буксового вузла, в якій між опорною подушкою букси та підшипниками була розміщена пружна еластична прокладка для компенсації непаралельності опорних поверхонь підшипників при пружно зігнутій осі колісної пари (рис. 6) [25].

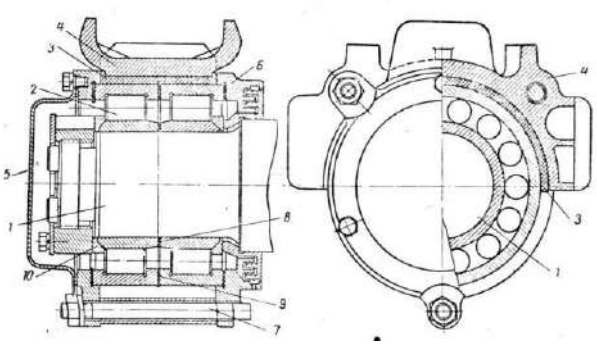


Рис. 6 – Буксовий вузол з пружною еластичною прокладкою

Але експлуатаційні випробування буксових вузлів з пружними елементами показало, що під час експлуатації низька міцність гуми та нестабільність її властивостей суттєво впливали на працездатність буксового вузла та його теплові режими. Часта заміна гумових елементів у буксових вузлах виявилась економічно недоцільною та від застосування буксових вузлів з пружними гумовими елементами відмовились.

Під час експлуатації вагону передача навантаження від бічної рами візка на буксовий вузол здійснюється через плоский контакт рами та букси. Це впливає на нерівномірне розподілення навантаження між тілами кочення у буксовому вузлі. Тому іншим напрямом підвищення довговічності буксових підшипників є застосування в конструкції буксового вузла ребер жорсткості, приливів та змінного перетину самого зводу.

Використання букси з корпусом у вигляді полого циліндру, верхній звід якого (адаптер) має змінну товщину (20-28 мм), а вертикальні сили передаються на бокові ребра (рис. 7), призвело до більш рівномірного розподілення навантаження між роликами. Такий корпус має бокові та вертикальні приливи для обмеження зміщень відносно бокової рами візка [22].

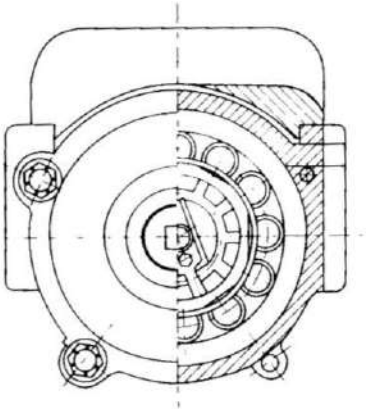


Рис. 7 – Буксовий вузол з корпусом у вигляді полого циліндру

Між корпусом адаптера і верхнім зводом корпуса букси є зазор, що попереджає деформацію зводу. Верхня опорна поверхня адаптера була виконана плоскою, що забезпечувало сприятливі умови взаємодії з плоскою опорою буксового отвору бокової рами у візку моделі 18-100.

Інша конструкція, представлена на рис. 8, виконана з двома прямокутними приливами по краях зводу в зоні навантаження роликів. Ці приливи розташовуються за всією довжиною корпуса і є опорними поверхнями для передачі навантаження від бокової рами. По бокам букса оснащена приливами, що взаємодіють зі щелепними напрямними бокової рами візка.

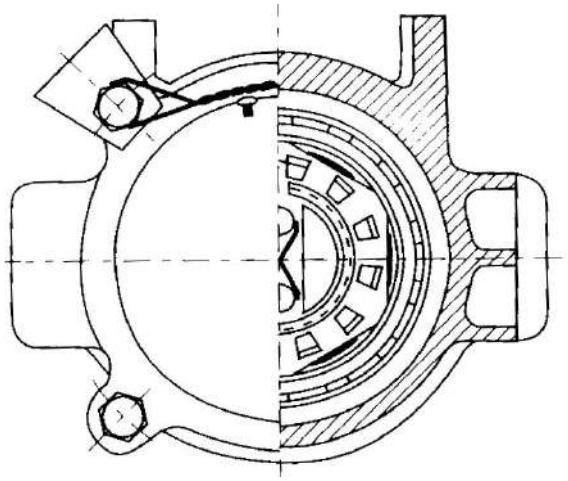


Рис. 8 – Буксовий вузол, що має корпус з прямокутними приливами

Для придання зводу корпуса букси однакової жорсткості за його довжиною над лабіринтовою частиною була виконана виточка. Дослідженнями встановлено, що у такому корпусі ролики, що знаходяться у центрі дії радіального навантаження, навантажені менше, ніж суміжні з ним. При цьому навантаження, що приходиться на розташований в цьому місці ролик, було на 12-16 % менше в порівнянні з розрахунковим [22].

Істотним недоліком даної конструкції є забезпечення раціонального розподілення лише радіального навантаження між роликами підшипника. Крім того, при русі підшипника ролик спочатку входе в зону навантаження під дією великої сили, після чого навантаження зменшується, потім знову сягає максимуму і потім падає до нуля. Пульсуюче навантаження призводить до проковзування підшипників та спричиняє більш інтенсивне зношування кілець підшипників і сепаратора.

Висновки

Фактична довговічність залізничних буксових підшипників суттєво менше за розрахункову. Однією з причин є нерівномірне розподілення навантаження як між тілами кочення, так і уздовж твірної роликів. Перспективним напрямком розв'язання цієї проблеми може бути забезпечення раціонального розподілення навантаження на підшипники буксового вузла шляхом створення змінної жорсткості корпусу букси в різних напрямках та надання можливості самовстановлення колісної пари під час руху вагона, особливо на кривих ділянках колії.

Список літератури

1 **Deshmukh, B. D.** Study of Failure Modes of Rolling Bearings: A Review / **B. D. Deshmukh, N. D. Moundecar** // *Journal of Modern Engineering Research.* – 2014. – № 1. – P. 139-145.

2 **Lunys, O.** Investigation on features and tendencies of axle-box heating / **O. Lunys, S. Dailydka, G. Bureika** // *Transport Problems*. – 2015. –№ 1. – P. 105-114.

3 **Lunys, O.** Riedmenų ašidėžių kaitimo temperatūrų kitimo tendencijos / **O. Lunys, R. Subačius** // *Mokslas – Lietuvos Ateitis. Transportas*. – 2012. – №.4. – P. 361-365. doi: 10.3846/2000-M

4 **Мартинов, І. Е.** Технічний стан буксових роликопідшипників вантажних вагонів / **І. Е. Мартинов** // *Харківська державна академія залізничного транспорту. Зб. наук. праць.* – Харків, 2000. – Вип. 41. – С. 38-42

5 **Мотовилов, К. В.** Эксплуатационная надежность буксовых узлов вагонов. / **К. В. Мотовилов, С. В. Перов, И. Э. Мартынов.** // *Проблемы повышения безопасности движения на железнодорожном транспорте. Межвуз. сб. науч. тр*. – М.: МИИТ. – 1988. – С. 92-99.

6 **Weibull, W.** A Statistical Theory of the Strength of Materials / **W. Weibull** // *Acta Polytechnica, Mechanical Engineering Series*. – Proc. Royal Swedish Academy of Engineering Sciences – 1939. – №151. – P. 45.

7 **Мартынов, И. Э**. Анализ опыта эксплуатации цилиндрических роликоподшипников букс грузовых вагонов / **И. Э. Мартынов** // *Вісник Східноукраїнського державного університету*. – 2000. – №5 (27). – С. 157-159.

8 **Цюренко, В. Н.** Опыт эксплуатации вагонов с буксовыми узлами на подшипниках качения / **В. Н. Цюренко** // *Пути совершенствования конструкций буксовых узлов вагонов с подшипниками качения: Труды ВНИИЖТ*. – М.: Транспорт, 1982. – Вып. 654. – С.4-26.

9 **Цюренко, В. Н.** Надежность роликовых подшипников в буксах вагонов / **В. Н. Цюренко, В. А. Петров** – М.: Транспорт, 1982. – 96 с.

10 **Lundberg, G.** Palmgren A. Dynamic Capacity of Rolling Bearings / **G. Lundberg, A. Palmgren** // *ActaPolitechnica, Mechanical Engineering Series*. – 1947. – №3.

11 **Lunys, O.**. Reiedmenu asideziu šilumokatios procesal vaziujant gelezinkelio kreivemis / **O. Lunys, G. Bureika** // *Mokslas – Lietuvos ateitis* – 2013. – № 5. – P. 552-557. – doi: 10.3846/mla.2013.87

12 **Матюшин, С. И**. Влияние перекоса роликов на расчетную долговечность буксовых подшипников /

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

С. И. Матюшин // *Повышение надежности и эффективности эксплуатации и ремонта вагонов: Труды ВНИИЖТ*. –М.: ВЗИИТ, 1984. – Вып. 122. – С. 39-47.

13 **Мартинов, І. Е.** Технічний стан буксових роликопідшипників вантажних вагонів / **І. Е. Мартинов** // *Харківська державна академія залізничного транспорту. Зб. наук. праць*. –2000. – Вип. 41. – С. 38-42.

14 **Гайдамака, А. В.** Проблемы повышения долговечности роликоподшипников буксовых узлов / **А. В. Гайдамака** / *Залізничний транспорт України*. – 2001. –№1. – С. 17-18.

15 **Гайдамака, А. В.** Надійність циліндричних роликопідшипників букс вагонів і локомотивів / **А. В. Гайдамака** // *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. – Харків, 2013.– Вип. 139. – С. 103-111.

16 **Ільчишин В. М**. Аналіз напруженого стану здвоєного касетного циліндричного підшипника буксового вузла вантажного вагона / **В. М. Ільчишин** // *Вісник Східноукраїнського державного університету. Науковий журнал*. – 2014. – №3 (210). Ч. 1 – С. 156-159.

17 ГОСТ 18855-94. Подшипники качения. Динамическая расчётная грузоподъёмность и расчётный ресурс (долговечность) Введ. 01 – 01 – 1997. – Изд-во стандартов 1996. – 19 с.

18 **Ioannides, E.** The SKF formula for rolling bearing life / **E. Ioannides, E. Berling, A. Gabelli** // *Evolution*. – 2001. – №1. – P. 25-28.

19 **Shimizu, S.** Fatigue Limit Concept and Life Prediction Model for Rolling Contact Machine Elements / **S. Shimizu** // *Tribology Transactions*. – 2002. –№1. – P. 39-46.

20 Пат. 1574502 СССР, МПК B 61 F 15/12 Буксовый узел рельсового транспортного средства / **И. Э. Мартынов** ; заявитель и патентообладатель Московский институт инженеров железнодорожного транспорта. – № 4427863/27-11; заявл. 19.05.88; опубл. 30.06.90, Бюл. № 24. – 3 с.

21 Пат. 1444206 СССР, МПК B 61 F 15/12 Роликовая букса железнодорожного транспортного / **О. М. Савчук, Н. А. Пастернак, В. В. Соборницкая** [и др.]; заявитель и патентообладатель Днепропетровский институт инженеров железнодорожного транспорта. – № 4133118/27 – 11; заявл. 09.10.86; опубл. 15.12.88, Бюл. № 46. – 3 с.

22 **Морчиладзе, И. Г.** Совершенствование и модернизация буксовых узлов грузовых вагонов / **И. Г. Морчиладзе, А. М. Соколов** // Железные дороги мира. – 2006. №10 – С. 59-64.

23 Пат. 547372 СССР, МПК[2] B 61 F 15/12 Буксовый узел железнодорожного вагона / **В. В. Абашкин, Г. Г. Попов**; заявитель и патентообладатель Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. – № 1464795/11; заявл. 03.08.70; опубл. 29.07.77, Бюл. № 7. – 4 с.

24 Пат. 685537 СССР, МПК[2] B 61 F 15/12 Буксовый узел / **А. Т. Головатый, Б. З. Акбашев, Н. Д. Ершов** [и др.]; заявитель и патентообладатель Проектно-конструкторское бюро Главного управления вагонного хозяйство Министерства путей сообщения СССР и Всесоюзный научно-исследовательский институт вагоностроения. – № 2583934/27 – 11; заявл. 23.02.78; опубл. 15.09.79, Бюл. № 34. – 3 с.

25 Пат. 241496 СССР, МПК[2] B 61 F 15/12 Буксовый узел для железнодорожных вагонов / **В. В. Абашкин, П. И. Травин**; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. – № 820131/27 – 11; заявл. 12.11.63; опубл. 21.09.72, Бюл. № 28. – 3 с.

Bibliography (transliterated)

1 **Deshmukh, B. D., Maundekar N. D**. Investigation of rolling bearing failure modes: review. *Journal of Modern Engineering Research*, 2014, **1**, 139-145.

2 **Lunis, O., Dalidka, S., Bureika, G**. Investigation of the features and tendencies of heating of axial boxes. *Problems of transport*, 2015, **1**, 105-114.

3 **Lunys, O., Subacius R.** Riedmenų ašidėžių kaitimo temperatūrų kitimo tendencijos [Analysis of tendencies towards changes in temperatures of railway vehicle axle-boxes] *Mokslas – Lietuvos Ateitis. Transportas [Science – Future of Lithuania. Transport Engineering]*, 2012, **4**, 361-365, doi: 10.3846 / 2000-M

4 **Martynov, I. E.** Tekhnichniy stan buksovikh rolikopidshipnikiv vantazhnikh vagoniv [Technical condition of cylindrical roller bearings of freight cars]. *Kharkivs'ka derzhavna akademiya zaliznichnogo transportu. Zb. nauk. prats' [Kharkiv State Academy of Railway Transport. Collection of scientific papers]*, 2000, **41**, 38-42.

5 **Motovilov, K. V, Perov, S. V., Martynov, I. E.** Ekspluatatsionnaya nadezhnost' buksovykh uzlov vagonov [Operational reliability in axle boxes]. *Problemy povysheniya bezopasnosti dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte. Mezhvuz. sb. nauch. tr. [Problems of improving traffic safety in railway transport. Interuniversity. Col. Scientific. Papers]*, Moscow: MIET,1988, 92-99.

6 **Weibull, V.** Statistical theory of the strength of materials *Acta Polytechnica, Machine building series, Proc. Royal Swedish Academy of Engineering Sciences*, 1939, No. **151**, Stockholm.

7 **Martynov, I. E.** Analiz opyta ekspluatatsii tsilindricheskikh rolikopodshipnikov buks gruzovykh vagonov [Analysis of the operational experience of cylindrical roller bearings of boxes of freight wagons]. *Visnik Skhidnoukraïns'kogo derzhavnogo universitetu* [*Herald of East-Ukrainian State University*], 2000, **5 (27)**, 157-159.

8 **Tsyurenko, V. N.** Opyt ekspluatatsii vagonov s buksovymi uzlami na podshipnikakh kacheniya [Experience in operating wagons with axle assemblies on rolling bearings]. *Puti sovershenstvovaniya konstruktsiy buksovykh uzlov vagonov s podshipnikami kacheniya: Trudy VNIIZhT [Ways to improve the construction of axle boxes of wagons with rolling bearing: URIRT]*, 1982, **654**, 4-26.

9 **Tsyurenko V. N., Petrov V. A**. Nadezhnost' rolikovykh podshipnikov v buksakh vagonov [Reliability of roller bearings in carriages of carriages]. *Transport [Transport]*, 1982, 96.

10 **Lundberg G., Palmgren A.** Dynamic capacity of rolling bearings. - *ActaPolitechnica, machine building series*. - Vol. 1, №3. -1947.

11 **Lunys, O.** Reiedmenu asideziu šilumokatios procesal vaziujant gelezinkelio kreivemis *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 2013, **5**, 552-557, doi: 10.3846/mla.2013.87

12 **Matyushin, S. I.** Vliyanie perekosa rolikov na raschetnuyu dolgovechnost' buksovykh podshipnikov [Influence of skewing of rollers on the estimated life of bearing boxes]. *Povyshenie nadezhnosti i effektivnosti ekspluatatsii i remonta vagonov: Trudy VNIIZhT [Increase of reliability and efficiency of operation and repair of wagons: Proceedings of VNIIZhT]*, 1984, **122**, 39-47.

13 **Martinov, I. E.** Tekhnichniy stan buksovikh rolikopidshipnikiv vantazhnikh vagoniv [Technical condition of cylindrical roller bearings of freight cars] *Kharkivs'ka derzhavna akademiya zaliznichnogo transportu. Zb. nauk. prats' [Kharkiv State University of Railway Transportation. Collection of Scientific Papers]*. 2000, **41**, 38-42.

14 **Gaidamaka, A. V**. Problemy povysheniya dolgovechnosti rolikopodshipnikov buksovykh uzlov [Problems of Increasing the Durability of Roller Bearings of Axle Units]. *Zaliznichniy transport Ukraini [Railway transport of Ukraine]*, 2001, **1**, 17-18.

15 **Gaidamaka, A. V.** Nadiynist' tsilindrichnikh rolikopidshipnikiv buks vagoniv i lokomotiviv [Reliability of cylindrical roller bearings of wagons and locomotives]. *Zb. nauk. prats' UkrDAZT [A collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport]* 2013, **139**, 103-111.

16 **Il'chishin, V. M**. Analiz napruzhenogo stanu zdvoєnogo kassetnogo tsilindrichnogo pidshipnika buksovogo vuzla vantazhnogo vagona [Analysis of the stressed state of the double cylindrical bearing of the axle box of the freight car]. *Visnik Skhidnoukraïns'kogo derzhavnogo universitetu . Naukoviy zhurnal [Herald of East-Ukrainian State University. Scientific journal]*, 2014, **3**(210), 156-159.

17 GOST 18855-94. Podshipniki kacheniya. Dinamicheskaya raschetnaya gruzopod'emnost' i raschetnyy resurs (dolgovechnost') [Rolling bearings. Dynamic design load-carrying capacity and design life (durability)]. 01 - 01 - 1997. - *Izdatelstvo standartov [Publishing House of Standards]*,1996, 19.

18 **Ioannides, E**. SKF formula for determining the service life of rolling bearings. *Evolution*, 2001,**1**, 25-28.

19 **Shimizu, S.** Fatigue Limit Concept and Life Prediction Model for Rolling Contact Machine Elements. *Tribology Transactions*, 2002, **1**, 39-46.

20 Pat. 1574502 SSSR, MPK V 61 F 15/12 Buksovyy uzel rel'sovogo transportnogo sredstva / **I. E. Martynov** ; zayavitel' i patentoobladatel' Moskovskiy institut inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta. – № 4427863/27-11; zayavl. 19.05.88; opubl. 30.06.90, Byul. № 24. – 3 s.

21 Pat. 1444206 SSSR, MPK V 61 F 15/12 Rolikovaya buksa zheleznodorozhnogo transportnogo / **O. M. Savchuk, N. A. Pasternak, V. V. Sobornitskaya** [i dr.]; zayavitel' i patentoobladatel' Dnepropetrovskiy institut inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta. – № 4133118/27 – 11; zayavl. 09.10.86; opubl. 15.12.88, Byul. № 46. – 3 s.

22 **Morchiladze, I. G., Sokolov, A. M.** Sovershenstvovanie i modernizatsiya buksovykh uzlov gruzovykh vagonov [Improvement and modernization of axle boxes in freight cars]. *Zheleznye dorogi mira [Railways of the World]*, 2006, **10**, 59-64.

23 Pat. 547372 SSSR, MPK2 V 61 F 15/12 Buksovyy uzel zheleznodorozhnogo vagona / **V. V. Abashkin, G. G. Popov**; zayavitel' i patentoobladatel' Vsesoyuznyy ordena Trudovogo Krasnogo Znameni nauchno-issledovatel'skiy institut zheleznodorozhnogo transporta. – № 1464795/11; zayavl. 03.08.70; opubl. 29.07.77, Byul. № 7. – 4 s.

24 Pat. 685537 SSSR, MPK2 V 61 F 15/12 Buksovyy uzel / **A. T. Golovatyy, B. Z. Akbashev, N. D. Ershov** [i dr.]; zayavitel' i patentoobladatel' Proektno-konstruktorskoe byuro Glavnogo upravleniya vagonnogo khozyaystvo Ministerstva putey soobshcheniya SSSR i Vsesoyuznyy nauchno-issledovatel'skiy institut vagonostroeniya. – № 2583934/27 – 11; zayavl. 23.02.78; opubl. 15.09.79, Byul. № 34. – 3 s.

25 Pat. 241496 SSSR, MPK2 V 61 F 15/12 Buksovyy uzel dlya zheleznodorozhnykh vagonov / **V. V. Abashkin, P. I. Travin**; zayavitel' i patentoobladatel' Vsesoyuznyy nauchno-issledovatel'skiy institut zheleznodorozhnogo transporta. – № 820131/27 – 11; zayavl. 12.11.63; opubl. 21.09.72, Byul. № 28. – 3 s.

Відомості про авторів (About authors)

Мартинов Ігор Ернстович – доктор технічних наук, професор, Український державний університет залізничного транспорту, завідувач кафедри вагонів, м. Харків, Україна; e-mail: martinov.hiit@rambler.ru.

Igor Ernstovych Martynov – Doctor of Technical Sciences, professor, Ukraine State University of Railway Transport, head of the department of vagons, Kharkiv; e-mail: martinov.hiit@rambler.ru.

Труфанова Альона Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри вагонів, м. Харків, Україна; e-mail: alena.hiit@rambler.ru.

Alena Vladimirovna Trufanova – Candidate of Technical Sciences, Docent, Ukraine State University of Railway Transport, Docent of the department of vagons, Kharkiv, Ukraine; e-mail: alena.hiit@rambler.ru.

Аулова Надія Сергіївна – аспірант, Український державний університет залізничного транспорту, аспірант кафедри вагонів, м. Харків, Україна; e-mail: nadezhdaaulova@gmail.com.

Nadia Sergiivna Aulova – Postgraduate, Ukraine State University of Railway Transport, Postgraduate student of the department of vagons, Kharkiv, Ukraine; e-mail: nadezhdaaulova@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Мартинов, І. Е. Вплив конструкції корпуса букси на ресурс підшипників вагонів / **І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, Н.С. Аулова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 73-80. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.10.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Please cite this article as:

Martynov, I. E., Trufanova, A. V., Aulova, N. S. Influence of a design an axle box on the resource of bearings. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 73–80, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.10.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Мартынов, И. Э. Влияние конструкции корпуса буксы на ресурс подшипников вагонов / **И. Э. Мартынов, А. В. Труфанова, Н. С. Аулова** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ» – 2017. – № 7 (1229). – С. 73-80. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.10.

АННОТАЦИЯ *Многолетний опыт эксплуатации на железных дорогах Украины цилиндрических буксовых подшипников свидетельствует, что они имеют недостаточную надежность. Фактическая долговечность железнодорожных буксовых подшипников существенно меньше расчетной. Одной из причин является неравномерное распределение нагрузки как между телами качения, так и вдоль образующей роликов. Перспективным направлением решения этой проблемы может быть обеспечение рационального распределения нагрузки на подшипники буксового узла путем создания переменной жёсткости корпуса буксы в разных направлениях и предоставление возможности самоустановки колесной пары при движении вагона, особенно на кривых участках пути.*

Ключевые слова: *буксовый узел; грузовой вагон; цилиндрический подшипник; надёжность; долговечность; корпус*

Поступила (received) 13.03.2017

УДК 622.8: 614.8: 331.452 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.11

ВПЛИВ ЕНЕРГОВИТРАТ ШАХТАРІВ НА РІВЕНЬ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ

Т. О. НЕГРІЙ, І. Г. САХНО, С. Г. НЕГРІЙ*

Гірничий факультет ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» МОН України, м. Покровськ, УКРАЇНА
**email: serhii.nehrii@donntu.edu.ua*

АНОТАЦІЯ *Обґрунтовується необхідність врахування енергетичних витрат організму шахтарів при виконанні ними операцій (під операцій) в рамках виробничого процесу з метою розробки безпечних технологічних схем ведення гірничих робіт. Отримано залежності енерговитрат організму гірника при його переміщеннях в гірничих виробках, як з вантажем, так і без нього, з урахуванням основних факторів. Встановлено залежність енергетичних витрат організму гірника від частоти серцевих скорочень, використання якої дозволить оперативно оцінювати важкість праці шахтарів та корегувати графік організації робіт з урахуванням фізіологічних можливостей виконавців. Обґрунтована необхідність проведення додаткових досліджень щодо оцінки енергетичної вартості робіт на різних ланках технологічного процесу. Планується подальше вивчення фізіології праці шахтарів при виконанні ними виробничих операцій: видобутку вугілля, проведенні та ремонті виробок, транспортуванні вантажів, обслуговуванні та ремонті обладнання і т.д.*
Ключові слова*: безпека праці; умови праці; енергетичні витрати; кореляція; операції; виробничий процес*

THE INFLUENCE OF THE ENERGY EXPENDITURE ON THE MINERS` SAFETY LEVEL

T. NEHRII, I. SAKHNO, S. NEHRII*

Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, UKRAINE

ABSTRACT *Here are considered some questions of the physiology of miners` labor in the implementation of their manufacturing operations. In this article it was analyzed the occurrence rate of industrial injures in mining process at the conditions of mines of Ukrainian Donbas. Labor conditions were examined and their influence on the rate of industrial injures were considered, too. The necessity of determining of the energy expenditure of miners` bodies in implementation of operations in job processing is justified for the development of the safe technological schemes of mining, which would be man focused. With multiple correlation method there were obtained the dependences of the energy expenditure of the miner`s organism when he moved through the mines with cargo or without it. And also the basic influencing factors are considered: mine grade and miner`s movement speed. Also was specified the dependence of the energy expenditure of miners` bodies from heart rate. Usage of these dependences will allow to assess rapidly the severity of conducting concrete industrial operations and to adjust the work schedules based on physiological features of performers to prevent accidents of industrial injures. It was proposed the necessity of carrying out of additional assessment study for energy costs of work on various phases of the technological process. It is planned the follow-up study of the physiology of miners` labor in the implementation of their manufacturing operations: coal mining, roadway maintenance and excavation, transportation of goods, equipment maintenance and repairing, etc.*
Keywords: *safety; working conditions; energy costs; the correlation; operation; the production process*

Постановка проблеми

В умовах підземної розробки вугільних родовищ при збільшенні концентрації виробництва, обтяженні небезпечних і шкідливих виробничих факторів, а, отже, збільшенні рівнів травматизму та професійної захворюваності питання забезпечення безпечних умов праці шахтарів є вельми актуальним [1-6]. На діючих шахтах Донецької області в останні роки відбувалося в середньому 2500 нещасних випадків на рік. Із загальної кількості нещасних випадків в середньому щорічно 91,3 % відбулися при веденні робіт в найбільш складних гірничо-геологічних умовах. В очисних виробках шахт 55,8 % нещасних випадків сталося від обвалень та обрушень породи , 17,1 % - машин і механізмів, 14,9 % - вибухів газу та пилу. У підготовчих вибоях від обвалень та обрушень відбулося 31,8 % нещасних випадків, по 11,8% - від транспорту і раптових викидів. У довгих горизонтальних і інших гірничих виробках основний травматизм пов'язаний з транспортом і підйомом - 60,5 %, на обвалення та обрушення припадає 10,7 %, електрострум - 4,7 % [6]. Основна частка нещасних випадків зі смертельним наслідком припадає на чинники: обвалення та обрушення, підземний транспорт і підйом, вибухи газу і пилу, машини і механізми, а також падіння предметів і людей (рис. 1).

© Т. О. НЕГРІЙ, І. Г. САХНО, С. Г. НЕГРІЙ, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

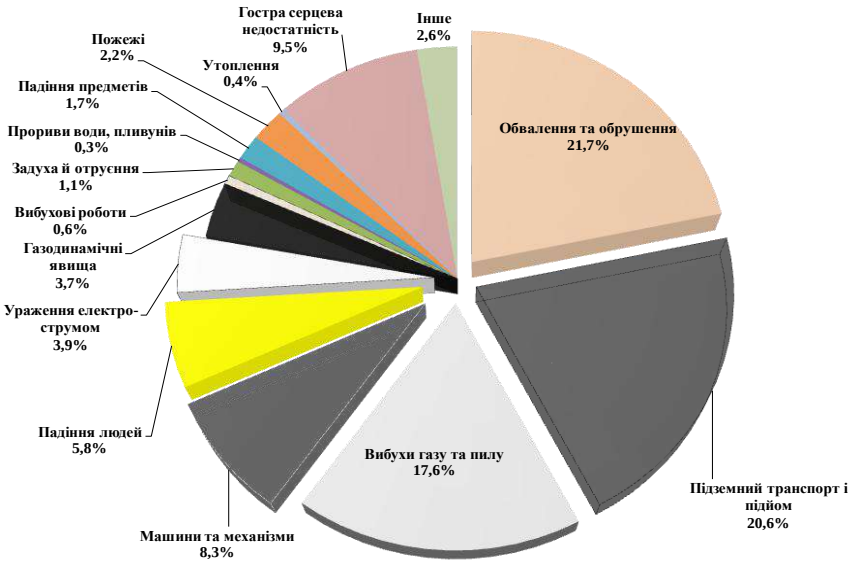


Рис. 1 – Діаграма відносного співвідношення смертельного травматизму за основними факторами по вугільним шахтам України з 1991 по 2008 рр.

Найбільша кількість нещасних випадків відбувається внаслідок порушення дисципліни робітниками й інженерно-технічними працівникам при здійсненні трудової діяльності в підземних гірничих виробках, тому в 80-82 % випадків основною причиною подій є людський фактор [8-14]. Але людині властиво помилятися, особливо в тих випадках, коли вона не в змозі оцінити навколишнє оточення на робочому місці внаслідок наявності безлічі відволікаючих і маскуючих чинників, свого психофізіологічного стану, зумовленого інтенсивністю і важкістю виконання операцій протягом робочої зміни. При наявності великої концентрації факторів, виконання трудомістких, монотонних операцій гірник припускається помилок в роботі, втрачає можливість «читати» ситуацію на робочому місці, порушує трудову дисципліну [7]. Тому події, які можуть спричинити нещасні випадки, обумовлені саме умовами праці шахтарів.

При проектуванні паспортів ведення гірничих робіт взагалі не враховуються психофізіологічні та санітарно-гігієнічних фактори умов праці [7, 15]. До них відносяться: фізичні навантаження людини, швидкісні, енергетичні, зорові та інші фізіологічні можливості, режим праці та відпочинку, нервово-психологічна напруга, фізико-хімічний склад повітряного середовища, освітленість, рівні шуму та вібрації, мікрокліматичні умови і т.д. Відомо, що ймовірність травмування гірників прямо залежить від тяжкості і напруженості виконання ними операцій виробничого циклу в умовах поганої освітленості, складних мікрокліматичних умов, впливу шуму, вібрації [7]. Тобто всі ці фактори «провокують» гірника на спрощення операцій за рахунок зневаги вимогами правил безпеки і розпорядчих нормативних документів. Деякі з цих факторів були розглянуті в роботі [7] на прикладі технологічних схем ведення очисних робіт в умовах пласта с11 ДП «Шахтоуправління «Південнодонбаське №1». До факторів, вплив яких на рівень травматизму істотний, було віднесено: температуру та швидкість повітря, його відносну вологість, рівні шуму і вібрації, освітленість, енерговитрати організму робітника, запиленість, обмеженість і захараженість робочого простору і т.д. Але, якщо більшу частину цих чинників можна віднести до конкретного робочого місця з встановленням зон їх впливу в межах очисного вибою і прилеглих до них ділянок підготовчих виробок (рис. 2), то врахувати фізичні можливості гірників при виконанні операцій в рамках виробничого процесу досить складно. Це обумовлено тим, що до теперішнього часу немає комплексних досліджень щодо встановлення енергетичних витрат робочих при виконанні конкретних операцій для розробки графіків організації робіт, які були б орієнтовані на людину.

Мета роботи

Метою роботи є визначення енергетичних витрат шахтарів при виконанні операцій в рамках основних виробничих процесів для подальшого вдосконалення графіків організації гірничих робіт.

Виклад основного матеріалу

Психофізіологічні чинники, що визначають умови праці шахтарів, можуть бути оцінені показниками важкості праці, до яких відносяться: енерговитрати організму, маса переміщуваного ними вантажу, кількість рухів і переміщень [14, 16]. Під час виконання основних, допоміжних і підготовчо-заключних операцій впродовж зміни здійснюються роботи, які відрізняються своєю енергетичною вартістю (енергоємністю). Ці відмінності обумовлені різним ступенем складності робіт, різними фізичними

навантаженнями виконавців, ергономікою робочих місць, санітарно-гігієнічними умовами зовнішнього середовища, наявністю і ефективністю засобів індивідуального захисту. Від енергоємності робіт залежать енерговитрати організму виконавця, ступінь втоми і ймовірність його травмування.

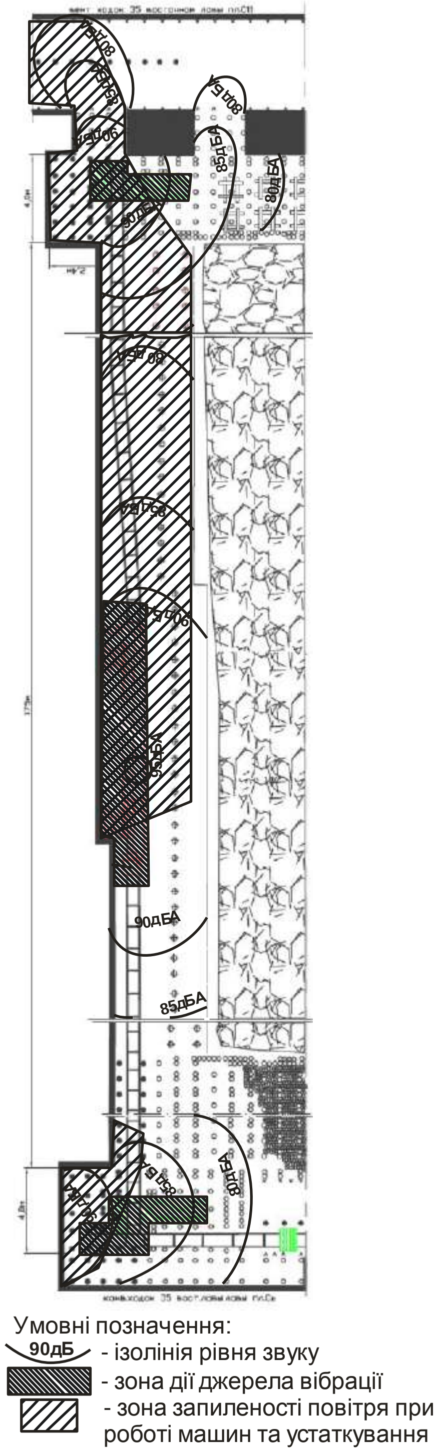


Рис. 2 – Карта зонування очисного вибою й прилеглих до нього виробок за шкідливими умовами праці (35 східна лава пл. с11 ДП «Шахтоуправління «Південнодонбаське №1»)

Оцінка умов праці в залежності від рівнів впливу факторів виробничого середовища і трудового процесу з урахуванням можливого шкідливого впливу цих факторів на здоров'я працівників регламентується Державними санітарними нормами і правилами (Гігієнічною класифікацією праці) [16]. Класифікація умов праці дозволяє розробляти та вдосконалювати заходи щодо їх поліпшення і профілактики шкідливого впливу на організм працюючих, оцінювати тяжкість і небезпеку умов праці, як самими робітниками, так і органами соціального чи медичного страхування, установами охорони здоров'я і т.д.

Для визначення енергетичних витрат організму застосовуються такі способи їх розрахунку [17, 18]:

- розрахунок зменшення енергетичних ресурсів організму;
- вимір продукції тепла;
- розрахунок величини кисневого запиту;
- розрахунок кількості роботи, що витрачається при виконанні виробничих операцій, протягом певного проміжку часу;
- розрахунок енерговитрат за частотою серцевих скорочень.

Для визначення зменшення енергетичних ресурсів необхідно взяти проби з тканин для встановлення зміни кількості енергобагатих речовин в окремих частинах тіла людини, що дуже складно і практично неможливо [17]. Вимірювання продукції тепла (пряма калориметрія) ґрунтується на визначенні кількості тепла, що виділяється тілом, в лабораторних умовах і при обмеженій кількості видів діяльності протягом декількох годин. Тому застосовувати цей спосіб для вирішення завдань, поставлених у цій роботі, недоцільно.

При визначенні витрат енергії по кисневого запиту (непряма калориметрія) береться до уваги той факт, що кожному витраченому літру кисню відповідає еквівалентна кількість енергії, що звільняється (калориметричний еквівалент кисню), яка залежить від субстрату, що окислюється (білків, жирів або вуглеводів) [17]. За об’ємом і складом повітря, що видихається, для різних груп робітників, що виконують різні види робіт, обчислюються: вентиляція легенів, відсотки утилізації кисню, продукції вуглекислого газу, споживання кисню і виділення вуглекислого газу [17-20].

Для забезпечення допустимих значень тяжкості праці темп виконання трудових операцій протягом зміни повинен плануватися відповідно до нормативів часу і необхідної величини відпочинку [21]. Крім того, маса утримуваного вантажу не повинна перевищувати 18 кг, а при перенесенні - 30 або 40 кг при різній висоті робочого простору (до 1 м або більше). Але, як показує практика, не завжди ці норми виконуються. Підземні робітники основних професій зайняті фізичною працею більш, ніж 5 годин на зміну, що складає для прохідників і гірників очисного вибою (ГРОВ), відповідно, 91,0 % і 87,6 % від тривалості

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

зміни [22]. Середній рівень їх енерговитрат за зміну високий і становить 4,4-6,4 ккал/хв. Найбільші гірничої маси в прохідницьких і очисних вибоях (відповідно, 7,4 і 10,3 ккал/хв.) [22]. Середня величина енерговитрат у гірників при ходьбі по штреку складає 4,1 ккал/хв., а в деяких випадках досягає 10 ккал/хв., що пояснюється різними швидкостями пересування, нахилом виробок, їх обводненням, захаращеністю [19]. У цій же роботі досить докладно розглянуті енерговитрати рятувальників при їх пересуванні по гірничим виробкам і виконанні гірничорятувальних робіт. Енергоємність цих робіт визначалася за результатами вимірів об'єму споживання кисню рятувальниками в умовах максимально наближених до реальних, в тому числі з включенням їх в ізолюючі респіратори. Розглядалося пересування рятувальників по підготовчим і очисним виробкам з різними кутами їх нахилу і видом пересування по ним, з різною швидкістю переміщення і при різній висоті виробок, що визначають перехідні положення тіл виконавців. Також вказується, що пересування в ізолюючих респіраторах, що обтяжують дихання і обмежують рухи, призводить до збільшення енергетичних витрат [17]. Порівняння об'ємів споживання кисню при виконанні окремих операцій в ізолюючому регенеративному респіраторі та без нього, показало, що енерговитрати будуть на 16 % менше при роботі без респіратора.

Додаткові енерговитрати організму мають місце при переміщенні у різних перехідних положеннях тіла, при виконанні робіт в вимушених, незручних і фіксованих позах. Так, переміщення по лаві вниз в напівзігнутому положенні або на колінах, вимагає втрат енергії до 5 ккал/хв., по-пластунськи - ця величина досягає 7 ккал/хв. Але навіть при зручній робочій позі, яка характеризується мінімальними напруженнями м'язового і зв'язкового апаратів, через 2-3 години у працівників виникають ознаки втоми і бажання змінити позу. Ступінь зростання напружень знаходиться в прямій залежності від величини відхилення від параметрів зручної робочої зони [23].

Втрати енергії на виконання і-тої операції Ni (ккал/хв.), що передбачає переміщення різноманітних вантажів за певний час ti (хв.), може бути розрахована за формулою [20, 24].

$$N_i = 1{,}43\cdot 10^{-3}\left(mh_n + \frac{mh_o}{2} + \frac{ml}{9}\right)\frac{g}{t_i}, \qquad (1)$$

де m - маса вантажу, кг; h_n, h_o - відповідно, висота підняття та опускання вантажу, м; g - прискорення вільного падіння, м/с^2; l - відстань переміщення вантажу по горизонталі, м.

Вираз (1) може використовуватись при переміщенні по горизонталі і не враховує швидкість руху. В умовах підземних виробок часто змінюється нахил їх профілів, а в умовах їх захаращеності та обводнення швидкості переміщення робочих можуть змінюватись. Тому цей вираз може використовуватись, для визначення витрат енергії на підняття та опускання вантажу, тобто енерговитрати відзначені при ручному прибиранні

$$N_i = \frac{1{,}43\cdot 10^{-3}}{t_i} mg\left(h_n + \frac{h_o}{2}\right). \qquad (2)$$

За результатами роботи [17] було оцінено спільний вплив кута нахилу виробки і швидкості переміщення гірників на енерговитрати організму встановленням двофакторної залежності з використанням методу множинної кореляції [25].

Порівнянням стандартних видів залежностей, які застосовуються при статистичній обробці результатів було отримано рівняння з коефіцієнтом кореляції r, значення якого показувало найтісніший зв'язок між ознакою та факторами. Сильний зв'язок був у параболічної залежності, яка представлена графічним способом на рисунку 3, а аналітичним має вигляд

$$N_в = 7{,}47 + 2{,}36\sin^2 2\beta + 1{,}92v^2 + \\ + 3{,}2\sin 2\beta - 4{,}23v \qquad (r=0{,}83), \ (3)$$

де $N_в$ - енергетичні витрати організму шахтаря при його пересуванні по гірничим виробкам, ккал/хв.; β - кут нахилу виробки, град.; v - швидкість переміщення по виробці, м/с.

Цей вираз емпіричний, тому фактори різні за своєю сутністю та мають різні одиниці виміру. Коефіцієнти при цих факторах непорівнянні та мають різну розмірність. В залежності більший вплив на енерговитрати організму має кут нахилу виробки, в порівнянні зі швидкістю пересування людини. Причому швидкість переміщення несуттєво впливає на енерговитрати, якщо ходьба виконується в уповільненому або довільному темпах, що пояснюється в цьому випадку мінімальною активністю м'язів. При повільному темпі енергетичні витрати дещо вищі, а при швидкостях, відповідних прискореному і швидкому темпам, вони будуть з найбільшими значеннями. Тому при ходьбі по гірничим виробкам оптимальними є уповільнений і довільний темпи і це узгоджується з результатами робіт [26] та [27]. Різні витрати енергії під час спуску і підйому по виробці пояснюються функціонуванням м'язів-антагоністів і навантаженнями на різні суглоби. При підйомі домінує силовий долаючий тип роботи м'язів, а при спуску - коригувальний і поступливий режими м'язової діяльності. Причому для ходьби вгору великого значення набувають рухи в тазостегновому суглобі, а вниз - рухи в гомілковостопному суглобі. При довільному темпі ходьби мінімальна активність м'язів пояснюється збігом частоти дії вимушуючих м'язових сил до власної частоти коливань нижньої кінцівки.

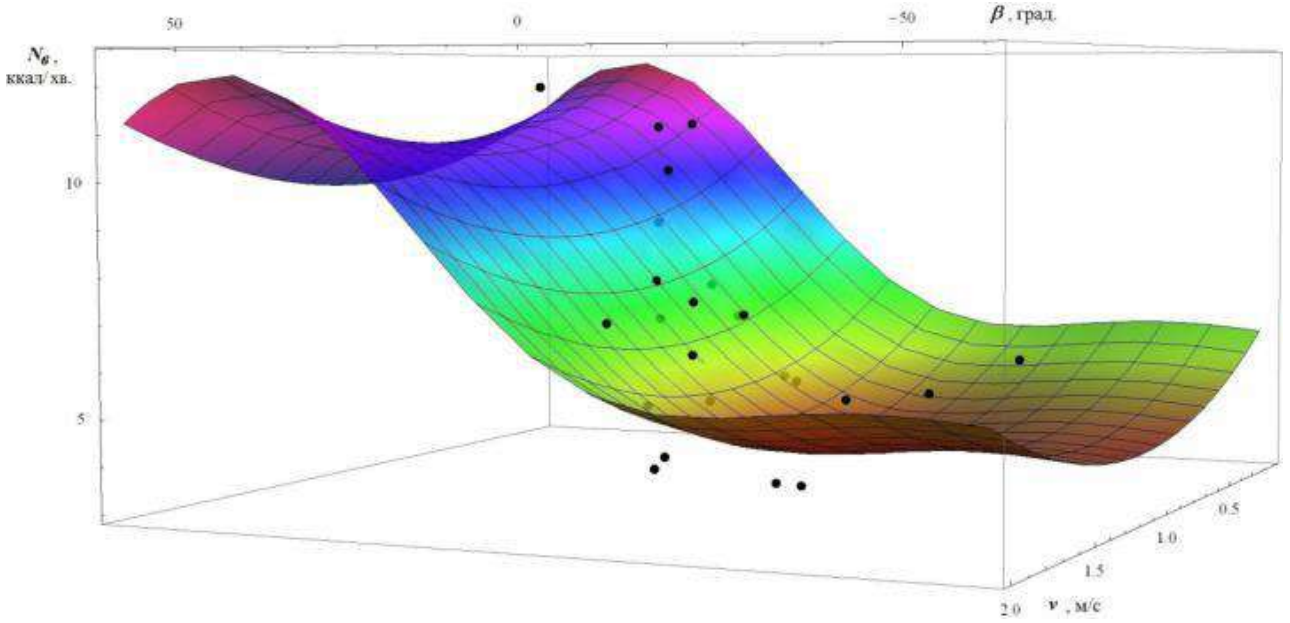


Рис. 3 – Графік залежності енергетичних витрат шахтарів N від кута нахилу гірських виробок β та швидкості ходьби v при їх пересуванні по цим виробкам

Виразом (1) враховується ходьба робочого без вантажу, але у випадках переміщення з вантажем енерговитрати $N_г$ можуть бути визначені за формулою [28]

$$N_г = N_в\left(1+\varphi\frac{M_г}{M_0}\right), \qquad (4)$$

де φ - коефіцієнт споживання кисню при перенесенні вантажу (φ =2,3); $M_г$ та M_0 - відповідно маса вантажу та тіла людини, кг.

Таким чином, з (1) та (2) випливає

$$N_г = \left(7{,}47+2{,}36\sin^2 2\beta+1{,}92v^2+\right.$$
$$\left.+3{,}2\sin 2\beta-4{,}23v\right)\left(1+2{,}3\frac{M_г}{M_0}\right). \qquad (5)$$

Аналогічно можемо встановити залежності енерговитрат організму гірника при його пересуванні по очисному вибою. Але в цих залежностях крім кута нахилу лави і швидкості переміщення необхідно врахувати потужність пласта, тому що від висоти привибійного простору залежить перехідне положення тіла. Тоді, використовуючи результати роботи [17], загальні енергетичні витрати ГРОВ, що переміщуються по лаві, в залежності від факторів, що впливають, можуть бути представлені табличним і аналітичним способами. В останньому випадку залежність матиме вигляд

$$N_{оч} = 9{,}32-1{,}38\sin^2 2\alpha+8{,}32V^2-4{,}24m^2+$$
$$+2{,}17\sin 2\alpha-6{,}65V+9{,}09m, \qquad (6)$$

де $N_{оч}$ - енергетичні витрати організму шахтаря при його пересуванні по лаві, ккал/хв.; α - кут падіння пласта, град.; V_o - швидкість переміщення по лаві, м/с.

У даній залежності, на відміну від виразу (1), кореляція середня (r=0,66). Це обумовлено тим, що на відміну від ходьби по виробці в повний зріст, пересування по лаві передбачає прийняття вимушених перехідних положень тіла, при яких в роботу включаються додаткові групи м'язів, а також переміщення виконуються в лавах, де розташовується очисне обладнання та механізми, які створюють перешкоди на шляху. Тому ми не можемо отримати більш достовірний математичний вираз, що описує цей процес. Тобто необхідне врахування додаткових чинників або справедливим буде встановлення залежностей для різних положень тіла. Тоді емпіричні залежності при перехідних положеннях тіла ГРОВ будуть мати такий вигляд:

- по-пластунськи:

$$N_{оч} = 5{,}27-10{,}3\sin^2 2\alpha+9{,}07V^2+$$
$$+11{,}61\sin 2\alpha+9{,}49V \qquad (r=0{,}98); \ (7)$$

- навкарачки:

$$N_{оч} = 9{,}97-5{,}2\sin^2 2\alpha-98{,}44V^2+$$
$$+2{,}71\sin 2\alpha+31{,}81V \qquad (r=0{,}94); \ (8)$$

- напівзігнувшись:

$$N_{оч} = -1{,}61+5{,}4\sin^2 2\alpha-0{,}31V^2+$$
$$+4{,}53\sin 2\alpha+10{,}72V \qquad (r=1{,}0). \ (9)$$

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

В цих виразах вельми сильні кореляційні зв'язки, що вказує на їх достатню збіжність з експериментальними даними та вони можуть бути використані для визначення енергетичних витрат на переміщення підземних робітників при виконанні певних операцій в рамках виробничих процесів у

Якщо прийняти, що фізичний стан гірників приблизно однаковий, то з фізіолого-ергонометричних характеристик праці шахтарів [17, 20] отримаємо залежність енерговитрат N від $ЧСС$

$$N = 0{,}149\ ЧСС - 10{,}68 . \qquad (10)$$

Отримана лінійна залежність має коефіцієнт кореляції 0,95 і досить добре узгоджується з результатами розрахунків A. Buskirik [29] для людей під час заняття лікувальною фізичною культурою. При порівнянні цих залежностей більша реакція енерговитрат на частоту серцебиття (рис. 4) для підземних робітників обумовлена менш сприятливим навколишнім мікрокліматом, роботою в протипилових респіраторах і наявністю зовнішніх перешкод при виконанні операцій.

лавах. Але виконання обов'язків гірників не обмежується переміщенням по гірничим виробкам, а ще виконуються інші роботи, які можуть бути більш витратними і важкими. Визначити енергетичні витрати робітника при виконанні конкретної операції можна за частотою серцевих скорочень ($ЧСС$).

На рис. 4 вказані межі областей між частотою серцевих скорочень у спокої і її максимальним значенням, коли виконавець може виконувати свої трудові обов'язки. Частота серцебиття в стані спокою залежить від віку, статі, розмірів тіла, способу життя людини та у більшості дорослих здорових людей становить близько 60-70 уд./хв. [30, 31]. При фізичних навантаженнях пульс може досягати свого максимального значення $ЧСС_{max}$=180 і більше ударів за 1 хв. При перевищенні $ЧСС_{max}$ у людини падає продуктивність внаслідок того, що з цього моменту легенева вентиляція починає зростати швидше, ніж потужність роботи. Також показано зони, що відносяться до різних категорій тяжкості роботи (від легкої до дуже важкої [16]). Режими, в яких працюють гірники, відносяться до всіх цих категорій і в більшій мірі до важкої та дуже важкої роботи.

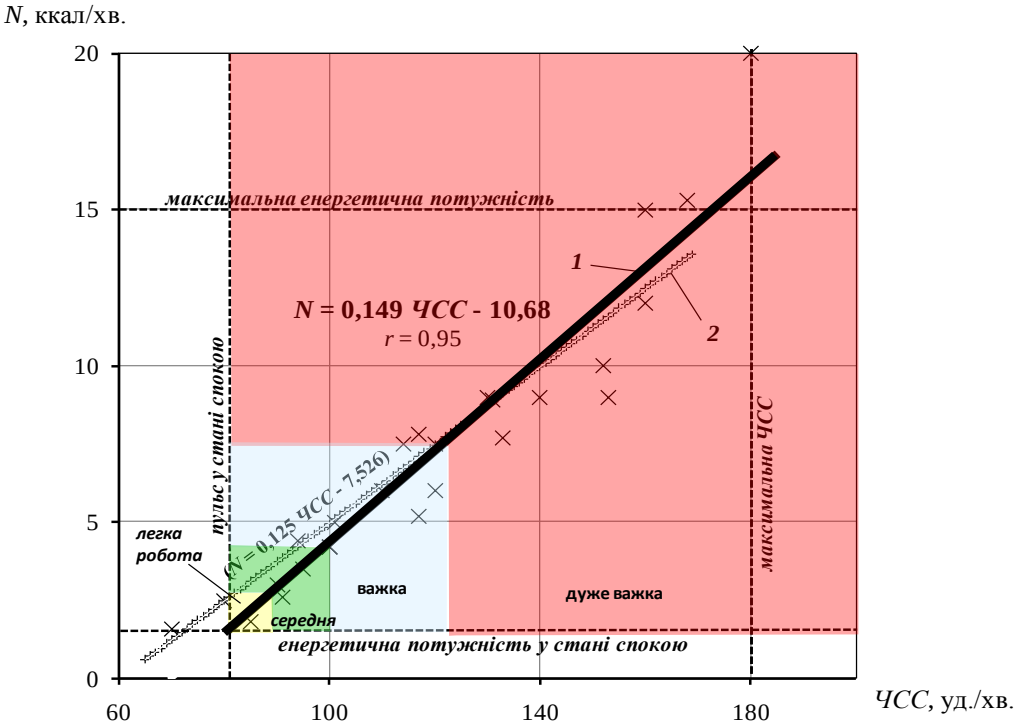


Рис. 4 – Графіки залежності енергетичних витрат організму N людини від частоти серцевих скорочень ЧСС (1 і 2 - відповідно, отримана залежність і побудована за результатами A. Buskirik)

У цілому сумарна енергетична вартість робіт при виконанні конкретної операції може бути оцінена з використанням отриманих залежностей і за результатами досліджень. За окремими під операціями енерговитрати можуть бути визначені з використанням величин та формул, які отримані за фізіологічними характеристиками праці [17,18] та у відповідності з отриманими залежностями (табл. 1). Деякі з приведених робіт оцінені тільки енерговитратами з вказівкою діапазону їх зміни та середніх величин. Встановити відповідні залежності досить складно, тому що майже неможливо врахувати вплив різних факторів на результати виконання цих робіт, тому що вони складаються з наборів короткочасних рухів, виконуваних у випадковому порядку.

Таблиця 1 – Результати визначення енерговитрат організму шахтаря при виконанні окремих операцій по *ЧСС*

Найменування робіт	Величина енерговитрат (N, ккал/хв.) або формула для її визначення	Підстави для встановлення
Ходьба по виробкам без вантажу	$N_в = 7{,}47 + 2{,}36\sin^2 2\beta + 1{,}92v^2 + 3{,}2\sin 2\beta - 4{,}23v$	(3)
Ходьба по виробкам з вантажем	$N_г = \left(7{,}47 + 2{,}36\sin^2 2\beta + 1{,}92v^2 + 3{,}2\sin 2\beta - 4{,}23v\right)\left(1 + 2{,}3\frac{m_г}{m_0}\right)$	(5)
Підняття-опускання вантажу	$N_i = \frac{1{,}43\cdot 10^{-3}}{t_i} mg\left(h_n + \frac{h_o}{2}\right)$	(2)
Рух по лаві	- по-пластунськи: $N_{оч} = 5{,}27 - 10{,}3\sin^2 2\alpha + 9{,}07V^2 + 11{,}61\sin 2\alpha + 9{,}49V$ - навкарачки: $N_{оч} = 9{,}97 - 5{,}2\sin^2 2\alpha - 98{,}44V^2 + 2{,}71\sin 2\alpha + 31{,}81V$ - напівзігнувшись: $N_{оч} = 5{,}4\sin^2 2\alpha - 0{,}31V^2 + 4{,}53\sin 2\alpha + 10{,}72V - 1{,}61$	(7)-(9)
Управління комбайном	от 2,7 до 5,1 (середня 3,9)	[23]
Управління гідрофікованим кріпленням	от 3,9 до 6,0 (середня 4,9)	[23]
Управління породонаванта-жувальною машиною	4,0	[23]
Виймання ніші відбійним молотком	от 4,2 до 5,7 (середня 4,9)	[18]
Виймання вугілля відбійним молотком і вантаження його вручну	от 3,3 до 10,3 (середня 5,4)	[18]
Ручне прибирання породи	от 4,2 до 14,4 (середня 9,3)	[18]
Буріння шпурів ручними інструментами	4,0	[23]
Буріння шпурів з застосуванням колонкових і пневматичних підтримок	2,0	[23]

Як бачимо, не всі основні операції (підопераций) на цей час оцінені енергетичними витратами виконавців, а деякі з них ґрунтуються на незначній кількості спостережень, тому є потреба у проведенні додаткових досліджень щодо вивчення фізіології праці шахтарів при виконанні ними виробничих операцій при видобутку вугілля, проведенні виробок, транспортуванні вантажів, обслуговуванні та ремонті обладнання, тощо. Але наявний масив даних дозволяє оцінити важкість робіт, що виконуються, та може бути взятий за основу для удосконалення або розробки технологічних схем ведення гірничих робіт.

Отримана залежність енерговитрат від частоти серцевих скорочень може бути використана для визначення важкості праці будь-якої операції в шахтних умовах. Це дозволить оперативно корегувати умови праці шахтарів з метою запобігання виникненню подій, які можуть спричинити настання нещасних випадків.

Висновки

Таким чином, в роботі було розглянуто можливість оцінювання умов праці шахтарів за рахунок визначення їх енерговитрат при виконанні певних операцій. Це дозволить оперативно корегувати організаційні та технологічні параметри виробничого процесу для запобігання виникнення нещасних випадків.

Використання встановлених в роботі кількісних залежностей дозволить істотно спростити алгоритм виконання розрахунків щодо визначення енерговитрат. Але вони можуть бути використані для обмеженої кількості операцій, тому необхідне проведення додаткових досліджень щодо оцінки енергетичної вартості робіт на різних ланках технологічного процесу.

Список літератури

1. **Saria, M.** Stochastic modeling of accident risks associated with an underground coal mine in Turkey / **M. Saria, A. Sevtap Selcukb, C. Karpuzc, H. Sebnem, B. Duzgunc** // *Safety Science*. – 2009. – V. 47, 1. – P. 78–87. doi:10.1016/j.ssci.2007.12.004.
2. **Mahdevari, S.** Human health and safety risks management in underground coal mines using fuzzy TOPSIS/ **S. Mahdevari, K. Shahriar, A. Esfahanipour** // *Science of The Total Environment*. – 2014. – V. 488–489, 1. – P. 85-99. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.04.076.
3. **Wua, L.** Major accident analysis and prevention of coal mines in China from the year of 1949 to 2009 / **L. Wua, Z. Jianga, W. Chengb, X. Zuoc, D. Lvb, Y. Yaob** // *Mining*

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Science and Technology (China). – 2011. – V. 21, 5. – P. 693–699. doi: 10.1016/j.mstc.2011.03.006.

4. **Румежак, О.Н.** Состояние и проблемы промышленной безопасности на горнодобывающих предприятиях Украины / **О.Н. Румежак** // *Науковий вісник НГУ* . – 2010. – № 2. – 36-39.
5. **Чуріканова, О.Ю.** Економічна складова аналізу чинників травматизму на вугільних шахтах України / **О.Ю. Чуріканова** // *Науковий вісник НГУ*. – 2012. – № 2. – С. 139-145.
6. **Негрей, Т.А.** О безопасности труда горнорабочих при выполнении основных производственных операций/ **Т.А. Негрей** // *Вісті Донецького гірничого інституту*. – 2016. – №1 (38). – С. 84-94.
7. **Негрей, Т.А.** Исследование условий труда шахтеров при выполнении основных производственных процессов / **Т.А. Негрей** // *Вісті Донецького гірничого інституту*. – 2016. – №2 (39). – С. 108-116.
8. **Грядущий, Б.А.** Опасные и вредные производственные факторы подземной добычи угля в технологическом, социальном и экологическом аспектах / **Б.А. Грядущий.** – Донецк: ЦБНТИ угольн. пром., 1994. - 158 с.
9. Аварийность на угольных шахтах Украины в 1998-1999 годах. Обзор. - Донецк: НИИГД. - 2000. - 47 с.
10. **Шевченко, В.Г.** Разработка научно-методических принципов повышения готовности систем „горнорабочие – очистной комплекс“ к высокопроизводительной и безопасной работе / **В.Г. Шевченко** // *Науковий вісник НГУю* – 2010, № 9. – С. 88-93.
11. **Sari M.** Accident analysis of two Turkish underground coal mines / **M. Sari, H.S.B. Duzgun, C. Karpuz, A.S. Selcuk** // *Safety Science*. – 2004. – №42. – P. 675–690.
12. **Page, K.** Blood on the coal: The effect of organizational size and differentiation on coal mine accidents / **K. Page** // *Journal of Safety Research*. – 2009. – 40(2). – 85–95. doi:10.1016/j.jsr.2008.12.007.
13. **Paul, P. S.** The role of behavioral factors on safety management in underground mines /**, P. S. Paul, & J. Maiti** // *Safety Science*. – 2007. – 45(4). – 449–471. doi:10.1016/j.ssci.2006.07.006.
14. **Browne, R. C.** Safety and health at work: The Robens Report / **R. C. Browne** // *British Journal of Industrial Medicine*. – 1973. – 30(1). – 87–91. doi:10.1136/oem.30.1.87.
15. **Пугач, И.И.** Исследования устойчивости боковых пород в сложных горно-геологических условиях / **И.И. Пугач, С.В. Подкопаев, И.В. Иорданов, Д.А. Чепига** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 111-116. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.18.
16. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» // Затв. наказом МОЗ України №248 від 08.04.2014.
17. Исследовать условия применения различных типов респираторов при ведении горноспасательных работ и разработать Концепцию защиты органов дыхания горноспасателей / Отчет по 2 етапу НИР, НПО «Респиратор», Донецк, 1994.- 26 с.
18. Руководство по физиологии труда / **Под ред. З.М. Золиной, Н.Ф. Измерова.**- М.: Медицина, 1983, 528 с.
19. **Garry, R.S.** Studies on Expenditure of Energy and Consumption of Food by Miners and Clerks, Fife, Scotland, 1952 / **R. C. Garry, R. Passmore, Grace M. Warnock, and J. V. G. A. Durnin** // *Medical Research Council Special Report Series No. 289. London: H.M. Stationery Office*. 1955.- 70 p.
20. **Солонин, Ю.Г.** Возрастание особенностей некоторых физиологических функций в процессе работы у лиц тяжелого физического труда / **Ю.Г. Солонин, С.Н. Масленцова, З.М. Кузнецова** // *Физиология человека*. – 1981. –2, №2. – С. 221-228.
21. **КД 12.01.01.503-2001.** Управление кровлей и крепление в очистных забоях на угольных пластах с углом падения до 35^0. Руководство, Киев, 2002. - 141 с.
22. **Головкова, Н.П.** Оценка условий труда, профессионального риска, состояния профессиональной заболеваемости и производственного травматизма рабочих угольной промышленности / Н**.П. Головкова, А.Г. Чеботарёв, Н.О. Каледина, Н.А. Хелковский-Сергеев** // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2011. – №57. – С. 9-40.
23. **Чеботарёв, А.Г.** Тяжесть и напряжённость труда работников при добыче полезных ископаемых, меры профилактики / **А.Г. Чеботарёв, В.В. Матюхин** // *Журнал "Горная Промышленность"*. – 2013. - №4 (110). – С. 66.
24. **Цугленок, Н.В.** Методика расчета энергозатрат работающих на тушении лесных пожаров / **Н.В. Цугленок, Ю.Т. Цай** // *ВесникКрасГАУ*. - 2005.- №11.- С. 227-230.
25. **Rönz, B.** Regressions und Korrelationsanalyse: Grundlagen-Methoden-Beispiele / **Bernd Rönz and Erhard Förster**. - *Wiesbaden*: Gabler, 1992.-365 s.
26. **Саранцев, А.В.** Явления резонанса при ходьбе человека / **А.В. Саранцев, А.С. Витензон** // *Протезирование и протезостроение. Сб. трудов*. – 1973. – Вып. 31. - М.: ЦНИИПП. - С. 62-71.
27. **Витензон, А.С.** К фазовому анализу ходьбы и некоторых ритмических движений человека / **А.С. Витензон, К.А. Петрушанская** // *Российский журнал биомеханики*. – 2005. -Т.9- №1- С. 19-35.
28. **Марийчук, И.Ф.** Энергозатраты членов аварийно-спасательных подразделений / **И.Ф. Марийчук, О.В. Папазова, А.А. Онасенко, А.А. Гаврилко** // *Горноспасательное дело*. – 2011.- Вып. 48- С. 172-181.
29. **Пристром, М.С.** Артериальная гипертензия у пожилых: особенности терапии и реабилитации / **М.С. Пристром, С.Л. Пристром, В.Э. Сушинский**. - Минск: Беларус. Навука, 2012.- 267 с.
30. Физиология человека. Учебник для институтов физической культуры. **Под.ред. Н.В. Зимкина**. - М.: Физкультура и спорт, 1975. – 496 с.
31. **Кипенский, А.В.** Анализ динамической погрешности измерения среднего значения частоты сердечных сокращений / **А.В. Кипенский, В. В. Куличенко, Р. С. Томашевский, Е. Ю. Демидова** // *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Х. : НТУ «ХПІ», – 2013. - № 18 (991). – С. 143-148.

Bibliography (transliterated)

1. **Saria, M., Sevtap Selcukb, A., Karpuzc, C., Sebnem, H., Duzgunc, B.** Stochastic modeling of accident risks associated with an underground coal mine in Turkey // *Safety Science*, 2009, V. **47**, Issue 1, 78–87. doi:10.1016/j.ssci.2007.12.004.

2. **Mahdevari, S., Shahriar, K., Esfahanipour, A.** Human health and safety risks management in underground coal mines using fuzzy TOPSIS //*Science of The Total Environment*, 2014, V. **488–489**, 1, 85-99. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.04.076.
3. **Wua, L., Jianga, Z., Chengb, W., Zuoc, X., Lvb, D., Yaob, Y.** Major accident analysis and prevention of coal mines in China from the year of 1949 to 2009 // *Mining Science and Technology (China)*, 2011, V. **21**, Issue 5, 693–699. doi: 10.1016/j.mstc.2011.03.006.
4. **Rumezhak, O. N.** Sostojanie i problemy promyshlennoj bezopasnosti na gornodobyvajushhih predprijatijah Ukrainy [The state and problems of industrial safety at the mining enterprises of Ukraine] // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2010, **2**, 36–39.
5. **Churikanova, O. Yu.** Ekonomichna skladova analizu chynnykiv travmatyzmu na vuhil'nykh shakhtakh Ukrayiny [Economic component of the analysis of the on-the-job injury rate determinants in coal mines of Ukraine] // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2012, **2**, 139–145.
6. **Negrej, T. A.** O bezopasnosti truda gornorabochih pri vypolnenii osnovnyh proizvodstvennyh operacij [About work safety of miners in implementations of main productional activities] // *Visti Donets'koho hirnychoho instytutu* , 2016, №**1** (38), 84-94.
7. **Negrej, T. A.** Issledovanie uslovij truda shahterov privypolnenii osnovnyh proizvodstvennyh processov operacij [Study of working conditions of miners at implementation of main industrial processes] // *Visti Donets'koho hirnychoho instytutu*, 2016, №**2** (39), 108-116.
8. **Gryadushchij, B. A.** Opasnye i vrednye proizvodstvennye faktory podzemnoj dobychi uglya v tekhnologicheskom, social'nom i ehkologicheskom aspektah [Dangerous and harmful production factors of underground coal mining in technological, social and environmental aspects]. - Doneck: CBNTI ugol'n. prom., 1994. - 158 s.
9. Avarijnost' na ugol'nyh shahtah Ukrainy v 1998-1999 godah [Accidents at coal mines Ukraine in 1998-1999]. Obzor. - Doneck: NIIGD. - 2000. - 47 s.
10. **Shevchenk,o V. G.** Razrabotka nauchno-metodicheskih principov povyshenija gotovnosti sistem „gornorabochie – ochistnoj kompleks“ k vysokoproizvoditel'noj i bezopasnoj rabote [Development of scientific-methodical principles of increase of systems colliers – longwall set of equipment readiness to high-performance and safe work] // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2010, **9**, 88–93.
11. **Sari M., Duzgun, H.S.B., Karpuz, C., Selcuk, A.S.** Accident analysis of two Turkish underground coal mines // *Safety Science*, 2004, №**42,**. 675–690.
12. **Page, K.** Blood on the coal: The effect of organizational size and differentiation on coal mine accidents // *Journal of Safety Research*, 2009, **40**, 2, 85–95.
13. **Paul, P. S., & Maiti, J.** The role of behavioral factors on safety management in underground mines // *Safety Science*, 2007, **45**(4), 449–471. doi:10.1016/j.ssci.2006.07.006.
14. **Browne, R. C.** Safety and health at work: The Robens Report // *British Journal of Industrial Medicine*, 1973, **30**(1), 87–91. doi:10.1136/oem.30.1.87.
15. **Pugach, I.I., Podkopaev, S.V., Iordanov, I.V., Chepiga, D.A.** Issledovaniya ustojchivosti bokovyh porod v slozhnyh gorno-geologicheskih usloviyah [Investigation of the stability of wall rocks in difficult mining and geological conditions] // *Vestnik NTU «HPI», Seriya: Novye resheniya v sovremennyh tekhnologiyah*, Har'kov: NTU «HPI», 2016, № **42** (1214), S. 111-116, doi:10.20998/2413-4295.2016.42.18.
16. Derzhavni sanitarni normi ta pravila «Gigienichna klasifikaciya praci za pokaznikami shkidlivosti ta nebezpechnosti faktoriv virobnichogo seredovishcha, vazhkosti ta napruzhenosti trudovogo procesu» [State sanitary standards and regulations "Hygienic classification of work in terms of hazard and danger environment factors, severity and intensity of the work process"] // Zatv. Nakazom MOZ Ukraïni №248 vid 08.04.2014.
17. Issledovat' usloviya primeneniya razlichnyh tipov raspiratorov privedenii gornospasatel'nyh rabot i razrabotat' Koncepciyu zashchity organov dyhaniya gornospasatelej [Investigate the conditions for the application of various types of respirators in the conduct of rescue work and develop a concept for the protection of respiratory organs of mine rescuers] / Otchet po 2 etapu NIR, NPO «Respirator», Doneck, 1994.- 26 s.
18. Rukovodstvo po fiziologii truda [Occupational Physiology Guide] / Pod red. **Z.M. Zolinoj, N.F. Izmerova.**-M.: Medicina, 1983, 528 s.
19. **Garry, R. C., Passmore, R., Warnock Grace, M., Durnin, J. V. G. A.** Studies on Expenditure of Energy and Consumption of Food by Miners and Clerks, Fife, Scotland, 1952 // *Medical Research Council Special Report Series* No. **289**. London: H.M. Stationery Office. 1955.- 70 p.
20. **Solonin, YU.G., Maslencova, S.N., Kuznecova, Z.M.** Vozrastanie osobennostej nekotoryh fiziologicheskih funkcij v processe raboty u lic tyazhelogo fizicheskogo truda [Ascending features of some physiological functions of persons in conditions of hard physical labor] // *Fiziologiya cheloveka*. 1981.- **2**, №2.- S. 221-228.
21. **KD 12.01.01.503-2001.** Upravlenie krovlej i kreplenie v ochistnyh zaboyah na ugol'nyh plastah s uglom padeniya do 35^0 [Control of the roof and fixing in longwall of coal seams with an angle of incidence up to 35 degrees]. Rukovodstvo, Kiev, 2002.- 141 s.
22. **Golovkova, N.P., Chebotaryov, A.G., Kaledina, N.O., Helkovskij-Sergeev, N.A.** Ocenka uslovij truda, professional'nogo riska, sostoyaniya professional'noj zabolevaemosti i proizvodstvennogo travmatizma rabochih ugol'noj promyshlennosti [Assessment of working conditions, occupational risk, the state of occupational morbidity and occupational injuries of workers in the coal industry]// *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*, 2011, №**57,** 9-40.
23. **Chebotaryov, A.G., Matyuhin, V.V.** Tyazhest' i napryazhyonnost' truda rabotnikov pri dobyche poleznyh iskopaemyh, mery profilaktiki [The severity and intensity of labor of workers in the extraction of minerals, prevention measures]// *Zhurnal "Gornaya Promyshlennost'"*, 2013, №**4** (110), 66.
24. **Cuglenok, N.V., Caj, YU.T.** Metodika rascheta energozatrat rabotayushchih na tushenii lesnyh pozharov [The methodology for calculating of the energy expenditure of people working on extinguishing forest fires] // *Vesnik KrasGAU*, 2005, №**11,** 227-230.
25. **Rönz, B., Förster, E.** Regressions und Korrelationsanalyse: Grundlagen - Methoden - Beispiele - Wiesbaden: Gabler, 1992.-365 s.
26. **Sarancev, A.V., Vitenzon, A.S.** YAvleniya rezonansa pri hod'be cheloveka [The phenomena of resonance in human walking] // *Protezirovanie i protezostroenie. Sb. Trudov*, 1973, **31**, M.: CNIIPP, 62-71.
27. **Vitenzon, A.S., Petrushanskaya, K.A.** K fazovomu analizu hod'by i nekotoryh ritmicheskih dvizhenij cheloveka [Phase

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

analysis of walking and some rhythmical motions of a man] // *Rossijskij zhurnal biomekhaniki*, 2005, **9,** №1, 19-35.

28. **Marijchuk, I.F., Papazova, O.V., Onasenko, A.A., Gavrilko, A.A.** EHnergozatraty chlenov avarijno-spasatel'nyh podrazdelenij [The energy expenditure of members of rescue units] // *Gornospasatel'noe delo*, 2011, **48,** 172-181.
29. **Pristrom, M.S., Pristrom, S.L., Sushinskij, V.EH.** Arterial'naya gipertenziya u pozhilyh: osobennosti terapii i reabilitacii [Arterial hypertension of the older persons: features of therapy and rehabilitation] - Minsk: Belarus. Navuka, 2012.- 267 s.
30. Fiziologiya cheloveka. Uchebnik dlya institutov fizicheskoj kul'tury [Human physiology]. **Pod. red. N.V. Zimkina,** M.: Fizkul'turai sport, 1975, 496 s.
31. **Kipenskij, A.V., Kulichenko, V.V., Tomashevskij, R.S., Demidova, E.YU.** Analiz dinamicheskoj pogreshnosti izmereniya srednego znacheniya chastoty serdechnyh sokrashchenij [Analysis of dynamic measurement error of the mean value of heart rate] // *Visnik NTU «HPI». Seriya: Novi rishennya v suchasnih tekhnologiyah*, H. :NTU «HPI», 2013, № **18** (991), 143-148.

Відомості про авторів (About authors)

Негрій Тетяна Олександрівна – здобувач кафедри «Охорона праці», старший викладач кафедри «Розробка родовищ корисних копалин», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна; e-mail: taalne@mail.ru.

Tetiana Nehrii – Applicant, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: taalne@mail.ru.

Сахно Іван Георгійович – доктор технічних наук, професор кафедри «Охорона праці», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна; e-mail: sahno_i@mail.ru.

Ivan Sakhno – Doctor of Technical Sciences (Ph. D.), Professor, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: sahno_i@mail.ru.

Негрій Сергій Григорович– кандидат технічних наук, доцент кафедри «Розробка родовищ корисних копалин», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна; e-mail: serhii.nehrii@donntu.edu.ua.

Serhii Nehrii – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: serhii.nehrii@donntu.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Негрій, Т. О. Вплив енерговитрат шахтарів на рівень безпеки праці / **Т. О. Негрій, І. Г. Сахно, С. Г. Негрій** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ» . – 2017. – № 7 (1229) . – С. 81-90. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.11.

Please cite this articleas:

Nehrii, T., Sakhno, I. and Nehrii, S. The influence of the energy expenditure on the miners` safety level. *Bulletin of NTU ḰhPIʹSeries: New solutions in modern technologies*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, № **7** (1229), 81–90, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.11.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Негрей, Т. А. Влияние энергозатрат шахтеров на уровень безопасности труда / **Т. А. Негрей, И. Г. Сахно, С. Г. Негрей** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ» . – 2017. – № 7 (1229) . – С. 81-90. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.11.

АННОТАЦИЯ *Обосновывается необходимость учета энергетических затрат организма шахтеров при выполнении ими операций (подопераций) в рамках производственного процесса с целью разработки безопасных технологических схем ведения горных работ. Получены зависимости энергозатрат организма горнорабочего при его перемещениях в горных выработках, как с грузом, так и без него, с учетом основных факторов. Установлена зависимость энергетических затрат организма горнорабочего от частоты сердечных сокращений, использование которой позволит оперативно оценивать тяжесть труда шахтеров и корректировать график организации работ с учетом физиологических возможностей исполнителей. Обоснована необходимость проведения дополнительных исследований по оценке энергетической стоимости работ в различных звеньях технологического процесса. Планируется дальнейшее изучение физиологии труда шахтеров при выполнении ими производственных операций: добыче угля, проведении и ремонте выработок, транспортировке грузов, обслуживании и ремонте оборудования и т.д.*

Ключевые слова*: безопасность труда; условия труда; энергетические затраты; корреляция; операции; производственный процесс*

Поступила(received) 10.03.2017

УДК 666.76-4 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.12

СТВОРЕННЯ ВИСОКОПОРИСТОГО ВОГНЕТРИВКОГО ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

А. М. ПАВЛЕНКО[1], І.Г. ЯКОВЛЄВА[2*], А. О. ЧЕЙЛИТКО[2*],Р. Р. МАТКАЗІНА[2*]

[1] Кафедра фізики будівель та відновлювальної енергії, Келецький технологічний університет, Кельце, ПОЛЬЩА
[2] Кафедра теплоенергетики, Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя, УКРАЇНА
[*]email:cheilytko@i.ua

АНОТАЦІЯ *У статті розглядається створення високопористого вогнетривкого теплоізоляційного матеріалу шлікерним методом. Створено вогнетривку пустотілу високопористу цеглу та цеглу з закритими порами розмірами 4х15х15мм з більш високими експлуатаційними характеристикам ніж звичайні вогнетриви. Дослідження, проведені авторами, також підтверджують можливість створення якісного пористого вогнетриву генезисом деструкції, що дасть можливість отримати мінімальну можливу теплопровідність для вогнетривів в межах 0,047Вт/(м·К).*
Ключові слова: *теплоізоляційний матеріал; вогнетрив; шлікерний метод; коефіцієнт теплопровідності*

CREATION HIGHLY POROUS REFRACTORY INSULATION MATERIAL

A. PAVLENKO[1], I.YAKOVLEVA[2*], A. CHEILYTKO[2*], R. MATKAZINA[2*]

[1] Department of building physics and renewable energy, Kielce University of Technology, Kielce, POLAND
[2]Department of Heat and power engineering, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Zaporizhzhya, UKRAINE

ABSTRACT *The development of new refractories with improved characteristics is an important task of energy. The purpose of the study is to determine effective parameters for the porosity of refractory in which it is possible to obtain a minimum conductivity. Elected of technology and its heat treatment for quality refractory bricks. The article discusses the improvement of the thermophysical properties of refractories due to the structuring of large pores (voids). Created of highly refractory bricks and hollow bricks with closed pore size 4x15x15 with higher performance characteristics than conventional refractories. Shows the layout of holes (voids) in the bricks which help to reduce weight and lower thermal conductivity characteristics. Research conducted by the authors also support the ability to create high-quality porous refractory genesis of destruction that will result in minimum possible thermal conductivity for refractories within the 0,047 Vt / (m · K). The thermal conductivity of the obtained bricks below the thermal conductivity of the same brick without holes. The resistance has not changed and remained high. The compressive strength is 15% below the compressive strength of the bricks without holes.*
Keywords*: insulation material; refractory; Schlicker method; the coefficient of thermal conductivity*

Вступ

У теплоенергетиці, чорної і кольорової металургії, будівельній промисловості з'явилася необхідність заміни стандартних футеровок, вогнетривів, тепло- і вогнезахисних матеріалів, які використовуються в даний час, на аналоги з більш високими експлуатаційними характеристиками [1,2]. Такими аналогами є високопористі теплоізоляційні матеріали [3].

Поширеними теплоізоляційними матеріалами на основі глинозему є вогнетриви. В Україні виробництво вогнетривів зосереджено на 18 основних спеціалізованих підприємствах. Наукову базу і передові технології забезпечують такі організації, як НМетАУ, Національний хіміко-технологічний університет (м. Дніпропетровськ) та УкрНДІ вогнетривів ім. А.С. Бережного (м. Харків). Нажаль, з економічною кризою, виробництво на підприємствах України знизилося більше ніж у два рази тільки за рахунок витиснення вітчизняної продукції імпортною. Тому, розробка нових вогнетривів з покращеними характеристиками є актуальним завданням енергетики.

Мета та завдання

Виконані дослідження ставили за мету визначити ефективні параметри пористості для вогнетривів при яких можна отримати мінімальну теплопровідність.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні завдання:

- обрати сировинну для виготовлення вогнетривів;
- обрати параметри термічної обробки матеріалу;
- визначити теплофізичні характеристики отриманого вогнетриву з запропонованою структурою;
- визначити можливість створення вогнетривів з закритими порами необхідного розміру генезисом деструкції.

© А. М. ПАВЛЕНКО, І.Г. ЯКОВЛЄВА, А. О. ЧЕЙЛИТКО,Р. Р. МАТКАЗІНА, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Огляд літератури

Важливість та широкий спектр областей, що використовують вогнетриви описано в статті [4]. Питання зменшення теплопровідності за рахунок збільшення пористості, методом GS (гелеутворення суспензії), був застосований для отримання глинозему вогнетривкої цегли в статті [5]. Недоліком даного методу є неможливість регулювання пористої структури вогнетриву. А розміри пор, структура пор і розміри зерна мають вплив на теплопровідність [6]. Тому, за аналізом [7] було обрано схему розташування отворів (пустот) у вогнетриву розмірами 4х15 мм.

Температура обпалу обиралася 1250 ˚С, так як при даній температурі збільшується кількість муліту та відбувається вдосконалення його кристалічної решітки [8].

У статті [9] розглядається створення вогнетривів з суміші глин та вторинної сировини відходів переробки паперу і тирси. Дані дослідження підтверджують можливість створення якісного пористого вогнетриву генезисом деструкції.

Використання вторинної сировини (мармуру, цеглин та ін.) у якості добавки розглядається в [10]. Авторами досягається раціональна структура вогнетриву для максимальної міцності, але нажаль теплопровідність отриманих вогнетривів не розглядається.

Мікроструктура вогнетриву не дуже впливає на теплопровідність цеглини [11], тому розглянемо покращення теплофізичних властивостей вогнетривів за рахунок структурування крупних пор (пустот).

Основна частина

За сировинну основу обрано матеріал, який являє собою монолітну аморфну масу, виготовлену шляхом низькотемпературної обробки вихідної суміші гірських порід, із значним вмістом аморфного кремнезему (трепел, опока і ін.), бікарбонату натрію, глини в суміші з водним розчином каустичної соди. Даний матеріал дуже схожий на Сіоліт. Показники якості сировини наведені у таблиці 1.

Як видно з таблиці 1 вміст оксиду заліза не перевищує 5%. Цього вдалося досягнути підбираючи гірські породи різних родовищ.

Сутність створення вогнетривкої цегли шлікерним методом полягає в тому, що компоненти керамічної маси попередньо тонко подрібнюються

Таблиця 1 – Показники якості сировини

Показник	Величина показника
Відносна вологість, %, не більше	46
Середня густина, кг/м^3, не менше	1450
Вміст діоксиду кремнію, %,	52
Вміст оксиду алюмінію, %	8
Вміст оксиду заліза, %, не більше	5
Вміст оксиду кальцію, %, не більше	10

мокрим помелом у кульових млинах, а потім отриманий шлікер зневоднюється на фільтрпресах, в сушильних барабанах і розпилювальних сушарках до необхідної вологості. Цей спосіб застосовується, коли вироби виготовляються з багатокомпонентної маси, що складається з неоднорідних і важкоспекаючихся глин і додаткових матеріалів, або при підготовці маси для виготовлення керамічних виробів складної форми способом лиття, та при видобутку глини за допомогою гідромоніторів і в ряді інших випадків.

Глина, віддозована скриньовим подавлювачем, надходить на дезінтеграторні вальці або стругач, на яких подрібнюється до шматків розміром 30-40 мм. При необхідності вона додатково подрібнюється на валковій дробарці. Сировинні матеріали очищюються від залізистих включень підвісними магнітами типу ММ-3 та ЕМІ-442, що розташовуються над конвеєрами. Глина, каоліни, плавні надходять в проміжні бункера і зберігаються окремо, дозуються з них за допомогою автоматизованих ваг типу ДСТ-70, 10-ДА, автоматизованої установки БВ-198. Таке автоматичне дозування забезпечує постійний склад маси і високу якість одержуваних виробів. Компоненти керамічної маси окремо або спільно тонко подрібнюються в кульових млинах мокрого помелу періодичної дії.

Наступна операція - випал. Максимальна температура випалу і час витримки визначаються досягненням необхідного рівня спікання і завершеністю протікання фізико-хімічних процесів між компонентами вихідних матеріалів.

Схема розташування отворів у пластині зображена на рисунку 1. Відстань між отворами обиралася таким чином, щоб найкоротша відстань між порами була направлена вздовж найменшого розміру пори, тобто щоб не утворювати конвективні токи у порі [7]. Макропористість такої цеглини складає 15,4%.

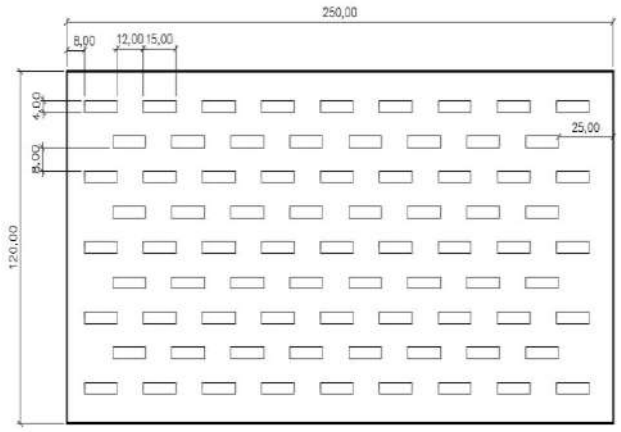


Рис. 1 – Схема розташування отворів у пластині

Шлікер створювався з сировини з показниками якості по таблиці 1. Для мінімізації усадки додавався шамот у кількості 30%. Для виготовлення зразка вогнетривкої цеглини, шлікер заливається у гіпсову форму. Фотографія гіпсової форми наведено на рисунку 2. Глибина форми 90 мм. Форма - малі стрижні 4х15 мм, які розташовані по її об'єму. Після розлиття шлікеру, форма нагрівалася у печі 15 хвилин при температурі 272 ˚С. Після нагріву цеглу діставали з форми та охолоджували до кімнатної температури, знову поміщали у піч та витримували 1,5 години при температурі 1200 ˚С.

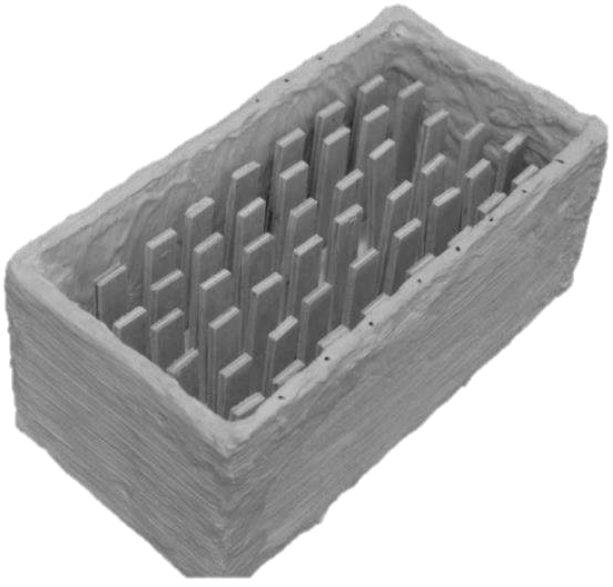


Рис. 2 – Фотографія експериментальної форми для розливки шлікеру

Охолодження експериментального зразка вогнетриву проходило без протікання фізико-хімічних процесів. Зниження температури супроводжувалось твердінням рідкої фази й термічним стисненням виробу.

Недоліком цього способу є неможливість створення оптимальної структури цегли (закритої пористості з розмірами пор 4х15х15 мм).

Результати досліджень

Властивості отриманої цегли наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Властивості отриманої цегли з глинозему

Показник	Величина показника
Вогнетривкість	1750 ˚С
Пористість (та що здається)	35,5%
Пористість (істинна)	37,1%
Термостійкість (кількість циклів до появи тріщин)	6
Міцність на стискання	7,3 МН/м^2
Коефіцієнт теплопровідності	0,047 Вт/(м·К)

Теплопровідність отриманої цегли нижче за теплопровідність такої ж цеглини без отворів. Вогнетривкість не змінилася та залишилася високою. Міцність на стискання на 15% нижче за міцність на стикання такої цеглини без отворів.

Фотографію отриманої вогнетривкої цегли отриманої шлікерним литтям наведено на рисунку 3.

Також було створено цеглу з закритими порами розмірами 4х15х15 мм. Так як неможливо створити пори шляхом локального насичення вологою матеріалу, то для створення пустот було обрано генезис деструкції. Шлікер показниками якості сировини по таблиці 1 заливався у гіпсову форму шарами по 15 мм. У кожний шар поміщалися картоні заготовки радіусом 15 мм та товщиною 4 мм. Після розлиття шлікеру на глибину 89 мм форма нагрівалася у печі 15 хвилин при температурі 272 ˚С. Після нагріву цеглу діставали з форми та охолоджували до кімнатної температури, знову поміщали у піч та витримували 1,5 години при температурі 1200 ˚С. Властивості отриманої цегли з закритими порами розмірами 4х15х15 ± 0,8 мм відображено у таблиці 3.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Рис. 3 – Фотографія цегли отриманої шлікерним литтям

Таблиця 3 – Властивості отриманої цегли з закритими порами

Показник	Величина показника
Вогнетривкість	1750 ˚С
Пористість (та що здається)	34,1%
Пористість (істинна)	36,2%
Термостійкість (кількість циклів до появи тріщин)	7
Міцність на стискання	5,8 МН/м^2
Коефіцієнт теплопровідності	0,044 Вт/(м·К)

Отримана цегла задовольняє своїми показниками по вогнетривкості та теплопровідності, але має низьку міцність на стискання.

Висновки

Обрано сировинну для виготовлення високопористих вогнетривів та параметри двоступеневої термічної обробки цеглин. Технологічні параметри: попередня термообробка у печі проводиться на протязі 15 хвилин при температурі 272 ˚С; основна термообробка - на протязі 1,5 години при температурі 1200 ˚С.

Визначено теплофізичні характеристики отриманого вогнетриву з запропонованою структурою розміщення отворів. Міцність на стискання такої цегли 7,3 МН/м^2, а коефіцієнт теплопровідності 0,047 Вт/(м•К).

Визначено можливість створення вогнетривів з закритими порами необхідного розміру генезисом деструкції. Міцність на стискання такої цегли 5,8 МН/м^2, а коефіцієнт теплопровідності 0,044 Вт/(м•К).

Список літератури

1. **Дешко, В. І.** Практичний посібник з енергозбереження для об’єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства [Practical manual for energy saving for industrial objects, constructing and house holding of Ukraine] / **В. І. Дешко**, **А. В. Праховник, В. В. Прокопєнко** // Луганськ: Місячне сяйво. – 2009. – 696 с.
2. **Ганжа, А. М.** Обґрунтування варіантів реконструкції системи теплопостачання житлового масиву з використанням математичного моделювання теплових втрат при транспортуванні теплоносія / **А. М. Ганжа, Н. А. Марченко, В. М. Підкопай** // *Вісник національного технічного університету «ХПІ» Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. – 2013. – № 13 (987). – с. 104-109
3. **Pavlenko, A.** The rate of formation pores in the material which swells / **A. Pavlenko, A. Cheilytko** // *Energy, Energy saving and ration Nature Use. Kazimierz Pułaski University of Technology and Humanities in Radom, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*. – 2014. p. 31 – 37.
4. **Guler, U., Boltasseva, A., Shalaev, V. M.** Refractoryplasmonics // *Science*. – 2014. – Т. 344. – №. 6181. – p. 263-264. doi: 10.1126/science.1252722
5. **Shimizu, T**. Thermal conductivity of high porosity alumina refractory bricks made by a slurry gelation and foaming method / **T. Shimizu, K. Matsuura, H. Furue, K. Matsuzak** // *Journal of the European ceramic Society*. – 2013. – Т. 33. – №. 15. – p. 3429-3435. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc. 2013.07.001
6. **Han, Y.** Porous anorthite ceramics with ultra-low thermal conductivity / **Y. Han, C. Li, C. Bian, S. Li, C.A. Wang** // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2013. – Т. 33. – №. 13. – С. 2573-2578. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc. 2013.04.006
7. **Cheilytko, A.** Finding of the generalized equation of thermal conductivity for porous heat-insulating materials / **A. Cheilytko** // *Technology audit and production reserves*. – 2016. – Т. 5. – №. 1 (31). – p. 4-10.
8. **Демидов, Р. В.** Экспериментальное исследование процессов обжига и изоморфизм в керамических материалах / **Р. В. Демидов, И. В. Ковков, Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов** // *Башкирский химический журнал*. – Уфа: 2006. – Том 13, №5. – с.30–31.
9. **Sutcu, M.** Production of anorthite refractory insulating firebrick from mixtures of clay and recycled paper waste with sawdust addition / **M. Sutcu, S. Akkurt, A. Bayram, U. Uluca** // *Ceramics International*. – 2012. – Т. 38. – №. 2. – p. 1033-1041. doi: 10.1016/j.ceramint.2011.08.027
1. **Krupa, V. S.** Study on Strength & Durability of Concrete by Partial Replacement of Fine & Coarse Aggregates using Marble, Granite & Spent

Fire Brick Waste / **V. S. Krupa, M. Ratnam, V. V. S. Sarma** // *IJSRSET*. – 2015. – Vol.1. – p. 135-139

10. **Li, C.** Mullite whisker reinforced porous anorthite ceramics with low thermal conductivity and high strength / **C. Li, C. Bian, Y. Han, C. A. Wang, L. An** // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2016. – Т. 36. – №. 3. – p. 761-765. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2015.10.002

Bibliography (transliterated)

1. **Deshko, V. I., Prakhovnyk, A. V., Prokopenko, V. V.** Praktychnyi posibnyk z enerhozberezhennia dlia obiektiv promyslovosti, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy [Practical manual for energy saving for industrial objects, constructing and house holding of Ukraine] // Luhansk, Misiachne siaivo Publ, 2009, 696 p.
2. **Ganzha, A. M., Marchenko, N. A., Pidkopay, V. M.** Obgruntuvannya variantiv rekonstruktsiyi systemy teplopostachannya zhytlovoho masyvu z vykorystannyam matematychnoho modelyuvannya teplovykh vtrat pry transportuvanni teplonosiya // *Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI» Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannya*, 2013 r, **№13** (987), p. 104-109
3. **Pavlenko, A., Cheilytko, A.** The rate of formation pores in the material which swells // *Energy, Energy saving and ration Nature Use. Kazimierz Pułaski University of Technology and Humanities in Radom, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*, 2014. p. 31 – 37.
4. **Guler, U., Boltasseva, A., Shalaev, V. M.** Refractoryplasmonics // *Science*, 2014, Т. **344**, №. 6181, p. 263-264. doi: 10.1126/science.1252722
5. **Shimizu T., Matsuura,** K., Furue, H., Matsuzak K. Thermal conductivity of high porosity alumina refractory bricks made by a slurry gelation and foaming method // *Journal of the European ceramic Society*, 2013, Т. **33**, №. 15, p. 3429-3435. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.07.001
6. **Han, Y., Li, C., Bian, C., Li, S., Wang, C. A.** Porous anorthite ceramics with ultra-low thermal conductivity // *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, Т. **33**, №. 13, С. 2573-2578. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.04.006
7. **Cheilytko, A.** Finding of the generalized equation of thermal conductivity for porous heat-insulating materials // *Technology audit and production reserves*, 2016, Т. **5**, №. 1 (31), p. 4-10.
8. **Demydov, R. V**., **Kovkov, Y. V., Abdrakhymova, E. S., Abdrakhymov, V. Z.** Éksperymental′noe yssledovanye protsessov obzhyha y yzomorfyzm v keramycheskykh materyalakh // *Bashkyrskyy khymycheskyy zhurnal*, Ufa: 2006, Tom **13**, №5, p.30–31.
9. **Sutcu, M., Akkurt, S., Bayram, A., Uluca, U.** Production of anorthite refractory insulating firebrick from mixtures of clay and recycled paper waste with sawdust addition // *Ceramics International*, 2012, Т. **38**, №. 2, p. 1033-1041. doi: 10.1016/j.ceramint.2011.08.027
11. **Krupa, V. S., Ratnam M., Sarma V. V. S.** Study on Strength & Durability of Concrete by Partial Replacement of Fine & Coarse Aggregates using Marble, Granite & Spent Fire Brick Waste // *IJSRSET*, 2015, Vol.1, p. 135-139
12. **Li, C., Bian, C., Han, Y., Wang, C. A., & An, L.** Mullite whisker reinforced porous anorthite ceramics with low thermal conductivity and high strength // *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, Т. **36**, №. 3, p. 761-765. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2015.10.002

Відомості про авторів (About authors)

Павленко Анатолій Михайлович – доктор технічних наук, професор, кафедра фізики будівель та відновлювальної енергії, Келецький технологічний університет; м. Кельце, Польща; e-mail: prof.pavlenko@gmail.com.

Anatoliy Pavlenko – doctor of Technical Sciences, professor, Department of Building Physics and Renewable Energy, Kielce University of Technology; Kielce, Poland; e-mail: prof.pavlenko@gmail.com.

Яковлєва Ірина Геннадіївна –доктор технічних наук, професор, зав. кафедри теплоенергетики Запорізької державної інженерної академії; м. Запоріжжя, Україна.

Irina Yakovleva - doctor of Technical Sciences, professor, department of heat and power engineering, Zaporizhzhya state engineering academy; Zaporizhzhya, Ukraine.

Чейлитко Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри теплоенергетики, Запорізької державної інженерної академії; м.Запоріжжя, Україна; email:cheilytko@i.ua.

Andrii Cheilytko – candidate of technical sciences, associate professor, doctoral candidate, department of heat and power engineering, Zaporizhzhya state engineering academy; Zaporizhzhya, Ukraine; email:cheilytko@i.ua.

Матказіна Римма Ринатівна – доцент кафедри теплоенергетики Запорізької державної інженерної академії; м. Запоріжжя, Україна.

Rymma Matkazina – associate professor, department of heat and power engineering, Zaporizhzhya state engineering academy; Zaporizhzhya, Ukraine.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Павленко, А. М. Створення високопористого вогнетривкового теплоізоляційного матеріалу / **А. М. Павленко, І. Г. Яковлєва, А. О. Чейлитко, Р. Р. Матказина** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 91-96. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.11.

Please cite this article as:

Pavlenko, A., Yakovleva I., Cheilytko, A., Matkazina R. *Creation Highly Porous Refractory Insulation Material. Bulletin of NTU KhPI."Series: New solutions in modern technologies*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 91-96, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.11.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Павленко, А. М. Композиционная высокопористая тепловая изоляция с эффективными параметрами пористости / **А. М. Павленко, И. Г. Яковлева, А. А. Чейлитко, Р. Р. Матказина** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 91-96. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.11.

АННОТАЦИЯ *В статье рассматривается создание высокопористого огнеупорного теплоизоляционного материала шликерным методом. Создан огнеупорный пустотелый высокопористый кирпич и кирпич с закрытыми порами размерами 4x15x15 мм с более высокими эксплуатационными характеристикам чем обычные огнеупоры. Исследования, проведенные авторами, также подтверждают возможность создания качественного ячеистого огнеупора генезисом деструкции, что позволит получить минимально возможную теплопроводность для огнеупоров в пределах 0,047Вт / (м · К).*

Ключевые слова: *теплоизоляционный материал; огнеупор; шликерный метод; коэффициент теплопроводности*

Надійшла (received) 28.02.2017

УДК 621.224 doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.13

THE NUMERICAL RESEARCH OF THE FLOW IN THE INLET OF THE HIGH-HEAD HYDRAULIC TURBINE

K. REZVAYA*, E. KRUPA, V. DRANKOVSKIY, O. POTETENKO, I. TYUNYANOVA

Department of Hydraulic machines, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, UKRAINE
**email: rezvayaks@gmail.com.*

ABSTRACT *3D-methods for the calculation of flow are used in this work. The solid model of the inlet is created. The mesh of the tetrahedral type is constructed. The boundary conditions for the calculations in the program are given, namely: the rate in inlet of the spiral casing and pressure on an exit. The choice of the turbulence model was based on the tasks that were set earlier. The results of numerical research of three-dimensional flow of a fluid flow in the high-head radial-axial hydraulic turbine are presented. Calculations are conducted for prognostication of descriptions and optimization of form of water passage of hydraulic turbines. The calculation of coefficient of losses of kinetic energy in the elements of inlet of hydraulic turbine is conducted. The total energy losses in the inlet of the water passage using different applied program packages are determined. The comparison of the data, which was obtained by in the calculations and the experimental data, is produced. The distributions of the total pressure and static pressure are presented in this paper. The velocity distribution in the meridional sections is presented. The complex nature of fluid flow is described. The secondary fluid flow in the spiral casing of the hydraulic turbine is confirmed by calculations. This secondary motion in the spiral casing of the hydraulic turbine appears due to the complexity of the fluid flow. Conclusions about the results of the three-dimensional calculations are made. Using special programs in the design of hydraulic turbines can reduce the technological resources and time.*
Keywords*: hydraulic turbine; inlet; k-ε model of turbulence; coefficient of losses; distribution of pressure; distribution of velocity; secondary motion*

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТОКУ В ПІДВОДІ ВИСОКОНАПІРНОЇ ГІДРОТУРБІНИ

К. С. РЄЗВА, Є. С. КРУПА, В. Е. ДРАНКОВСЬКИЙ, О. В. ПОТЕТЕНКО, І. І. ТИНЬЯНОВА

Кафедра «Гідравлічних машин», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

АНОТАЦІЯ *Представлені результати чисельного дослідження тривимірної течії потоку рідини в високонапірній радіально-осьовій гідравлічній турбіні. Визначено втрати повної енергії в підвідних елементах проточної частини за допомогою різних пакетів прикладних програм. Проведено порівняння даних, отриманих при розрахунках та експериментальних стендових даних. Описано складний характер течії потоку рідини. Розрахунковим шляхом підтверджено наявність вторинний рух рідини в спіральній камері гідравлічної турбіни. Порівняно результати, які отримані шляхом розрахунку із застосуванням пакетів програм а також експериментальні данні.*
Ключові слова: *гідравлічна турбіна; підвідна частина; k-ε модель турбулентності; коефіцієнт втрат; розподіл тиску; розподіл швидкості; вторинний рух.*

Introduction

Research of losses in water passage is one of basic problems of theory of hydromachines. These calculations on different operating modes allow to define the change of energy of liquid in the different elements of water passage of hydromachines and to investigate process of the forming of optimal mode. All of that allows to get recommendations on the improvement of geometry, both separate elements of water passage and its on the whole [1].

Numeral value of losses determined on the basic of theory of similarity on the non-dimensional coefficients of resistance of k_h [2]. It is necessary to know the change of complete pressure in the characteristic sections of running part of hydromachine.

The losses of energy in a hydroturbine consist of hydraulic, mechanical, and volumetric. Disk and hydraulic losses make the basic part of losses in a high-head hydroturbine. They differentiate at the place of origin (in a spiral casing, stator, wicket gate, runner and draft tube).

For the high-head hydroturbines losses of energy in inlet equal to the half of all hydraulic losses in water passage. Therefore, it is necessary to give large attention during designing of the inlet of high-head hydromachine [3].

For perfection of water passage of hydraulic machine with high power indexes it is necessary to choose all elements on kinematics parameters, taking into account the difficult picture of three-dimensional fluid flow in them.

Nowadays there is a variety of the programs for a calculation and analysis of the fluid flow in hydraulic machines. They got a wide use. The numeral design of three-dimensional turbulent flow of liquid is realized in

© K. REZVAYA, E. KRUPA, V. DRANKOVSKIY, O. POTETENKO, I. TYUNYANOVA, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

these programs (Fluent, CFX, OpenFoam, Flow Vision, Numera). They allow to get the detailed information about character of flow and to determine average value of kinematics characteristics in the specified sections of water passage

The aim of the paper

Comparison and analysis of data, which have been got by different calculation programs, and experimental data is the aim of this work.

Exposition of basic material

Calculations of three-dimensional turbulent flow of liquid in the inlet were carried out in this work. They were compared with the results of experimental data, and calculations on the basic of direct problem of CCTI.

High-head Francis turbine Fr500-B-100 with head 500 m have been considered. The inlet of hydro-turbine consisted of spiral casing (SC), columns of stator and wicket gate (WG). A spiral casing has circular and elliptical meridian cross-sections, the angle of coverage in the plan $\varphi = 360°$, the coefficient of velocity in the inlet section $K = 0.755$. A spiral casing is expected by law of constancy of moment of velocity ($V_u \cdot r = const$). There are 12 vanes in stator. The number of vanes of wicket gate is equal to 24, the profile them has positive curvature.

Three operating modes with the reduced rates and opening of wicket gate were considered (reduced values for the diameter of model $D_1 = 400$mm):

1 mode: $Q_1' = 0.225$ m^3/s, $a_0 = 19$ mm;

2 mode: $Q_1' = 0.250$ m^3/c, $a_0 = 22$ mm;

3 mode: $Q_1' = 0.270$ m^3/c, $a_0 = 24$ mm.

Experimental researches were conducted on the installation of department of hydraulic machines for the hydroturbine of Fr500 with different modifications of water passage [4]. The variant of inlet for comparison with numeral researches of fluid flow was chosen. These calculations were produced in the package of softwares of CFD.

Boundary conditions were set for a calculation in the program, namely: the rate in inlet of the spiral casing and pressure on an exit. All calculations were conducted for the diameter of runner, which equal 1 m, and for the head $H = 1$ m, the k-ε model of turbulence of flow was chosen.

It is a simple two-parameter model of turbulence. Two equations of transfer are calculated in this model, they determine turbulent velocity and length scale. It traditionally is considered that the standard k-ε model of turbulence provides good results at the design of fluid flows with small gradients and with the using of the calculation mesh (with the large values of parameter of y^+). Therefore, it be possible to say, that the k-ε model is very popular due to rapid convergence and relatively low requirements to the volume of memory during the solving of the applied hydrodynamic problems.

The value of relative kinematics energy of turbulence of the fluid flow was set for every calculating mode. It depends of parameters of the fluid. In this paper k was accepted 5% from the possible range of values that can choose automatically in the program (1%, 5%, 10%). Also for the existent complexes of the programs, it is possible by hand to set parameters. Then calculate every parameters by formulas and vary initial data.

Discussion of results

Comparison of calculation and experimental data will allow in the future to simplify the process of modernisation of hydraulic machine during purposeful modifications. In this case, time and resources diminish.

On the first stage of realization of numerical research of the solid model was created (fig. 1), after that the construction of calculation mesh was made (fig. 2). In this work in explored spiral casing with the columns of stator and wicket gate the calculating mesh was built with the total number of cells 4,49 million; 4,64 million; 4,45 million (for every mode accordingly).

Due to complex geometry and difficulty of construction of the block-structured meshes, a tetrahedral mesh was built for the economy of time. There are prismatic layers in wall areas and frontier layer for quality description of processes (for k-ε choose 12 layers). The thickness of the first wall layer was selected for the providing of the acceptable value of dimensionless value y^+. The model of turbulence, which was chosen before, effects on it too (for k-ε models of turbulence $y^+ \le 100$). There is condensing of the mesh near inlet and outlet edges of stator columns and vanes of wicket gate [7-12].

Calculations for three fixed opening of wicket gate with different boundary conditions were conducted after the construction of calculation mesh, because the modes changed (namely fluid rate in the inlet of the spiral casing).

Hydraulic losses determined by the formula:

$$\Delta h = \frac{\overline{P}_{inlet}^{\,total} - \overline{P}_{outlet}^{\,total}}{\rho \cdot g}$$

Total losses in the inlet are presented on graph (fig. 3).

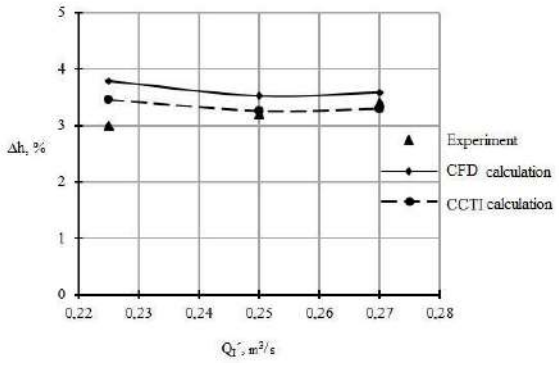


Fig. 3 – The energy losses in the inlet elements

Fig. 1 – The solid model of the hydroturbine inlet

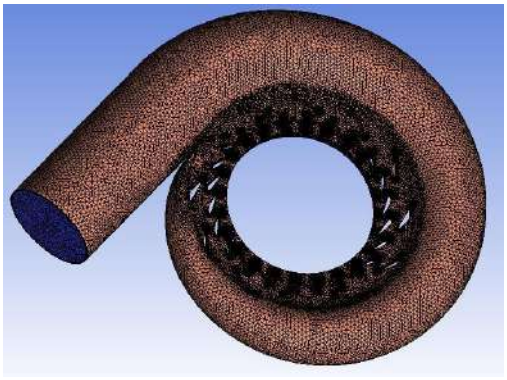


Fig. 2 – The calculation mesh

Dependences of total losses in the inlet of the hydraulic machine from the rate, which was obtained as a result of the calculation using CFD (continuous curve), CCTI (stroke curve) [5] and experiment (conformable points) are presented on a figure [4].

The calculated values of losses of total energy were confronted with data that was before determined by experiment and calculations by program CCTI.

Both the curves have identical character.

The coefficients of resistances were determine by formula:

$$k_h = \frac{\bar{h} \cdot g}{\left(Q_I'\right)^2}$$

where $\bar{h} = \frac{\Delta h}{H}$ – relative losses.

For the optimal mode the coefficient of resistance in a spiral casing with the columns of stator is equal k_{hsc+st} = 1.469. The values of coefficients of resistance in inlet (spiral casing, columns of stator and wicket gate) at the different opening of wicket gate are in the table 1.

Table 1 – Coefficient of resistance of inlet.

Q_I', m^3/s	0.225	0.250	0.270
a_0, mm (D_1=1m)	48.38	54.44	60.48
k_{hinlet}	7.34	5.671	4.864

From data of calculation researches, it may be concluded, that the dimensionless coefficient of losses of total energy depends on opening of wicket gate. The certain value of the reduced rate corresponds to this opening. When the rate increase, the coefficient decrease, and other parameters of the modes are constant. Processes that took place in the elements of the inlet of hydraulic turbine presented below more detail and demonstrably.

Flowing around of spiral casing, stator and wicket gate is presented as distribution of total pressure for each of the considering modes (fig. 4, 5, 6).

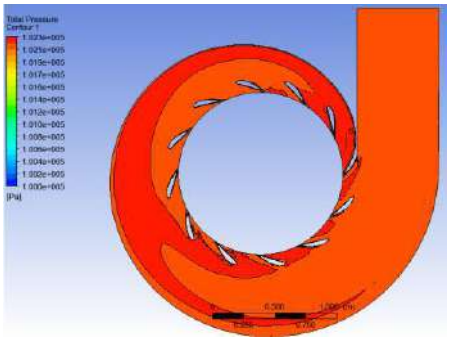


Fig. 4 – Distribution of the total pressure (Q_I' = 0.225 m^3/s, spiral casing with stator)

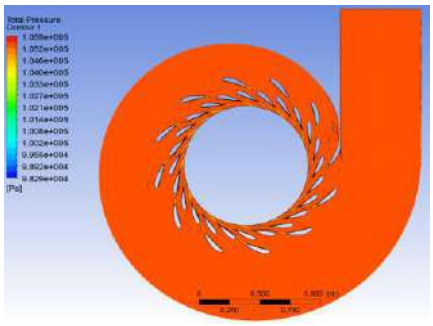


Fig. 5 – Distribution of the total pressure (Q_I' = 0.225 m^3/s, spiral casing with stator and wicket gate)

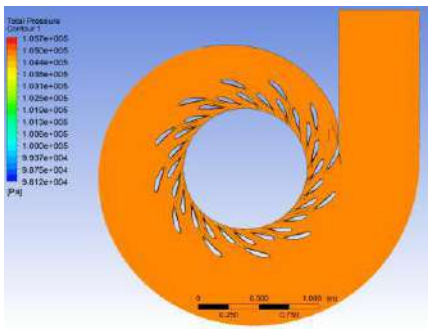


Fig. 6 – Distribution of the total pressure (Q_I' = 0.270 m^3/s, spiral casing with stator and wicket gate)

The component of total pressure (static pressure) is represented on fig. 7, 8, 9.

The full velocity on fig. 10, 11, 12.

If to consider components of velocity in meridional sections (distributions of that are presented on the fig. 13), it is possible to observe a secondary flow in the spiral casing of hydroturbine. This flow leads to

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

appearance of the vortex pair. The vorticity appears in a spiral casing and leads to increasing of hydraulic losses. A meridional section is considered under the angle of $\varphi = 120^0$ (fig. 14).

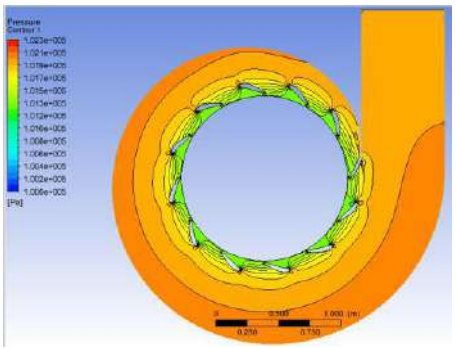


Fig. 7 – Distribution of static pressure ($Q_I' = 0.225$ m^3/s, spiral casing with stator)

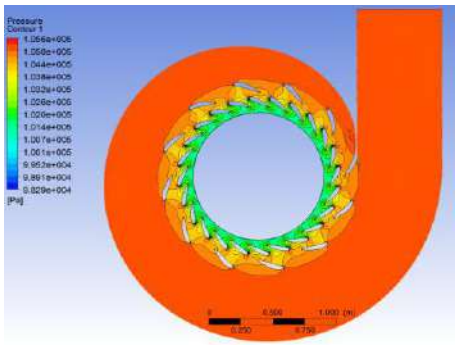


Fig. 8 – Distribution of static pressure ($Q_I' = 0.225$ m^3/s, spiral casing with stator and wicket gate)

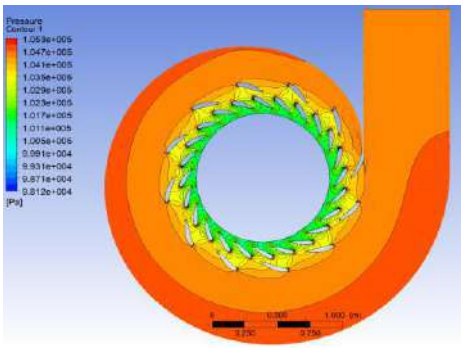


Fig. 9 – Distribution of static pressure ($Q_I' = 0.270$ m^3/s, spiral casing with stator and wicket gate)

A secondary fluid flow, which was determined in the optimal mode of operating of hydroturbine, during consideration of elements of the inlet: spiral casing with the columns of stator. This fluid flow is appeared due to complex geometry. It influences on the fluid flow in the inlet.

Appearing of the secondary fluid flow in elements of the inlet of the hydroturbine was researched not only by the program CFD but also during realization of experiment. Components of the full velocity after wicket gate were determined (before runner). The distributions of these constituents are on a height in one of meridional sections (the angle of plane of section is equal to 120^0).

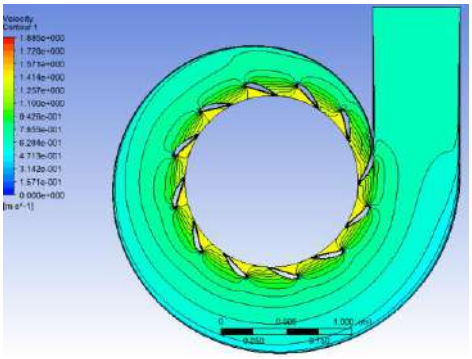


Fig. 10 – Distribution of the velocity ($Q_I' = 0.225$ m^3/s, spiral casing with stator)

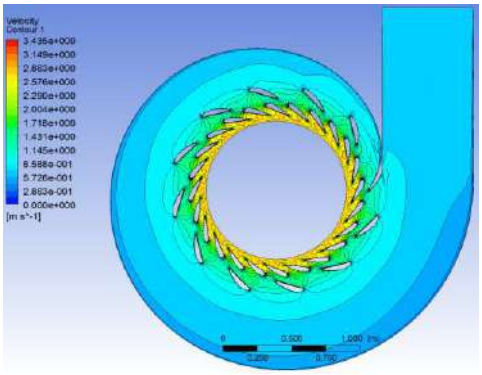


Fig. 11 – Distribution of velocity ($Q_I' = 0.225$ m^3/s, spiral casing with stator and wicket gate)

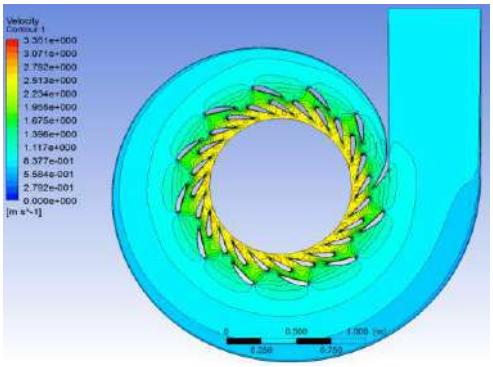


Fig. 12 – Distribution of velocity ($Q_I' = 0.270$ m^3/s, spiral casing with stator and wicket gate)

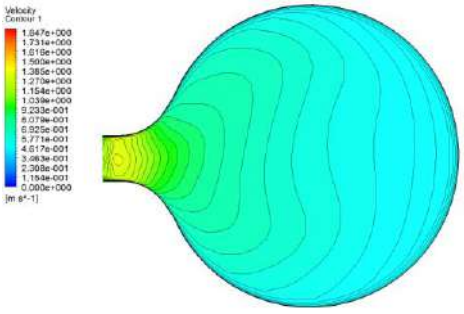


Fig. 13 – Distribution of the full velocity in the meridional section

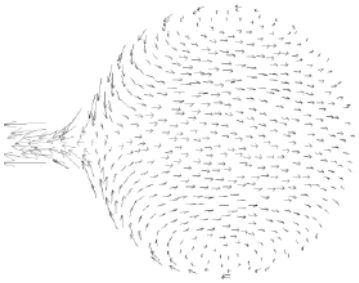


Fig. 14 – Vortex structure of the fluid flow in a spiral casing in the optimal condition

Conclusions

The experimental data and data, which were got by the calculation in the packages of specific programs, showed that losses in the inlet of hydraulic turbine are connected with the complex structure of the fluid flow. Therefore the optimal concordance of all elements of the inlet influence very much for providing of energy characteristics of hydraulic machines. During comparison of data there is a small value of errors in parameters, namely in losses. Then it is possible to say that using the packages of specific programs for prognostication of necessary results, considerably simplifies a planning process hydraulic machines.

Список літератури

1. **Селезнев, В. Н.** Исследование баланса потерь на основе расчета трехмерного течения вязкой жидкости в проточной части обратимой гидромашины / **В. Н. Селезнев, Г. И. Топаж** // *Гидротехническое строительство*. – Москва : Научно-техническая фирма "Энергопрогресс", 2014. – № 11. – с. 59-62.
2. **Drankovsky, V. E.** Calculating three-dimensional fluid flow in the spiral casing of the reversible hydraulic machine in turbine mode / **V. E. Drankovsky, K. S. Rezvaya, E. S. Krupa** // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits*. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 20 (1192). – p. 53–57.
3. **Сухоребрый, П. Н.** Оптимизация подвода радиально-осевых высоконапорных гидротурбин на основе численного исследования кинематических характеристик и потерь энергии / **П. Н. Сухоребрый, Л. Л. Меньшикова, В. В. Барлит, В. Э. Дранковский, Е. М. Эскрибано** // *Пробл. машиностроения*. – 2003. – Т. 2. – с. 590-594.
4. **Потетенко, О. В.** Вихревой характер движения жидкости в спиральной камере и межлопастных каналах направляющего аппарата высоконапорных радиально-осевых гидротурбин РО500 / **О. В. Потетенко, Н. С. Панченко** // *Гидравлические машины*. – 1973. – Вып.7. – С. 3-9.
5. **Барлит, В. В.** Разработка и численное исследование подвода высоконапорной гидротурбины РО500 / **В. В. Барлит, В. Э. Дранковский, Л. Л. Меньшикова, К. А. Миронов, В. К. Панде, М. К. Малу, Л. К. Харвани, С. Рао** // *Міжнародна наукова конференція MicroCAD : Секція №5 – Моделювання робочих процесів в теплотехнологічному, енергетичному обладнанні та проблеми енергозбереження*. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2003.
6. **Потетенко, О. В**. Комплексные экспериментальные исследования турбулентной структуры потока в проточной части высоконапорной радиально-осевой гидротурбины / **О. В. Потетенко, Е. С. Крупа** // *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати*. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 20 (1192). – С. 33–40.
7. **Ruprecht, A.** Unsteady Flow Simulation in Hydraulic Machinery / **A. Ruprecht** // *Task Quarterly*. – 2002. – Vol. 6, no 1. – P. 187-208.
8. **Minkowycz, W. J.** Handbook of Numerical Heat Transfer. / **W. J. Minkowycz, E. M. Sparrow, J. Y. Murthy**– [2 ed.] – Wiley, 2006.– 984 c.
9. **Jun-hu, Y.** Numerical Simulation of Whole Flow Passage for a Multi-stage Hydraulic Turbine with Gas-liquid Two-Phase / **Jun-hu YANG, Ting XU, Hao-ran LIU** // *Media Journal of Xihua University(Natural Science Edition)*. – 2014. – Vol. 5. – P. 103-108.
10. **Pasquale, D.** Shape Optimization of an Organic Rankine Cycle Radial Turbine Nozzle / **D. Pasquale, A. Ghidoni, S. Rebay** // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2013. – Vol. 135 (4). – P. GTP-12-1061. doi : 10.1115/1.4023118.
11. **Jacob, P. A.** Preliminary design and performance estimation of radial inflow turbines: an automated approach / **P. A. Jacob, Carlos Ventura, Andrew S. Rowlands [et al.]** // *Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering*. – 2012. – Vol. 134. – P. 031102-1–031102-13. doi : 10.1115/1.4006174
12. **Reinmoller, U.** Clocking Effects in a 1.5 – Stage Axial Turbine Steady and Unsteady Experimental Investigations Supported by Numerical Simulations [Text] / **U. Reinmoller and R. Niehuis** // *ASME J. Turbomachines*. – 2002. – 124. – P. 52–58.

Bibliography (transliterated)

1. **Seleznev, V. N., Topazh, G. I.** Study of the balance of losses based on the calculation of the three-dimensional flow of a viscous fluid in the flowing part of a reversible hydraulic machine *Hydrotechnical Construction. - Moscow: Scientific and technical firm "Energoprogress"*, 2014. - № 11. - p. 59-62.
2. **Drankovsky, V. E., Rezvaya, K. S., Krupa, E. S.** Calculating the three-dimensional fluid flow in the spiral casing of the reversible hydraulic machine in turbine mode *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. - Kharkiv: NTU "KhPI"*, 2016. **№ 20 (1192).** p. 53-57
3. **Suhorebryi, P. N., Menshikova, L. L., Barlit, V. V., Drankovsky, V. E., Escribano, E. M.** Optimization of the approach of radial-axial high-head hydroturbines on the basic of a numerical study of kinematic characteristics and energy losses. *Probl. Mashinostroeniya*. 2003. **2**. p. 590-594
4. **Potetenko, O. V., Panchenko, N. S.** Vortex character of fluid motion in a spiral chamber and intervane channels of a directing device of high-thrust radial-axial hydro turbines Fr500 *Hydraulic machines.* 1973. **7**. - P. 3-9.
5. **Barlit, V. V., Drankovsky, V. E., Menshikova, L. L., Mironov, K. A., Pande, V. K., Malu, M. K., Harvani, L. K., Rao, S.** Development and numerical study of the supply of the high-head hydro turbine Fr500. *International scientific conference MicroCAD: Section number 5 - Models of robotic processes in heat and power engineering, energy-intensive and energy-saving problems. - Kharkov: NTU "KhPI"*, 2003.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

6. **Potetenko, O. V., Krupa, E. S.** Complex experimental researches of the turbulent flow structure in the water passage of a high-head radial-axial *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units - Kharkov: NTU "KhPI"*, 2016. **№ 20 (1192).** P. 33-40.
7. **Ruprecht, A.** Unsteady Flow Simulation in Hydraulic Machinery. *Task Quarterly*. 2002. Vol. **6**, no 1. P. 187-208.
8. **Minkowycz, W. J.** Handbook of Numerical Heat Transfer. – [2 ed.] – Wiley, 2006.– 984 c.
9. **Jun-hu, Y., Ting, X., Hao-ran, L.** Numerical Simulation of Whole Flow Passage for a Multi-stage Hydraulic Turbine with Gas-liquid Two-Phase. *Media Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2014. Vol. **5**. P. 103-108.
10. **Pasquale, D., Ghidoni, A., Rebay, S.** Shape Optimization of an Organic Rankine Cycle Radial Turbine Nozzle. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2013. Vol. **135 (4)**. P. GTP-12-1061. doi : 10.1115/1.4023118.
11. **Jacob, P. A., Ventura, C., Rowlands, A. S. [et al.]** Preliminary design and performance estimation of radial inflow turbines: an automated approach. *Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering*. 2012. Vol. **134**. P. 031102-1–031102-13. doi : 10.1115/1.4006174
12. **Reinmoller, U., Niehuis, R.** Clocking Effects in a 1.5 – Stage Axial Turbine Steady and Unsteady Experimental Investigations Supported by Numerical Simulations [Text]. *ASME J. Turbomachines*. 2002. **124**. P. 52–58.

Сведения об авторах (About authors)

Kseniya Sergeevna Rezvaya - graduate student, Assistant of the department "Hydraulic machines" of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: rezvayaks@gmail.com.

Рєзва Ксенія Сергіївна – аспірант, асистент кафедри «Гідравлічні машини» Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту», Харків, Україна; e-mail: rezvayaks@gmail.com.

Evgeniy Sergeevich Krupa – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent of the department "Hydraulic machines" of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine; e-mail: zhekr@mail.ru.

Крупа Євгеній Сергійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Гідравлічні машини» Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту», Харків, Україна; e-mail: zhekr@mail.ru.

Viktor Eduardovich Drankovskiy - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Professor of the department "Hydraulic machines" of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: drankovskiy@rambler.ru.

Дранковський Віктор Едуардович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри «Гідравлічні машини» Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту», Харків, Україна; e-mail: drankovskiy@rambler.ru.

Oleg Vasilyevich Potetenko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Professor of the department "Hydraulic machines" of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; gmntukhpi@gmail.com.

Потетенко Олег Васильович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри «Гідравлічні машини» Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту», Харків, Україна; e-mail: gmntukhpi@gmail.com.

Irina Ivanovna Tynyanova – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent of the department "Hydraulic machines" of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine; e-mail: t.irinai@mail.ru.

Тиньянова Ірина Іванівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Гідравлічні машини» Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту», Харків, Україна; e-mail: t.irinai@mail.ru.

Please cite this article as:

Rezvaya, K., Krupa, E., Drankovskiy, V., Potetenko, O. V., Tynyanova, I. The numerical research of the flow in the inlet of the high-head hydraulic turbine. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 97–102, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.13.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Рєзва, К. С. Чисельне дослідження потоку у підводі високонапірної гудротурбіни / **К. С. Рєзва, Є. С. Крупа, В. Е. Дранковський, О. В. Потетенко, І.І. Тиньянова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 97-102. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.13.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Резвая, К. С. Численное исследование потока в подводе высоконапорной гидротурбине / **К. С. Резвая, Е. С. Крупа, В. Э. Дранковский, О. В. Потетенко, И. И. Тыньянова** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 97-102. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.13.

АННОТАЦИЯ *Представлены результаты численного исследования трехмерного течения потока жидкости в высоконапорной радиально-осевой гидравлической турбине. Определены потери полной энергии в подводящих элементах проточной части с помощью разных пакетов прикладных программ. Произведено сравнение данные, полученных при расчетах и экспериментальных стендовых данных. Описан сложный характер течения потока жидкости. Расчетом подтверждено существования вторичного течение жидкости в спиральной камере гидравлической турбины.*

Ключевые слова: *гидравлическая турбина; подводящая часть; k-ε модель турбулентности; коэффициент потерь; распределения давления; распределение скорости; вторичное движение*

Надійшла (received) 01.03.2017

УДК 65.012.3: 316.422 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.14

УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ-СЮРПРИЗАМИ В ПРОЕКТАХ РЕІНЖИНІРИНГУ БУДІВЕЛЬНИХ СПОРУД

***О.Л. СТАНОВСКИЙ*[1], *І.І. СТАНОВСЬКА*[2], *Д.А. МОНОВА*[1], *Х. ВАЛІД ШЕР*[1], *І. ХЕБЛОВ*[1], *О.В. ТОРОПЕНКО*[1]**

[1]*кафедра нафтогазового і хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, Одеса, УКРАЇНА*
[2]*кафедра вищої математики та моделювання систем, Одеський національний політехнічний університет, Одеса, УКРАЇНА*
[*]*email: ostanovskyi@gmail.com*

АНОТАЦІЯ *Під реінжинірингом будівельних споруд розуміли процеси перебудови або добудови, в яких здійснюється відхилення від первинного креслення споруди із додаванням нових елементів, та створення технології виготовлення останніх. Розроблено систему «REBUS» підтримки проектних рішень при реінжинірингу будівельних споруд. Проведено випробування системи «REBUS» в рамках управління проектом реінжинірингу промислового об'єкта із позитивним технічним ефектом.*
Ключові слова*: управління проектами; реінжиніринг будівельних споруд, перебудова; добудова; ризики-сюрпризи; підтримка рішень*

RISK-SURPRISES MANAGEMENT IN THE PROJECTS OF RE-ENGINEERING BUILDING STRUCTURES

***A. STANOVSKYI*[1], *I. STANOVSKA*[2], *D. MONOVA*[1], *H. VALID SHER*[1], *I. HEBLOV*[1], *O. TOROPENKO*[1]**

[1] *Department of Oil, Gas and Chemical Mechanical Engineering, Odessa National Polytechnic University, Odesa, UKRAINE*
[2] *Department of Mathematics and Systems Modeling, Odessa National Polytechnic University, Odesa, UKRAINE*

ABSTRACT *Under the re-engineering of building structures understand the processes of adjustment or completion, in which the deviation from the initial drawing facilities with the addition of new elements, and the creation of manufacturing technology of the past. The aim of this work was to improve the effectiveness of project management of re-engineering construction by reducing time and cost of design works, as well as improving the product quality of the project through the development and implementation of support systems for design decision making in the planning stages of content projects, and response to project risks. Developed a system of "REBUS" support of design decisions in the re-engineering of building structures. Tested system "REBUS" in the framework of project management reengineering of an industrial facility with a positive technical effect.* Tests *have shown that the use of "REBUS" has achieved the following technical and economic results: with respect to the interaction with the turbulent environment: developed standards of operations of the management of the project as a response to changes in planned early in the project functional areas of project activities; in respect of the project management process: • reduced installation costs 1.3 times; • reduced the term of the lease of warehouse space by 18 %; • increased speed of information processing in the logistics Department 7 %; – in terms of the product of the project: • insolation is the most darkened areas of the room increased by almost 40 %; total costs for heating of the object decreased to 26.6 % while maintaining the average temperature in the premises;• the amount of carbon monoxide (CO2) in the air in the internal volume of construction decreased by 27.1 %.*
Keywords*: project management; re-engineering of building structures; rebuilding; completion; risks-surprises; decision support*

Вступ

Останнім часом все більшого поширення набувають роботи з реінжинірингу складних систем, наприклад, будівельних споруд [1,2]. Це означає ремонт будівлі, але не простий ремонт із відбудовою початкових, закладених в проект будівлі елементів та їхніх сполучень, а часткову або повну заміну елементів, що вийшли з ладу або застаріли, на нові, які потребують спочатку додаткового нового проектування їх конструкцій та технологій виготовлення, а також конструкцій допоміжних вузлів для монтажу і технології саме перебудови об'єкта (рис. 1) [3,4].

Такі роботи неможливо передбачити заздалегідь, – адже не відомо, що розкриється після того, як цей об'єкт розберуть, тобто не відомі (або частково відомі з деякою ймовірністю) ані елементи, які треба просто відновити (за існуючими кресленнями та технологіями), ані елементи, які потребують зовсім нового підходу до їхнього виготовлення та монтажу [5].

© О.Л. СТАНОВСКИЙ, І.І. СТАНОВСЬКА, Д.А. МОНОВА, Х. ВАЛІД ШЕР, І. ХЕБЛОВ, О.В. ТОРОПЕНКО, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Рис. 1 – Результат реінжинірингу – додавання нових елементів в конструкцію будівлі

Такі ризики, які з'являються «несподівано», під час руйнівних досліджень елементів споруд, назвемо «ризиками-сюрпризами» [6]. Це можуть бути пошкодження опорних елементів будівлі (рис. 2), її комунікацій (рис. 3), тощо.

Рис. 2 – Приклади пошкодження опорних елементів

Рис. 3 – Приклади пошкодження комунікацій

Головна прикмета ризиків-«сюрпризів», яка відрізняє їх від інших внутрішніх та зовнішніх ризиків, – це те, що *«сюрпризні» ризикові події відбуваються раніше, ніж виявляються*. Наприклад, непомітне ззовні внутрішнє руйнування опори будівлі (іржавіння арматури, тощо) може статися задовго до того, як ця будівля впаде.

Такі сюрпризи будівельного реінжинірингу роблять управління проектом останнього більш складним та непередбачуваним, ніж це випливає із впливу турбулентного оточуючого середовища [7]. В таких умовах навіть свята святих проекту – його мета може бути адаптивною, тобто змінюватись під час виконання проекту, пристосовуючись до невідомих раніше внутрішніх та зовнішніх обставин.

Виконання будь-яких робіт над складними системами починається з планування майбутньої діяльності та продовжується здійсненням такого плану під керівництвом компетентного менеджменту [8,9].

Однією з форм такого планування є побудова мережевого графіку майбутніх робіт, його оптимізації з точки зору часу, фінансових та інших витрат. При цьому вважається, що якість продукту роботи гарантується лише суворим виконанням усіх заданих параметрів процесів, які входять до мережевого графіку.

Але вже з початку такої постановки зрозуміло, що, як би ретельно не були побудовані мережеві плани, це не гарантує ані завершення відповідної роботи, ані її підсумкової вартості, ані якості її результатів.

Тому все частіше фахівці з менеджменту вдаються до створення нових методів креативного управління, яке враховує складні засади взаємодії будь-яких робіт із оточуючим середовищем, що неперервно та непередбачувано змінюється, – так званого проектного управління.

Один з таких методів – це система підтримки прийняття управлінських рішень в процесі реінжинірингу будівель та споруд, яка базується не на статичному технологічному мережевому графіку, а на динамічному креативному проектному підході, який дозволяє оперативно (*on-line* із процесом) реагувати на усі виклики внутрішнього та зовнішнього турбулентного середовища.

Менеджмент проекту може в цих умовах спостерігати не тільки за розвитком технологічних робіт (заготівля, металообробка, зварювання, укладання бетону, складання, засклення, тощо), але й за ризиками та їхніми наслідками, що супроводжують процес будівництва по всіх функціональних областях реінжинірингу (строки, витрати, персонал, поставки, якість, інформація, тощо), корегуючи параметри цих областей і, навіть, зміст проекту в цілому, он-лайн.

Це значно збільшує можливості менеджменту проекту, який може краще підготуватися до таких викликів, а отже, своєчасно їх прогнозувати та попереджувати їхнє настання та ефективно протистояти техніко-економічним наслідкам від ризиків-«сюрпризів».

Мета роботи

Метою роботи було підвищення ефективності управління проектами реінжинірингу будівельних споруд за рахунок зменшення терміну та вартості проектних робіт, а також підвищення якості продукту проекту шляхом розробки та впровадження системи підтримки прийняття проектних рішень на етапах планування змісту проектів та протидії проектним ризикам.

Для досягнення цієї мети в роботі розв'язані наступні задачі:

– запропоновано побудову змісту проекту реінжинірингу будівельних споруд у вигляді мережевого графіку робіт, до якого в будь-який

момент можуть бути додані додаткові роботи, пов'язані із компенсацією наслідків ризикових подій;

– розроблено систему «REBUS» (*Re-engineering of building structures*) оптимізації та підтримки проектних рішень при реінжинірингу будівельних споруд, а також зниження вартості та терміну виконання проектів;

– проведено практичне випробування системи «REBUS» в рамках управління проектом реінжинірингу промислового об'єкта із позитивним економічним, соціальним та технічним ефектом.

Викладення основного матеріалу

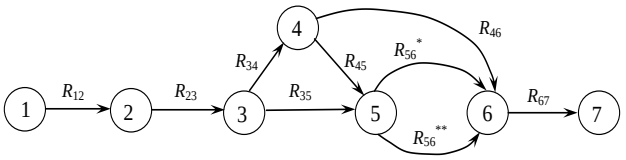
Головною відмінністю проектної діяльності з реінжинірингу від «звичайного» проекту є постійна необхідність в моніторингу за виникненням ризиків-«сюрпризів» та прийняття заходів із компенсації їхніх наслідків, що постійно відбивається на змісті проекту, а саме, призводить до «руйнування» його вихідного – планового мережевого графіку.

Як відомо, головний елемент мережевого графіку – робота R, яка, як передбачається, з техніко-економічного боку має певні характеристики, відомі до початку мережевого планування.

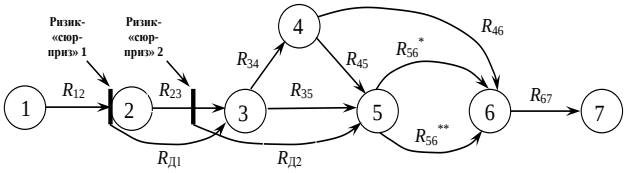
На рис. 4*а* в якості прикладу позначені такі роботи, які водять до планового змісту проекту: R_{12} – оцінювання поточного стану; R_{23} – демонтаж об'єкта реінжинірингу; R_{34} – проектування технології реінжинірингу, нових вузлів, деталей та оснащення; R_{35} – придбання готових конструкцій, які замінюються без зміни «старих» вузлів та деталей; R_{45} – виготовлення нових вузлів, деталей та оснащення; R_{56}^{*} – заміна «старих» елементів конструкції споруди; R_{56}^{**} – монтаж нових елементів конструкції споруди; R_{46} – проектування пусконалагоджувальних робіт; R_{67} – пусконалагоджувальні роботи.

На рис. 4*б* показано, як під час робіт R_{12} та R_{23} відбуваються деякі несподівані ризикові події. Як видно з рисунку, ризики-«сюрпризи» бувають двох типів – перший ідентифікується в плановому порядку по завершенні роботи, а другий – несподівано в процесі виконання роботи. Обидва ризики у підсумку породжують зміну змісту проекту: з'являються додаткові роботи $R_{Д1}$ та $R_{Д2}$ (в прикладі на рис. 4*б*) [10].

У зв'язку з цим, менеджмент проекту повинен бути перманентно готовим до подібних дій, причому, перехід до надзвичайних фаз проектної діяльності бажано здійснювати негайно, для чого передбачені необхідні розділи загальної «Інструкції з правил дослідження будівельних конструкцій з метою підтримки управління проектами та програмами реінжинірингу», оформленої у вигляді Стандарту Підприємства.



а)



б)

Рис. 4 – Адаптація змісту проекту реінжинірингу до «ризиків-сюрпризів»:
а – мережевий графік, в якому не враховані ризики-сюрпризи; б – мережевий графік, в якому враховані ризики-сюрпризи 1 та 2 типів

Подібний механізм постійної готовності до переходу на надзвичайну стадію проекту було розроблено для системи управління програмою підтвердження працездатності Систем аварійного захисту АЕС [11].

Відмінністю управління проектами реінжинірингу будівельних споруд від цього механізму є те, що після кожного етапу реінжинірингу в плановому порядку та в будь-який момент часу при аварійній ситуації (наприклад, руйнуванні тієї частини будівлі, яку не передбачалося зносити, непередбачуване попереднім планом пошкодження комунікацій, тощо) здійснюється перехід до підсистеми ітераційного планування змісту проекту (рис. 5).

Такий підхід до управління змістом було реалізовано у вигляді системи «REBUS» підтримки прийняття рішень в управлінні проектами реінжинірингу будівельних споруд (рис. 6).

Випробування показали, що використання системи «REBUS» дозволило досягти таких техніко-економічних результатів:

– стосовно взаємодії з турбулентним навколишнім середовищем:

- розроблені нормативи дії менеджменту проекту як реакції на зміну умов у запланованих на початку проекту функціональних областях проектної діяльності;

– стосовно процесу управління проектом:

- зменшилася вартість монтажних робіт в 1,3 рази;
- зменшився термін оренди складських приміщень на 18 %;
- збільшилася швидкість обробки інформації у відділі логістики на 7 %;

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

В Одеському ТОВ «Геоморас» (Україна) проведені випробування системи «REBUS», яка була задіяна для управління проектом реінжинірингу промислового об'єкта з метою підвищення його вентиляційних, енергозберігаючих та освітлювальних характеристик (рис. 7).

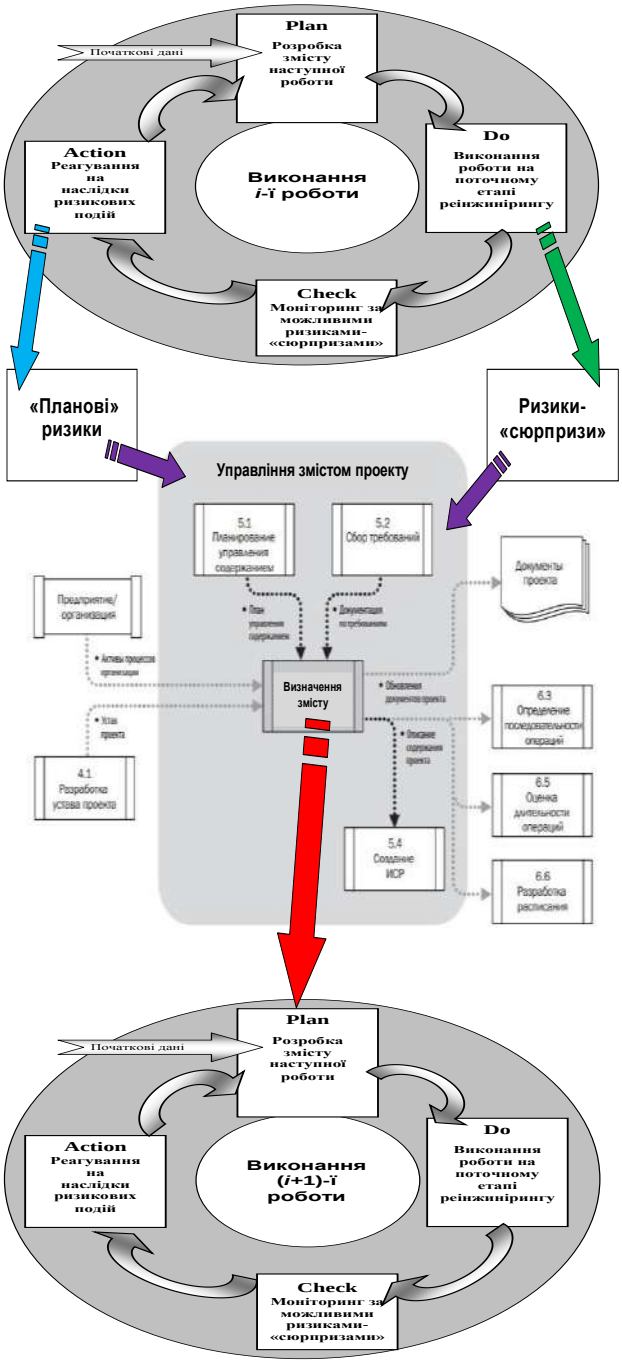


Рис. 5 – Управління змістом проекту реінжинірингу будівельних споруд в плановому та надзвичайному режимах

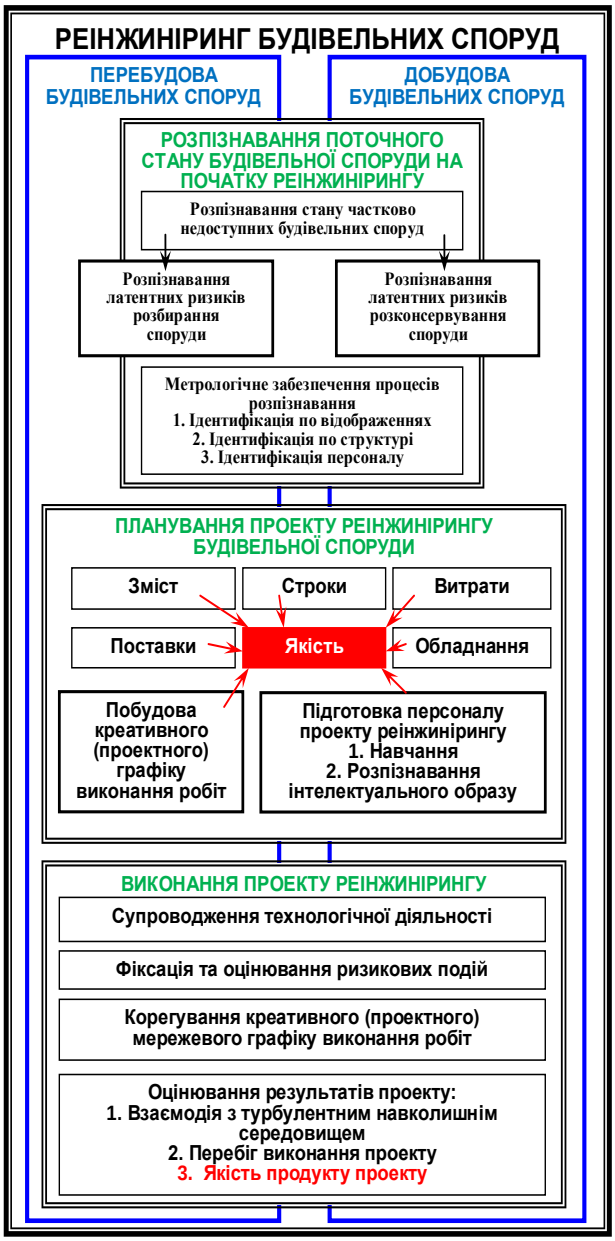


Рис. 6 – Схема загальної структури системи «REBUS» підтримки прийняття рішень в управлінні проектами реінжинірингу будівельних споруд

– стосовно продукту проекту:

- інсоляція найбільш затемнених зон приміщення збільшилася майже на 40 %;
- сумарні витрати на опалювання приміщень об'єкта зменшилися 26,6 % при збереженні середньої температури в приміщеннях;

кількість окису вуглецю (CO_2) в повітрі внутрішнього об'єму споруди зменшилася на 27,1 %.

Обговорення результатів

Результати роботи підтверджують можливість використання для управління проектами реінжинірингу будівельних споруд адаптивного мережевого графіку, в якому передбачено он-лайн планування та виконання додаткових робіт, пов'язаних із компенсацією наслідків минулих ризикових подій (сюрпризів), які виявляються під час аналізу будівлі.

Рис. 7 – Результат реінжинірингу будівельної споруди

Поставлені і вирішені в роботі завдання є основою для подальшого продовження наукових досліджень і практичного впровадження адаптивних моделей з метою математичної підтримки проектної діяльності на етапах запобігання і компенсації наслідків проектних ризиків.

Висновки

Запропоновано побудову змісту проекту реінжинірингу будівельних споруд у вигляді мережевого графіку робіт, до якого в будь-який момент можуть бути додані додаткові роботи, пов'язані із компенсацією наслідків ризикових подій.

Розроблено систему «REBUS» (*Re-engineering of building structures*) оптимізації та підтримки проектних рішень при реінжинірингу будівельних споруд, а також зниження вартості та терміну виконання проектів;

Проведено практичне випробування системи «REBUS» в рамках управління проектом реінжинірингу промислового об'єкта. В Одеському ТОВ «Геоморас» (Україна) із позитивним техніко-економічним ефектом проведені випробування системи «REBUS», яка була задіяна для управління проектом реінжинірингу промислового об'єкта з метою підвищення його вентиляційних, енергозберігаючих та освітлювальних характеристик.

Список літератури

1. **Burke, R. J.** Process reengineering: who embraces it and why? / **R. J. Burke** // *The TQM Magazine*. – 2004. – Vol. 16, 2. – P. 114 – 116. doi: 10.1108/09544780410523008.
2. **Rotini, F., Borgianni, Y., Cascini, G.** Re-engineering of products and processes. How to achieve global success in the changing marketplace / **F. Rotini, Y. Borgianni, G. Cascini** // *Springer*. – 2012. – P. 163. doi: 10.1007/978-1-4471-4017-7.
3. **Clemons, E. K., Row, M. C., Thatcher, M. E.** Indentifying sources of reengineering failures: a study of the behavioral factors contributing to reengineering risks / **E. K. Clemons, M. C. Row, M. E. Thatcher** // *Journal of Management Information Systems*. – 2000. – Vol. 12. – P. 9 – 36. doi:10.1080/07421222.1995.11518079 .
4. ДБН В.3.1-1-2002. Державні будівельні норми України. Експлуатація конструкцій та інженерного обладнання будівель і споруд та систем життєзабезпечення. Ремонт і підсилення несучих і огороджувальних будівельних конструкцій і основ промислових будинків та споруд. – К.: Державний комітет України з будівництва і архітектури. – 2003. – 56 с.
5. **Kolesnikova, K.** The project management of industrial buildings reengineering (reconstruction and completion) / **K. Kolesnikova, D. Monova, Ye. Naumenko, I. Kheblov, I. Gurjev** // *Автоматизація технологічних та бізнес-процесів*. – Одеса: ОНАХТ. – 2016. – № 12.
6. ГОСТ 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www/URL: http://www.lidermsk.ru/sitemedia/uploads/materials/docs/e9 / e92ac6fc175a6706f4425c328e01b998.pdf.
7. **Гогунский, В. Д.** Закон Бушуева – гарантия неполной трансформации серийных проектов в операционную деятельность / **В. Д. Гогунский, И. И. Становская, И. Н. Гурьев** // *Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии*. – Харьков, 2013. – № 4/3 (64). – С. 41 – 44.
8. Project Management Institute. Four Campus Boulevard, Newtown Square, PA 19073 – 3299 USA. – 2004. – 388 p.
9. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство PMBOK®) . – 5-е изд. – USA/США: Project Management Institute. – 2013. – 586 с.
10. **Savelyeva, O.** The physical criterion analogy in the management of project risks / **O. Savelyeva, D.**

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Monova, E. Berezovskaya, I. Heblov, I. Guryev // *Матеріали III Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами»*. – Київ, 23 листопада 2016 р. – С. 164 – 165.

11. **Бибик, Т. В.** Десинхронизация последствий аварий на атомных электростанциях / **Т. В. Бибик, Т. И. Носенко, Д. А. Пурич, Л. А. Одукалец** // *Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАНУ*. – 2010. – № 56. – С. 100 – 105.

Bibliography (transliterated)

1. **Burke, R. J.** Process reengineering: who embraces it and why? *The TQM Magazine*, 2004, **16, 2**, 114 – 116. doi: 10.1108/09544780410523008
2. **Rotini, F., Borgianni, Y., Cascini, G.** Reengineering of products and processes. How to achieve global success in the changing marketplace. *Springer*, 2012, 163. doi: 10.1007/978-1-4471-4017-7
3. **Clemons, E. K., Row, M. C., Thatcher, M. E.** Indentifying sources of reengineering failures: a study of the behavioral factors contributing to reengineering risks. *Journal of Management Information Systems*, 2000, **12**, 9 – 36. doi: 10.1080/07421222.1995.11518079
4. DBN V.3.1-1-2002. Derzhavni budivelni normi Ukrainy. Ekspluatatsiya konstruktsiy ta inzhenernogo obladnannya budivel i sporud ta sistem zhittezabezpechennya**.** Remont i pidsilennya nesuchih i ogorodzhuvalnih budivelnih konstruktsiy i osnov promislovih budinkiv ta sporud. – k.: derzhavniy komitet ukrayini z budivnitstva i arhitekturi, 2000, 56.
5. **Kolesnikova, K., Monova, D., Naumenko, Ye., Kheblov, I., Gurjev, I.** The project management of industrial buildings reengineering (reconstruction and completion). *Avtomatizatsiya tehnologichnih ta biznes-protsesiv*, Odesa: ONAHT, 2016, 12.
6. GOST 53778-2010. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tehnicheskogo sostoyaniya. – Rezhim dostupa: www/URL: http://www.lidermsk.ru/sitemedia/uploads/materials/docs/e9/e92ac6fc175a6706f4425c328e01b998.pdf.
7. **Gogunskiy, V. D., Stanovskaya, I. I., Gurev, I. N.** Zakon Bushueva – garantiya nepolnoy transformatsii seriynyih proektov v operatsionnuyu deyatelnost. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy. Informatsionnyie tehnologii*, 2013, **4 / 3 (64)**, 41 – 44.
8. Project Management Institute. Four Campus Boulevard, Newtown Square, PA 19073 – 3299 USA, 2004, 388.
9. Rukovodstvo k Svodu znaniy po upravleniyu proektami (Rukovodstvo PMBOK®). 5-e izd., USA/SShA: Project Management Institute, 2013, 586.
10. **Savelyeva, O., Monova, D., Berezovskaya, E., Heblov, I., Guryev I.** The physical criterion analogy in the management of project risks. *Materiali III mizhnarodnoyi naukovo-tehnichnoyi internet-konferentsiyi «Suchasni metodi, informatsiyne, programne ta tehnichne zabezpechennya sistem upravlinnya organizatsiyno-tehnichnimi ta tehnologichnimi kompleksami»*, 2016, 164 – 165.
11. **Bibik, T. V, Nosenko, T. I., Purich, D.A., Odukalets, L. A.** Desinhronizatsiya posledstviy avariy na atomnyih elektrostantsiyah. *Zbirnik naukovih prats institutu problem modelyuvannya v energetitsii im. Puhova NANU*, 2010, 56, 100 – 105.

Відомості про авторів (About authors)

Становський Олександр Леонідович **–** доктор технічних наук, професор, Одеський національний політехнічний університет, зав. кафедри нафтогазового і хімічного машинобудування, м. Одеса, Україна; e-mail: ostanovskyi@gmail.com.

Oleksandr Stanovskyi **–** Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief of Oil, Gas and Chemical Mechanical Engineering Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; e-mail: ostanovskyi@gmail.com.

Становська Іраїда Іванівна – кандидат технічних наук, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри вищої математики і моделювання систем; м. Одеса, Україна; e-mail: dashasweet2007@gmail.com.

Iraida Stanovska – Candidate of Technical Sciences, Docent of Mathematics and Modeling Systems Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; dashasweet2007@gmail.com.

Монова Дарія Анатоліївна – аспірант кафедри нафтогазового і хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет , м. Одеса, Україна; e-mail: dashasweet2007@gmail.com.

Dariya Monova – Graduate Student of Oil, Gas and Chemical Mechanical Engineering Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; e-mail: dashasweet2007@gmail.com.

Хеблов Ісмаіл – аспірант кафедри нафтогазового і хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна; e-mail: heblov@gmail.com.

Ismail Heblov – Graduate Student of Oil, Gas and Chemical Mechanical Engineering Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; e-mail: heblov@gmail.com.

Хусаін Валід Шер – аспірант кафедри нафтогазового і хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна; e-mail: walidsher@hotmail.com.

Valid Sher Khussain – Graduate Student of Oil, Gas and Chemical Mechanical Engineering Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; e-mail: walidsher@hotmail.com.

Торопенко Олексій Вікторович – аспірант кафедри нафтогазового і хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна; e-mail: alexey.toropenko@geomoras.net.

Olexiy Toropenko – Graduate Student of Oil, Gas and Chemical Mechanical Engineering Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; e-mail: alexey.toropenko@geomoras.net.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Становский, А. Л. Управление рисками-сюрпризами в проектах реинжиниринга строительных сооружений / **А. Л. Становский, И. И. Становская, Д. А. Монова, Х. Валид Шер, И. Хеблов, А. В. Торопенко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 103-109. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.14.

Please cite this article as:

Stanovskyi, A., Stanovska, I., Monova, D., Valid Sher H., Heblov I., Toropenko O. Risk-surprises management in the projects of re-engineering building structures. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 103–109, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.14.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Становський, О. Л. Управління ризиками-сюрпризами в проектах реінжинірингу будівельних споруд / **О. Л. Становський, І. І. Становська, Д. А. Монова, Х. Валід Шер, І. Хеблов, О. В. Торопенко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 103-109. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.14.

АННОТАЦИЯ Под реинжинирингом строительных сооружений понимали процессы перестройки или достройки, в которых осуществляется отклонение от первичного чертежа сооружения с добавлением новых элементов, и создания технологии изготовления последних. Разработана система «REBUS» поддержки проектных решений при реинжиниринге строительных сооружений. Проведены испытания системы «REBUS» в рамках управления проектом реинжиниринга промышленного объекта с положительным техническим эффектом.

Ключевые слова: *управление проектами; реинжиниринг строительных сооружений; перестройка; достройка; риски-сюрпризы; поддержка решений*

Надійшла (received) 17.02.2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

УДК 622.24.051.55 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.15

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРЕСУВАННЯ ТВЕРДОСПЛАВНИХ ПОРОДОРУЙНІВНИХ ЗУБКІВ У ШАРОШКИ БУРОВИХ ДОЛІТ

Р. С. ЯКИМ[1], А. М. СЛІПЧУК[2*]

[1]Дрогобицький державний педагогічний університет ім. І.Франка, м. Дрогобич, УКРАЇНА
[2]Кафедра технології машинобудування Національний Університет "Львівська політехніка", м. Львів, УКРАЇНА
**e-mail:andsl@ukr.net*

АНОТАЦІЯ *Встановлено, що за забезпечення існуючою технологією нормального розподілу розмірів отворів у вінцях шарошок під вставні твердосплавні зубки типорозміром 14 мм створюються сприятливі умови для групування селективних груп по розмірах отворів та вставних зубків. Запропоновано підхід для встановлення раціональних параметрів натягів для проектування з'єднання „зубок – шарошка" у дев'яти селективних групах. Такий підхід уможливлює забезпечити стале середнє значення натягу на рівні 0,103 мм. Формування селективних груп зубків і отворів під них забезпечує отримання заданої точності при складанні з'єднання „зубок – шарошка" за умов заданої точності оброблення отворів у вінцях шарошок. Це усуває виникнення нераціональних значень натягів, які знижують надійність з'єднання „зубок – шарошка".*
Ключові слова: *вставні породоруйнівні зубки; натяг; з'єднання „зубок-шарошка"; селективна група; шарошка*

REFINEMENT TECHNOLOGY PRESSING OF TUNGSTEN CARBIDE INSET CUTTER IN ROLLER CONE BIT

R. S. YAKYM[1], A. M. SLIPCHUK[2]

[1]Drohobych State Pedagogical University. Franko, m. Drohobych
[2]Department of Manufacturing Engineering National University "L'viv Polytechnic", Lviv, e-mail: andsl@ukr.net

ABSTRACT *Determined that modern technology to ensure normal distribution sizes of holes in the roller cone bit for installation cutter pick under the false standard size of 14 mm create favourable conditions for selective grouping groups the size of holes and plug tungsten carbide inset cutter. In article proposed a method to establish rational parameters tensions in the design of connections "cone - tungsten carbide inset cutter" nine selective groups. This approach enables to provide constant average value of tension at 0.103 mm. Formation of selective groups tungsten carbide inset cutter and holes for it a specified accuracy when drawing up connection "cone - tungsten carbide inset cutter " provided the desired precision cutting holes in the row of cone. It does not appear irrational values of the tensions which reduce the reliability of "cone - tungsten carbide inset cutter ".*

The purpose of the article is to highlight research dedicated to solving important practical problems to improve the existing production technology of roller cone bit of embedded rock cutting equipment. The main task is studying the effect of design parameters connection "cone - tungsten carbide inset cutter". We solve this task in the case when tungsten carbide inset cutter diameter below 14 mm and investigate the impact of tensions to ensure the reliability of the embedded rock cutting equipment.
Keywords: *tungsten carbide inset cutter; tension; connection "cone - tungsten carbide inset cutter"; selective group; cone.*

Вступ

Сьогодні для спорудження свердловин різноманітного призначення широко застосовуються бурові шарошкові долота оснащені вставними твердосплавними породоруйнівними зубками. Технологія виготовлення таких доліт є однією з найскладніших в долотобудуванні. Поміж проблем досягнення якості шарошкових бурових доліт однією з найдискусійніших є забезпечення якості кріплення твердосплавних вставок в тіло шарошок. Важкі умови роботи вставного породоруйнівного оснащення бурових доліт, особливості матеріалів шарошки й твердосплавних зубків, конструкція з'єднання „зубок – шарошка", особливості технології виготовлення спричинюють постановку комплексної проблеми. В даній статті аналізуються проблеми вдосконалення технології пресування вставних твердосплавних породоруйнівних зубків з метою підвищення якості породоруйнівного оснащення шарошок доліт призначених для буріння порід середньої твердості.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналізом даних досвіду виготовлення тришарошкових бурових доліт з вставним породоруйнівним оснащенням, а також результатів досліджень з окресленої проблеми встановлено, що існує декілька

© Р. С. ЯКИМ, А. М. СЛІПЧУК, 2017

перспективних рішень [1-11]. Першим є встановлення раціональних значень посадок з гарантованим натягом. Для чого встановлено характер напруженого стану у з'єднанні „зубок – шарошка" та раціональні параметри посадок твердосплавних вставок у вінці шарошок [1, 5-7, 12 – 14]. Одночасно авторами виявлено низку трудностей спричинених суперечливими вимогами до матеріалів деталей доліт. Тому у кожному випадку необхідно враховувати фізико-механічні показники матеріалів спряжених деталей.

Розроблено раціональні параметри технологічного процесу пресування із застосуванням нагріву шарошки і охолодження вставного зубка [1, 15]. Тим не менше, аналізом встановлено, що в умовах масового виготовлення шарошок з вставним твердосплавним породоруйнівним оснащенням не завжди можна добитися якості кріплення зубків діаметром більшим за 14 мм.

Важливими є розроблені рекомендації щодо призначення номінального діапазону натягів (0,111-0,167мм) для посадки зубків з середнім діаметром 12 мм [16]. Також, значної уваги заслуговують дослідження присвячені встановлення натягів, близьких до максимально допустимого значення за рахунок автоматизації процесу складання [17]. Однак аналізом заводського вхідного контролю твердосплавного зубка, що є покупним компонентом, встановлено параметри відхилення розмірів що загрожували б виникненню незавершеного виробництва. Особливо це було б відчутним за сучасних умов, коли на замовленні підприємства може бути мала кількість бурових доліт, що повинні оснащуватися відповідними типорозмірами зубків.

На основі аналізу сучасного стану виробництва доліт встановлено, що велике значення має раціональна організація процесу складання за допомогою формування селективних груп зубків і отворів. Тут найбільше уваги присвячено вивченню ефективного формування таких груп для твердосплавних вставок діаметром до 13 мм [1, 15, 18]. Застосування селективного складання уможливлює отримувати однорідніші з'єднання деталей: в пресових посадках найбільший натяг зменшується, найменший – збільшується, і обидва вони наближуються до середнього. Зменшення різниці між натягами підвищує однорідність, а отже, і якість з'єднання.

Аналізом точності процесу формоутворення отворів на вінцях шарошках встановлено непрогнозоване відхилення їхніх розмірів [19]. Особливо це стосується отворів під вставки діаметром більшим від 12 мм. Такий стан речей ускладнює процес складання через виникнення браку на технологічній операції пресування. Для усунення цієї проблеми, на виробництві застосовується розвірчування отворів під селективний зубок із застосуванням пошукової оправки [1].

Загалом, аналізом встановлено, що вдосконалення технології пресування твердосплавних зубків у вінці шарошок вимагає комплексного рішення яке передбачає вибір плавок долотних сталей що забезпечують необхідну тріщиностійкість, проведення якісної термообробки, забезпечення заданої точності формоутворення отворів, якості складання з'єднання „зубок – шарошка".

Мета статті

Метою статі є висвітлення досліджень присвячених вирішенню важливої практичної проблеми з вдосконалення існуючої технології виготовлення тришарошкових бурових доліт з твердосплавним вставним породоруйнівним оснащенням. З цією метою поставлено задачу вивчити вплив параметрів конструкції з'єднання „зубок – шарошка" на прикладі застосування твердосплавних зубків діаметром не нижче 14 мм та дослідити вплив натягів для забезпечення надійності вставного породоруйнівного оснащення.

Виклад основного матеріалу

Вихід з ладу вставного твердосплавного породоруйнівного оснащення є наслідком низки причин поміж яких можна виділити недосконаліть технології виготовлення доліт. Фіксуються випадки руйнування твердосплавних зубків чи їхнє випадання (рис. 1). Як наслідок, вінці шарошок зазнають зносу та катастрофічного руйнування. Це, як правило, наслідок неякісного пресового з'єднання „зубок – шарошка".

Розглянемо модель подану на рис. 2. Тут E_1 і E_2 – пружні складові системи, що моделюють напружений стан ділянок у зоні спряження „отвір – хвостовик". Пряма AB – ілюструє характеристику пружних складових (відповідно до діаграми розтягу стандартних зразків). У ситуаціях, коли сили P близькі до гранично допустимих, зміщення зубка на значення Δ від дії сили F сприяє сила P_2. Отже, для надійності з'єднання необхідно щоб значення натягу задовольняло таку умову. Коли сила P_1 спричинить напружений стан рівний граничній точці B (після якої настає пластична деформація чи утворення тріщин в металі), P_2 спричинить наближений до нуля напружений стан, що відповідає точці A. При цьому сила F є максимальною, яка тільки може виникнути в умовах руйнування породи вибою твердосплавним зубком.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

а

б

Рис. 1 – Загальний вигляд зруйнованого породоруйнівного оснащення на найбільш навантажених вінцях шарошки тришарошкового бурового долота 269,9 ОК-ПВ:
а – випадання і зруйнування породоруйнівної частини твердосплавних зубків та завальцьовування вінця шарошки,
б – випадання твердосплавних зубків шарошки

Аналізом проблем, що виникають під час технологічного процесу складання з'єднання „зубок-шарошка" встановлено, що не завжди можна досягти вимог якості. Особливо це стосується випадків коли необхідно застосовувати твердосплавні зубки діаметром від 14 мм виготовлених згідно ТУ 48-4205-44-2002. Застосовувана на виробництві методика групової заміни не дає стабільних результатів. Аналізом встановлено, що на відміну від хвостовика твердосплавної вставки, поверхня отвору вінця при пресуванні зазнає пластичної деформації, також спостерігається зріз і зминання. Також у вінцях шарошок виявлено негативний прояв „крайового ефекту" (рис. 3). Зокрема, у початковий момент, коли відбувається наживлення хвостовика твердосплавного зубка, різко зростають контактні напруження у ділянці контакту „торець хвостовика – вхідна частина отвору" (рис. 3, *а*).

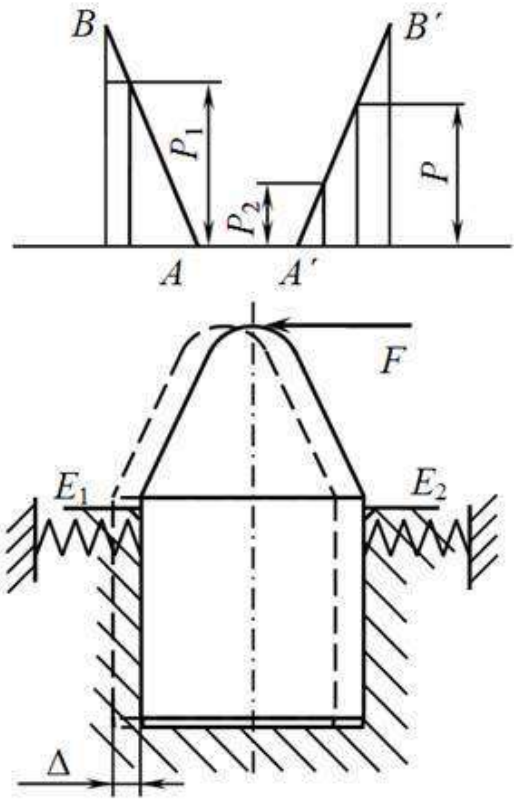


Рис. 2 – Моделювання спряження твердосплавного породоруйнівного зубка з отвором у тілі шарошки бурового долота

У процесі пресування характер розподілу напружень змінюється (рис. 3). Відповідно до того, як різко зростає зусилля при наживленні хвостовика, зростає й напружений стан у вхідній ділянці отвору $\sigma_{p\ кр\ max}$ (рис. 3, *а*). У процесі пресування значення цього зусилля зменшується і досягнувши $\sigma_{p\ кр}$ зберігає певну сталість. У вхідній частині отвору залишається пік напружень $\sigma'_{p\ кр}$ (рис. 3, *в*), при цьому найменші значення напружень між двома піками є мінімальним σ_p. Відтак необхідно забезпечити такий раціональний натяг, за якого не виникатиме мікротріщин у тілі вінця шарошки чи перенапруження хвостовика вставного зубка що спричинить його руйнування. Або ж твердосплавний зубок не випаде під дією циклічного навантаження. З цією метою встановимо параметри селективних груп, застосування яких добре зарекомендувало себе при пресуванні вставок малих діаметрів.

Отже, для зубків $\varnothing 14{,}14_{-0{,}027}$ мм існуючою технологією забезпечується формоутворення отворів у вінцях шарошок розмірами $\varnothing$14,00 – 14,05 мм. Відтак натяг у з'єднанні „зубок – шарошка" змінюється від N_{max} = 0,140 мм до N_{min} = 0,063 мм.

Такі значення натягів не відповідають існуючим вимогам, що діють на виробництві. Зокрема, нормативна документація регламентує значення натягу в розглядуваному з'єднанні у межах від N_{min} = 0,087 мм до N_{max} = 0,143 мм. Виходячи з цього, виправданим є застосування селективного складання та забезпечення точності отримання конструкторських показників отворів. З цією метою аналізували точність геометричних параметрів хвостовиків зубків та отворів під них.

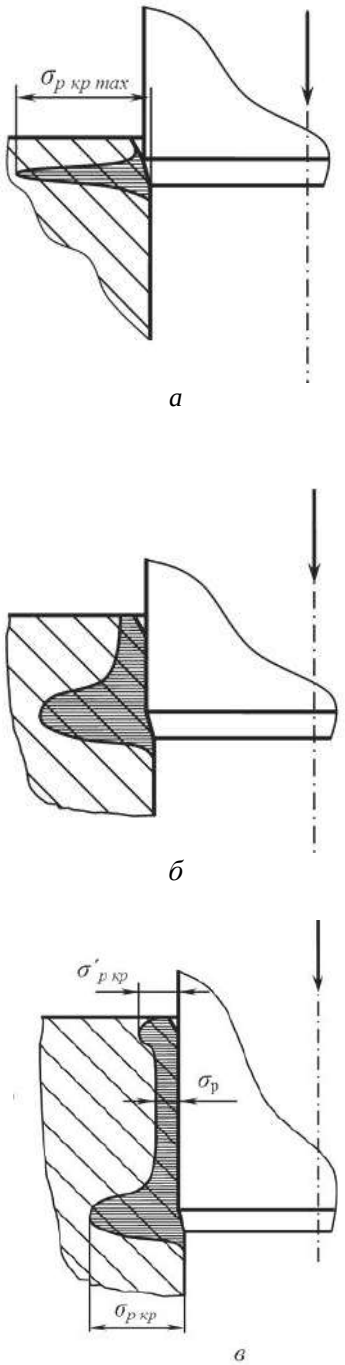


Рис. 3 – Характер напруження у зоні „зубок – шарошка" при пресуванні

Визначення точності геометричних характеристик партії деталей проводили на базі виробничих потужностей підприємства що спеціалізується на виготовленні тришарошкових бурових доліт (м. Дрогобич). Здійснено вибірку розмірів отворів у шарошках кількістю $N_{отв}$=1000 шт. із заводської партії та з партії поставки (10000 шт.) зубків $N_з$=1000 шт.

У результаті вимірювань отримані дійсні розміри D_i (діаметри отворів на шарошках) та d_i (діаметри зубків) розміщували у послідовності збільшення їхніх значень; отримали ряди випадкових дискретних величин. Це уможливило висунути гіпотезу H: розміри діаметрів зубків та розміри діаметрів отворів шарошок підпорядковані нормальному закону розподілу. В таких випадках діапазон розсіювання результатів досліджень рекомендується розбивати на 8-15 інтервалів [20]. При такому дослідженні діапазон розсіювання розмірів було розділено на 9 інтервалів, відповідно до яких зроблено групування отриманих значень дійсних розмірів, визначено середнє значення розміру в інтервалах l_i та емпіричні n_i і теоретичні частоти n_i' (рис. 4, 5).

Теоретичні частоти для центрів інтервалів розмірів зубків і отворів у шарошках знаходили за допомогою функції Лапласа [20], при цьому виходили з того, що крива нормального розподілу (крива Гауса) визначається рівнянням:

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right),$$

де σ – середнє квадратичне відхилення; a – середнє значення сукупності випадкових величин; x – випадкова величина.

Середнє арифметичне значення дійсних розмірів: для отворів $\bar{l}_{отв} = 14{,}024$ мм., для зубків $\bar{l}_3 = 14{,}127$ мм.

Середнє квадратичне відхилення: для отворів $s_{отв} = 0{,}014$, для зубків $s_3 = 0{,}0078$.

Істинність висунутої гіпотези H перевіряли за критерієм Пірсона χ^2:

$$\chi^2_{емпір} = \sum_{i=1}^{9} (n_i - n_i')^2 / n_i$$

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

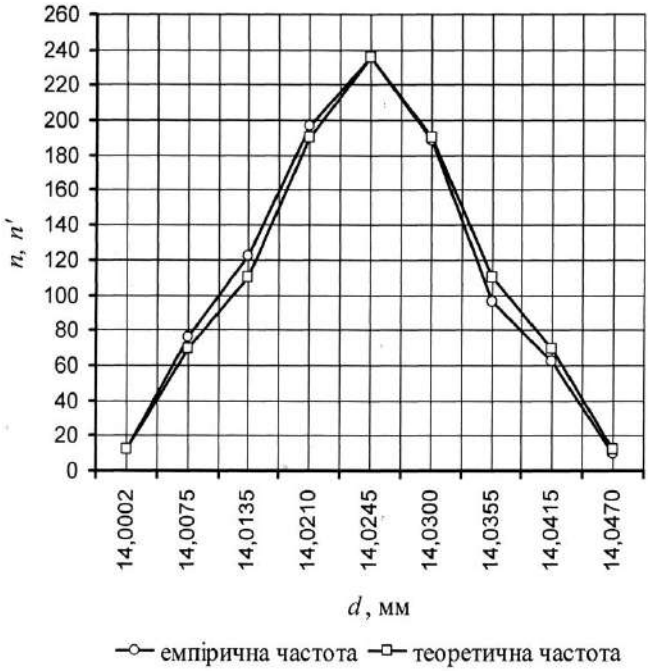


Рис. 4 – Криві розподілу розмірів отворів

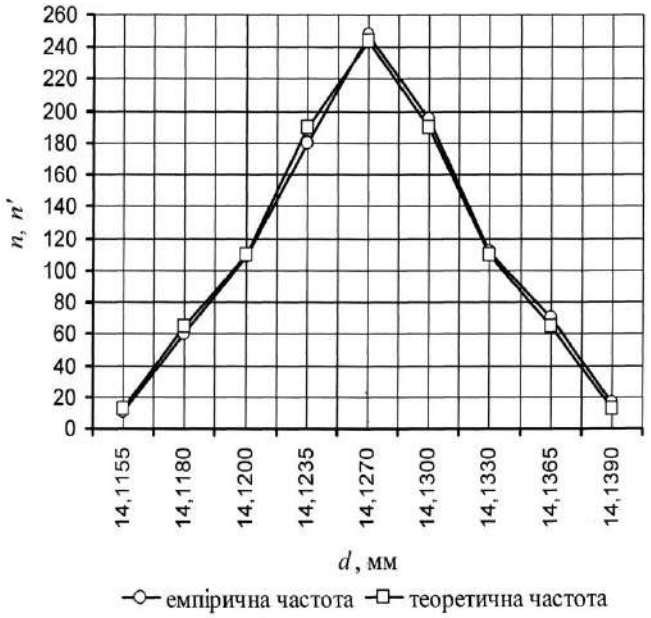


Рис. 5 – Криві розподілу розмірів зубків

Отримали: для отворів $\chi^2_{отв} = 5{,}382$, для зубків $\chi^2_з = 2{,}465$.

Оскільки за даними вибірки оцінюється два параметри ($c = 2$) нормального закону розподілу по кількості інтервалів $N = 9$, то у цьому випадку число ступенів вільності дорівнює $k = N - c - 1 = 6$. Тоді, згідно таблиці IV [20], при рівні значимості $\alpha = 0{,}05$ маємо $\chi^2_{кр} = 12{,}6$. Оскільки $\chi^2_{емпір} < \chi^2_{кр}$, то гіпотеза про нормальність генеральних сукупностей, з якої отримані вибірки як для розмірів отворів так і хвостовиків зубків, не суперечить проведеним експериментальним дослідженням.

Оскільки центри групування практично співпадають і криві розподілу розмірів з'єднуваних деталей відповідають закону нормального розподілу, кількість з'єднань „зубок – шарошка" в однойменних групах приблизно однакова. Це забезпечує умови для формування селективних груп зубків і отворів. Залежно від значень границь відхилень розмірів твердосплавних зубків, які є покупними комплектуючими у виробництві доліт, можна сформувати оптимальну кількість таких груп. Наприклад, для твердосплавних зубків розглядуваного типорозміру, кількість селективних груп рівне 9. З іншої сторони, зважаючи на складність технології формоутворення отворів у шарошці під вставні зубки, можна також підбирати групи отворів з оптимальними параметрами відхилень. Тоді основною проблемою буде створення селективних груп з такими параметрами, щоб не допустити виникнення незавершеного виробництва. Одночасно важливо добиватися заданого рівня шорсткості отворів не нижче $R_a = 2{,}5$ мкм. Якщо контролем виявлено факт деформації тіла шарошки після термообробки необхідним є уведення операції калібрування отворів з відповідним коригуванням натягу в з'єднанні „зубок – шарошка".

Висновки

Встановлено, що за умов забезпечення існуючою технологією нормального розподілу розмірів отворів у вінцях шарошок під вставні твердосплавні зубки типорозміром 14 мм створюються сприятливі умови для групування селективних груп по розмірах отворів та вставних зубків. Запропоновано підхід для встановлення раціональних параметрів натягів для проектування з'єднання „зубок – шарошка" у дев'яти селективних групах. Такий підхід уможливлює забезпечити стале середнє значення натягу на рівні 0,103 мм, що цілком задовольняє вимоги надійного кріплення зубка та попередження виникнення мікротріщин в тілі вінців шарошки. Формування селективних груп зубків і отворів під них забезпечує отримання заданої точності при складанні з'єднання „зубок – шарошка" за умов заданої точності оброблення отворів у вінцях шарошок. Це усуває виникнення нераціональних значень натягів, які знижують надійність з'єднання „зубок – шарошка".

Надалі актуальним є розробка нових конструкцій ефективного розташування вставного породоруйнівного оснащення шарошок та автоматизації процесів селективного складання з'єднання „зубок – шарошка".

Список літератури

1. **Яким, Р. С.** Науково-практичні основи технології виготовлення тришарошкових бурових доліт та підвищення їх якості і ефективності: монографія / **Р. С. Яким, Ю. Д. Петрина, І. С. Яким.** – *Івано-Франківськ: Видання ІФНТУНГ*. – 2011. – 384 с.
2. **Doll, G. L.** Improving the performance of rolling contact bearings with tribological coatings / **G. L. Doll, R. D. Evans, and C. R**. **Ribaudo** // *Surface Engineering in Materials Science III, The Minerals, Metals & Materials Society Journal*. – 2005, pp. 153-162.
3. **Harris, T. A.** Rolling Bearing Analysis Essential Concepts of Bearing Technology / **T.A. Harris, M.N. Kotzalas** // *Fifth Edition, CRC Press, Boca Raton*. – 2007.
4. **Nixon, H.** Accessing and Predicting the Performance of Bearings in Debris Contaminated Lubrication Environment / **H. Ai. X. Nixon, J. Cogdell, G. Fox** // *International Off-Highway & Power Plant Congress & Exposition*, Indianapolis. – 1999. – 13.
5. **Schroder, J.** Cone Retention and Tapered Bearing Preload System for Roller Cone Bit / **J. Schroder** // *US patent application filed* . – 2011. No. 2.
6. **Zhou, R. S.** Contact Stress Model for Predicting Rolling Contact Fatigue / **R. S. Zhou, and H. A. Nixon** // *SEA Transactions Journal.* – 1992. – Vol. 101, No. 2. – 1. doi: 10.4271/921720
7. **Huang, Z.** Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on the failure analysis / **Z. Huang, Q. Li, J. Shuang, M. Yachao, H. Wengang, F. Yongtao** // *Engineering failure analysis*. – 2013. – V. 29. – 12-26. doi: 10.1016/j.engfailanal.2012.08.018
8. **Naganawa, S.** Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration / **S. Naganawa** // *Journal of petroleum science and engineering*. – 2012. – V. 82-83. – 140-150. doi: 10.1016/j.petrol.2012.01.014
9. **Kryzhanivs'kyi, E. I**. Contact fracture of rolling bodies of open bearings of three-cone rock bits in aqueous environment. / **E. I. Kryzhanivs'kyi, R. S. Yakym, L. E. Shmandrovs'kyi, Yu. D Petryna** // *Materials science journal.* – 2011. – 46.5. – 607-612 p. doi: 10.1007/s11003-011-9330-8
10. **Deng Y.** Theoretical and experimental study on the penetration rate for roller cone bits based on the rock dynamic strength and drilling parameters / **Y. Deng, C. Mian, J. Yan, Z. Yakun, Z. Daiwu, L. Yunhu** // *Journal of natural gas science and engineering*. – 2016. – 36. – 117-123. doi: 10.1016/j.jngse. 2016.10.019
11. **Schroder J.** Bearing innovations extend roller-cone bit life / **J. Schroder, D. Pasquale Maurizio, R. Alun, Y. Jesse** // O*il & gas journal.* – 2016. – 114, 6. – 50-55.
12. **Кремлев, В. И.** Повышение долговечности буровых шарошечных долот на основе совершенствования технологии сборки и упрочнения шарошек с твердосплавними зубками: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 „Технология машиностроения" / **В. И. Кремлев**. – Самара. – 2009. – 20 с.
13. **Яким, Р. С.** Підвищення якісних показників вставного породоруйнівного оснащення шарошок тришарошкових бурових доліт / **Р. С. Яким, Ю. Д. Петрина, І. С. Яким** // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2013. – № 3 (48). – С. 127 – 138.
14. **Яким, Р. С.** Конструкторсько-технологічні підходи у визначенні оптимального розміщення зубків на вінцях шарошок тришарошкових бурових доліт / **Р. С. Яким, А. М. Сліпчук** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. – Серія: Технології в машинобудуванні*. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 5 (1177). – С. 25 – 33.
15. **Петрина, Ю. Д.** Підвищення надійності вставних породоруйнівних зубків в тришарошкових бурових долотах / **Ю. Д. Петрина, Р. С. Яким, Д. Ю. Петрина, Т. П. Венгринюк, Н. Я. Пицків** // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2014. – № 1 (50). – С. 82 – 87.
16. **Крижанівський Є. І.** Підвищення якості кріплення твердосплавного озброєння шарошкових доліт / **Є. І. Крижанівський, І. В. Воєвідко, Г. С. Веселовський, Р. Й. Гук** // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2008. – № 4(29). –С. 17 – 21.
17. **Набатников, Ю. Ф.** Обеспечение качества соединений „твердосплавная вставка – отверстие" шарошечных буровых долот / **Ю. Ф. Набатников, Е. И. Сизова** // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2008. – № 3. – С.20-23.
18. **Яким, Р. С.** Вдосконалення технології виготовлення бурових доліт з вставним породоруйнівним оснащенням на етапі проектування процесу пресування твердосплавних вставок у шарошку / **Р. С. Яким, А. М. Сліпчук** // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. – 2015. – № 822. – С. 86-91.
19. **Яким, Р. С.** Вдосконалення технології виготовлення шарошок з вставним твердосплавним породоруйнівним оснащенням для тришарошкових бурових доліт / **Р. С. Яким, Ю. Д. Петрина, І. С. Яким** // *Перспективні технології та прилади*. – 2014. – № 5 (2). – С. 181 – 188.
20. **Смирнов, Н. В.** Курс вероятностей и математической статистики для технических приложений / **Н.В.Смирнов, Н. В. Дунин-Барковский** – М.: Наука, 1969. – 511 с.

Bibliography (transliterated)

1. **Yakym, R. S.** Naukovo-praktychni osnovy tekhnolohiyi vyhotovlennya trysharoshkovykh burovykh dolit ta pidvyshchennya yikh yakosti i efektyvnosti: monohrafiya. Ivano-Frankivs′k: Vydannya IFNTUNH,. – 2011, 384 s.
2. **Doll, G.L., Evans, R.D., and Ribaudo, C.R.,** Improving the performance of rolling contact bearings with tribological coatings. *Surface Engineering in Materials Science III, The Minerals, Metals & Materials Society Journal*, 2005, pp. 153-162.
3. **Harris, T.A. and Kotzalas, M.N.,** Rolling Bearing Analysis Essential Concepts of Bearing Technology. *Fifth Edition, CRC Press, Boca Raton*, 2007.
4. **Nixon, H., Ai, X., Cogdell, J., and Fox, G.** Accessing and Predicting the Performance of Bearings in Debris

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Contaminated Lubrication Environment, *International Off-Highway & Power Plant Congress & Exposition, Indianapolis*, 1999.

5. **Schroder, J.** Cone Retention and Tapered Bearing Preload System for Roller Cone Bit, US patent application filed. – 2011.
6. **Zhou, R. S., and Nixon, H.** A Contact Stress Model for Predicting Rolling Contact Fatigue, *SAE Technical Paper 921720 in SEA Transactions Journal*, 1992, Vol. **101**, No. 2. 1. doi: 10.4271/921720
7. **Huang, Z., Li Q., Zhou, J., Ma Y., Hu W., Fan Y.** Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on the failure analysis. *Engineering failure analysis*. 2013, **29**. 12-26. doi: 10.1016/j.engfailanal. 2012.08.018
8. **Naganawa, S.**. Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration. *Journal of petroleum science and engineering*. 2012, **82-83**. 140-150. doi: 10.1016/j.petrol.2012.01.014
9. **Kryzhanivs'kyi, E. I, Yakym, R. S, Shmandrovs'kyi, L. E., Petryna, Yu. D.** Contact fracture of rolling bodies of open bearings of three-cone rock bits in aqueous environment. *Materials science journal.* 2011, **46, 5**. 607-612. doi: 10.1007/s11003-011-9330-8
10. **Deng, Y., Chen, M., Jin, Y., Zhang Y., Zou D., Lu, Y.** Theoretical and experimental study on the penetration rate for roller cone bits based on the rock dynamic strength and drilling parameters. *Journal of natural gas science and engineering*. 2016, **36**. 117-123. Doi: 10.1016/j.jngse.2016.10.019
11. **Schroder, J., Pasquale Maurizio, D., Richards, A., Yorty, J.** Bearing innovations extend roller-cone bit life. *Oil & gas journal.* 2016, **114**. 6. 50-55.
12. **Kremlev, V. Y.** Povyshenye dolhovechnosty burovykh sharoshechnykh dolot na osnove sover-shenstvovanyya tekhnolohyy sborky y uprochnenyya sharoshek s tverdosplavnymy zubkamy: avtoref. dys. na soyskanye nauchn. stepeny kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 „Tekhnolohyya mashynostroenyya" – Samara, . – 2009. – 20 s.
13. **Yakym, R. S.** Pidvyshchennya yakisnykh pokaznykiv vstavnoho porodoruynivnoho osnashchennya sharo¬shok trysharoshkovykh burovykh dolit. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*,.013, **№ 3 (48)**, 127 – 138.
14. **Yakym, R. S., Slipchuk, A. M.** Konstruktors′ko-tekhnolohichni pidkhody u vyznachenni optymal′noho rozmishchen¬nya zubkiv na vintsyakh sharoshok trysharoshkovykh burovykh dolit. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu KHPI . Zbirnyk naukovykh prats, Seriya: Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni*, KH. : NTU KHPI , 2016, **№ 5 (1177)**, 25 – 33.
15. **Petryna, Yu. D., Yakym, R. S., Petryna, D. Yu., Venhrynyuk, T. P., Pytskiv, N.** Pidvyshchennya nadiynosti vstavnykh porodoruynivnykh zubkiv v trysharoshkovykh burovykh dolotakh. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 2014, **№ 1 (50)**, 82 – 87.
16. **Kryzhanivs′kyy, Ye. I., Voyevidko, I. V., Veselovs′kyy, H. S., Huk, R. Y.**. Pidvyshchennya yakosti kriplennya tverdosplavnoho ozbroyennya sharoshkovykh dolit. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 2008, **№ 4(29)**. 17 – 21.
17. **Nabatnykov, Yu. F., Syzova, E. Y.**. Obespechenye kachestva soedynenyy „tverdosplavnaya vstavka – otverstye" sharoshechnykh burovykh dolot. *Hornoe oborudovanye y élektromekhanyka*, 2008, **№ 3**, 20-23.
18. **Yakym, R. S., Slipchuk, A. M.**. Vdoskonalennya tekhnolohiyi vyhotovlennya burovykh dolit z vstavnym porodo-ruynivnym osnashchennyam na etapi proektuvannya protsesu presuvannya tverdosplavnykh vstavok u sharoshku. *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politekhnika : Optymizatsiya vyrobnychykh protsesiv i tekhnichnyy kontrol' u mashynobuduvanni ta pryladobuduvann*i, 2015, **№ 822**, 86-91.
19. **Yakym, R. S., Petryna, Yu. D., Yakym, I. S.**. Vdoskonalennya tekhnolohiyi vyhotovlennya sharoshok z vstavnym tverdosplavnym porodoruynivnym osnashchennyam dlya trysharoshkovykh burovykh dolit. *Perspektyvni tekhnolohiyi ta prylady*, 2014, **№ 5 (2),** 181 – 188.
20. **Smyrnov, N. V., Dunyn-Barkovskyy, N. V.**. Kurs veroyatnostey y matema-tycheskoy statystyky dlya tekhnycheskykh prylozhenyy, M.: Nauka, 1969, 511 s.

Відомості про авторів (About authors)

Яким Роман Степанович – доктор технічних наук, професор, Дрогобицький державний педагогічний університет ім. І.Франка, професор кафедри машинознавства та основ технологій, м. Дрогобич. Україна. e-mail: Jakym.r@online.ua.

Roman Stepanovich Yashkym - Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Drohobych State Pedagogical University. Franko Ukraine; e-mail: Jakym.r@online.ua.

Сліпчук Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, доценкт, Національний університет "Львівська політехніка" доцент кафедри технології машинобудування. м. Львів. Україна, e-mail: andsl@ukr.net.

Andriy Mukolaevuch Slipchuk - Candidate of Technical Sciences, Docent of Lviv Polytechnic National University, Ukraine; e-mail: andsl@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Сліпчук, А. М. Підвищення якості технології пресування твердосплавних породоруйнівних зубків у шарошки бурових доліт / **Р. С. Яким, А. М. Сліпчук** // *Вестник НТУ ХПИ , Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ ХПИ. – 2017. – № 7 (1229) . – С. 110-117. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.15.

Please cite this article as:

Yashkym, R. Slipchuk, A. Refinement technology pressing of tungsten carbide inset cutter in roller cone bit. *Bulletin of NTU KhPI. Series: New solutions in modern technologies.*– Kharkiv: NTU KhPI, 2017, **7**(1229),110–117, doi:10.20998/2413 9452017.07.15.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Слипчук, А. М. Повышение качества технологии прессования твердосплавных породоразрушающих зубков в шарошке бурового долота / **Р. С. Яким, А. М. Слипчук,** // *Вісник НТУ ХПІ , Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*, Харків: НТУ ХПІ. – 2017. – № 7 (1229). – С. 110-117. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.15.

АННОТАЦИЯ *Установлено, что за обеспечение существующей технологии нормального распределения размеров отверстий в венцах шарошек под вставные твердосплавные зубки типоразмером 14 мм создаются благоприятные условия для группировки селективных групп по размерам отверстий и вставных зубков. Предложен подход для установления рациональных параметров натяжения для проектирования соединения зубок - шарошка в девяти селективных группах. Такой подход позволяет обеспечить устойчивое среднее значение натяжения на уровне 0,103 мм. Формирования селективных групп зубков и отверстий под них обеспечивает получение заданной точности при составлении соединения зубок - шарошка в условиях заданной точности обработки отверстий в венцах шарошек. Это устраняет возникновение нерациональных значений натяжения, которые снижают надежность соединения зубок - шарошка .*

Ключевые слова: *вставные породоразрушающего зубки; натяжение; соединение зубок-шарошка ; селективная группа; шарошка.*

Надійшла (received) 10.03.2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

УДК 510.635:004.891(045) doi:10.20998/2413-4295.2017.07.16

КРИТЕРІЇ АНАЛІЗУ ЛОГІКО-ЛІНГВІСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РЕЧЕНЬ ПРИРОДНОЇ МОВИ

А. І. ВАВІЛЕНКОВА

кафедра комп'ютеризованих систем управління, Національний авіаційний університет, Київ, УКРАЇНА
e-mail: a_vavilenkova@mail.ru

АНОТАЦІЯ *Для здійснення змістовного аналізу електронних текстових документів запропоновано використовувати формальні логіко-лінгвістичні моделі. Метою статті є опис критеріїв аналізу формальних моделей, що здатні відображати зміст речень природної мови та формуються з використанням математичного апарату логіки предикатів. Описані критерії аналізу логіко-лінгвістичних моделей необхідні для побудови формальних моделей електронних текстових документів.*
Ключові слова: *логіко-лінгвістична модель; природна мова; аналіз; зміст; текст*

ANALYSIS CRITERIA OF LOGIC AND LINGUISTIC MODELS OF NATURAL LANGUAGE SENTENCES

A. VAVILENKOVA

Department of Computerized Control Systems, National Aviation University, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT *The article describes the main text models used today as a tool for content processing electronic text documents. To make a content analysis author proposes to use formal logic and linguistic models, which are based on functional relationships between the principal and subordinate parts of natural language sentences. The article is to describe the criteria for analysis of formal models that can reflect the content of natural language sentences and which are formed using mathematical tools of predicate logic. For this purpose, the study researches principles of construction of logic and linguistic models of natural language sentences and formulates four criteria of analysis. First criterion analyzes the number of simple predicates in logic and linguistic model that helps to identify information about the type and composition of natural language sentences. The second criterion analyzes potency of set of predicate variables and constants of logic and linguistic model, which affects the number of simple predicates and identifies the type of individual forms of logic and linguistic model. The third criterion focuses on the analysis of logical operations that used in logic and linguistic model. That makes it possible to analyze the sequence of considerations referred to the natural language sentence. The forth criterion examines the presence of identical components in logic and linguistic models of natural language sentences from different sets of predicate variables and constants. Described analysis criteria of logic and linguistic models required to build formal models of electronic text documents using the mathematical apparatus of predicate logic.*
Keywords*: logic and linguistic model; natural language; analysis; content; text*

Вступ

На сьогоднішній день існує безліч практичних задач, що потребують змістовного аналізу різноманітних текстових електронних документів [1]. Цілком очевидно, що вручну, тобто без застосування інформаційних технологій, вирішити ці задачі неможливо. Проте першочерговою проблемою, що стоїть на шляху вирішення задач змістовного аналізу є відсутність теорії побудови ефективних інструментів змістовної обробки електронних текстових документів. Одним із таких інструментів є моделі пошуку.

У наш час для вилучення і представлення певної інформації з електронних текстових документів у комп'ютерних технологіях використовуються декілька типів моделей [2]:

– векторно-просторова модель, коли документ представляється у вигляді вектора ваг, що обрані, як правило, за частотою вживання відповідних термів у документі [3];

– булева модель – базується на теорії множин та математичній логіці, вагові значення терму в документі приймають лише два значення: 0 або 1 [3];

– ймовірнісна модель передбачає наявність навчальних наборів релевантних та не релевантних документів, обраних користувачем або отриманих автоматично на певному тестовому реченні [4];

– семантична мережа – розглядається як множина понять, в яку включаються слова тексту, що найбільш часто вживаються, а відповідно несуть найбільше змістовне навантаження; для кожного поняття формується набір асоціативних зв'язків, і чим частіше зустрічаються два поняття в реченнях тексту, тим вища ймовірність того,що вони пов'язані за змістом [5];

– мережа природних ієрархій термінів – алгоритм її формування передбачає реалізацію послідовності кроків, що охоплюють попередню обробку початкового текстового корпусу, визначення та сортування термінів, вибір необхідної кількості

© А. І. ВАВІЛЕНКОВА, 2017

найбільш вагомих вузлів графу горизонтального бачення [6].

При побудові більшості моделей пошуку зміст визначається множиною слів та стійких словосполучень – термів, які входять до нього без врахування взаємозв'язків, як "мішок зі словами" [7]. Таке припущення приводить до втрати змістовних відтінків, проте дозволяє реалізувати пошук та здійснити групування документів за формальними ознаками.

Тому важливим моментом для змістовного аналізу електронних текстових документів є правильний вибір формальної моделі представлення знань, що здатна була б відображати зміст текстової інформації.

Мета роботи

Метою роботи є опис критеріїв аналізу формальних моделей, що здатні відображати зміст речень природної мови та формуються з використанням математичного апарату логіки предикатів. Досягнення поставленої мети передбачає:

- аналіз існуючих текстових моделей;
- дослідження принципів побудови логіко-лінгвістичних моделей речень природної мови;
- формулювання критеріїв аналізу логіко-лінгвістичних моделей речень природної мови;
- демонстрація результатів застосування описаних критеріїв аналізу до речень природної мови з текстових документів наукового стилю.

Викладення основного матеріалу

Речення – це мінімальна і основна комунікативна одиниця мови, що має бути цілісною і передавати інформацію в усій складності залежностей і зв'язків [8]. Тому в основу принципів побудови логіко-лінгвістичних моделей покладено функціональні залежності між головними та другорядними членами речень природної мови. Керуючись гіпотезою "правило на правило", згідно з якою між граматичною структурою речення та логічною формою існує повна відповідність, можливістю застосування теореми про повноту [9], а також враховуючи те, що кожне речення природної мови характеризується граматичною організацією: будовою та граматичним вираженням (оформленням) членів речення, маємо:

– підмет – суб'єкт;

– присудок – відношення;

– додаток – об'єкт та предмет відношення;

– означення – характеристики суб'єкта та об'єкта та предмет відношення;

– обставина – характеристика відношення.

Таким чином, побудова логіко-лінгвістичних моделей речень природної мови [10] відбувається за наступними принципами:

1) визначення кількості простих атомарних предикатів ν^S;

2) фіксація значень елементів кортежу логічних операцій $O(S)$ речення S:

$$O(S) = [\, o_e(S) \,\big|\, e = \overline{1,h}\,],$$

де h – загальна кількість логічних операцій, наявних у реченні S;

3) визначення множини відношень P^S між суб'єктами та об'єктами речення S, що фактично містить дії, стани або властивості суб'єкта;

4) фіксація множини предикатних констант H_p^S, що містять характеристики відношень між суб'єктами та об'єктами у реченні S;

5) визначення множини суб'єктів $X_p^S(h)$, що входять до речення S та пов'язані з об'єктами речення p-им відношенням, яке володіє h-ю характеристикою;

6) фіксація множини предикатних констант $G_p^S(x,h)$, що містять характеристики (параметри) суб'єктів, які входять до речення S;

7) визначення множини об'єктів $Y_p^S(x,g,h)$, що входять до речення S та пов'язані з суб'єктами речення $x \in X_p^S(h)$ з характеристиками $g \in G_p^S(x,h)$ p-им відношенням, яке володіє h-ю характеристикою;

8) фіксація множини предикатних констант $Q_p^S(x,g,y,h)$, що містять характеристики (параметри) об'єктів, які входять до речення S;

9) визначення множини предметів $Z_p^S(x,g,y,q,h)$ p-го відношення, яке володіє h-ю характеристикою, між суб'єктами $x \in X_p^S(h)$ з характеристиками $g \in G_p^S(x,h)$ та об'єктами $y \in Y_p^S(x,g,h)$ з характеристиками $q \in Q_p^S(x,g,y,h)$;

10) фіксація множини предикатних констант $R_p^S(x,g,y,q,z,h)$, що містить характеристики (параметри) предметів p-го відношення, яке володіє h-ю характеристикою, між суб'єктами $x \in X_p^S(h)$ з характеристиками $g \in G_p^S(x,h)$ та об'єктами $y \in Y_p^S(x,g,h)$ з характеристиками $q \in Q_p^S(x,g,y,h)$ у реченні S;

11) формування логічного виразу L^S, шляхом підстановки у нього змінних, отриманих за попередніми принципами побудови логіко-лінгвістичних моделей відповідно до кількості елементів зафіксованих множин.

Логіко-лінгвістичні моделі, побудовані за описаними вище принципами, є інтерпретацією семантико-синтаксичної структури речень природної

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

мови, так як будуються на основі наявних у реченні означальних (між означенням і підметом, означенням і додатком), обставинних (між присудком і обставинами), додаткових (між присудком і додатком), присудкових (між підметом і присудком) зв'язків.

Керуючись принципами побудови логіко-лінгвістичних моделей речень природної мови, можна сформулювати критерії для їх аналізу.

Критерій 1. Кількість простих предикатів в логіко-лінгвістичній моделі речення природної мови L^S. Цей критерій дає змогу визначити інформацію про тип та склад речення природної мови.

Якщо кількість простих предикатів в логіко-лінгвістичній моделі рівна одному $\nu^S = 1$, тобто $L^S = p_1(x_1, g_1, y_1, q_1, z_1, r_1, h_1)$, то вона описує просте речення природної мови без однорідних членів.

Якщо кількість простих предикатів більше одного $\nu^S > 1$ і при цьому прості предикати відрізняються однією або декількома (одна з яких відповідає за характеристику) компонентами, то логіко-лінгвістична модель описує просте речення з однорідними членами. Наприклад, логіко-лінгвістична модель

$$L^S = p_{11}(x_1, g_1, y_1, q_1, z_1, r_1, h_1) \,\&\, p_{12}(x_1, g_1, y_1, q_1, z_1, r_1, h_1)$$

описує речення з однорідними присудками, а модель

$$L^S = p_1(x_{11}, g_1, y_1, q_{11}, z_1, r_1, h_1) \,\&\, p_1(x_{12}, g_1, y_1, q_{11}, z_1, r_1, h_1) \,\&\, p_1(x_{11}, g_1, y_1, q_{12}, z_1, r_1, h_1) \,\&\, p_1(x_{12}, g_1, y_1, q_{12}, z_1, r_1, h_1)$$

описує просте поширене речення з однорідними підметами та однорідними означеннями, що характеризують об'єкт відношення.

Якщо кількість простих предикатів більше одного $\nu^S > 1$ і при цьому майже всі предикатні змінні та константи різні, то логіко-лінгвістична модель описує складне речення, яке в подальшому необхідно проаналізувати за ще декількома критеріями. Наприклад,

$$L^S = p_1(x_1, g_1, y_1, q_1, z_1, r_1, h_1) \,\&\, p_1'(x_1', g_1', y_1', q_1', z_1', r_1', h_1').$$

Критерій 2. Потужність множин предикатних змінних та констант логіко-лінгвістичної моделі.

Потужність множин предикатних змінних та констант впливає, в першу чергу, на кількість простих предикатів ν^S:

$$\nu^S = \sum_{p \in P^S} \sum_{h \in H_p^S} \nu_p^S(h),$$

$$\nu_p^S(h) = \sum_{x \in X_p^S(h)} \sum_{g \in G_p^S(x,h)} \nu_p^S(x, g, h),$$

$$\nu_p^S(x, g, h) = \sum_{y \in Y_p^S(x,g,h)} \sum_{q \in Q_p^S(x,g,y,h)} \nu_p^S(x, g, y, q, h),$$

$$\nu_p^S(x, g, y, q, h) = \sum_{z \in Z_p^S(x,g,y,q,h)} \left| R_p^S(x, g, y, q, z, h) \right|.$$

Також потужність множин визначає тип окремої форми логіко-лінгвістичної моделі.

Якщо просте речення природної мови містить лише одну частину, що має закінчений зміст, тобто $|P^S| = 1$; $|H_p^S| = 1$; $|X_p^S(h)| = 1$; $|G_p^S(x,h)| = 1$; $|Y_p^S(x,g,h)| = 1$; $|Q_p^S(x,g,y,h)| = 1$; $|Z_p^S(x,g,y,q,h)| = 1$; $|R_p^S(x,g,y,q,z,h)| = 1$.

Якщо множина H_p^S характеристик хоча б одного p-го відношення у реченні S між суб'єктом x та об'єктом y містить більше одного елемента і $|X_p^S(h)| = 1$; $|G_p^S(x,h)| = 1$; $|Y_p^S(x,g,h)| = 1$; $|Q_p^S(x,g,y,h)| = 1$; $|Z_p^S(x,g,y,q,h)| = 1$; $|R_p^S(x,g,y,q,z,h)| = 1$, то у реченні природної мови йдеться про різні обставини дії.

Якщо множина суб'єктів $X_p^S(h)$, що пов'язані з об'єктами речення p-им відношенням, яке володіє h-ю характеристикою, містить декілька елементів і $|P^S| = 1$; $|H_p^S| = 1$; $|G_p^S(x,h)| = 1$; $|Y_p^S(x,g,h)| = 1$; $|Q_p^S(x,g,y,h)| = 1$; $|Z_p^S(x,g,y,q,h)| = 1$; $|R_p^S(x,g,y,q,z,h)| = 1$, то речення просте з однорідними підметами.

Якщо множина об'єктів $Y_p^S(x,g,h)$, що пов'язані з суб'єктами речення p-им відношенням, яке володіє h-ю характеристикою, містить декілька елементів і $|P^S| = 1$; $|H_p^S| = 1$; $|X_p^S(h)| = 1$; $|G_p^S(x,h)| = 1$; $|Q_p^S(x,g,y,h)| = 1$; $|Z_p^S(x,g,y,q,h)| = 1$; $|R_p^S(x,g,y,q,z,h)| = 1$, то у реченні йдеться про декілька об'єктів відношень.

Якщо потужність множин $|P^S| \geq 2$; $|X_p^S(h)| \geq 2$, то речення природної мови складне, а ν^S завжди більше одиниці.

Критерій 3. Логічні операції, що використані в логіко-лінгвістичній моделі речення природної мови L^S. Так:

– операція кон'юнкції «&» свідчить про наявність у реченні послідовності певних дій, перерахування, ствердження істинності простих предикатів, що з'єднані цією операцією;

– операція диз'юнкції «√» свідчить про наявність у реченні послідовності подій, що протиставляються, зіставляються, взаємно виключаються або чергуються;

– операція імплікації «⟶» використовується між реченнями природної мови, у яких ідеться про певну подію та наслідок (результат) її виконання.

Таким чином, логічні операції дають змогу проаналізувати послідовність розмірковувань, про які йдеться у реченні природної мови.

Критерій 4. Наявність тотожних компонентів у логіко-лінгвістичній моделі речення природної мови із різних множин предикатних змінних та констант.

Якщо тотожні елементи знайдені в різних множинах однієї і тієї ж логіко-лінгвістичної моделі, то це свідчить про наявність у реченні синонімів, займенників або вказівних слів, що дозволили зробити в моделі синтез [11]. Аналіз того, в яких саме множинах предикатних змінних або констант наявні такі елементи дасть можливість говорити про те, які прийоми змістовної заміни були зроблені у реченні природної мови.

Наприклад, якщо збігаються елементи множини суб'єктів та предметів відношень у двох різних простих предикатах, то розглядається складне означальне речення, у якому останнє слово першого речення виступає суб'єктом другого, залежного речення, вираженим займенником.

Обговорення результатів

Сформульовані критерії аналізу електронних текстових документів пропонується застосувати для визначення та відновлення максимальної інформації з тексту наукового стилю [12], представленого такою логіко-лінгвістичною моделлю:

$$L^S = p_1(0,0,y_1,q_1,z_1,r_1,h_1)\,\&\,(p_1'(h_1,0,y_1',0,z_1',r_{11}',0)\,\&\,p_1'(h_1,0,y_1',0,z_1',r_{12}',0)\,\&\,p_1'(h_1,0,y_1',0,z_1',r_{13}',0)).$$

$$L^S = Описано(0,0,процес,формування,бази,знань\&СППР,обставин)\,\&\,(пов'язані(обставини,0,виявленням,0,ознак,важко\&пояснювальних,0)\,\&\,(пов'язані(обставини,0,виявленням,0,ознак,аномалій,0)\&\,(пов'язані(обставини,0,виявленням,0,ознак,атак,0)).$$

Логіко-лінгвістична модель послідовно піддається аналізу за кожним із сформульованих критеріїв.

За першим критерієм визначається кількість простих предикатів в логіко-лінгвістичній моделі речення природної мови, у даному випадку $v^S = 4$, що говорить про те, що речення не являється простим. Три прості предикати, що входять до складу моделі містять всі однакові компоненти, крім характеристики предмета відношень, четвертий простий предикат містить зовсім інші значення компонент. Це означає, що речення природної мови складне, а його друга частина містить однорідні означення.

За другим критерієм аналізу виявлено, що потужності множин відношень та суб'єктів відношень містять дорівнюють двом, а потужність множини характеристик предмета відношень дорівнює чотирьом. Отже, ще раз підтверджено, що речення природної мови складне.

За третім критерієм аналізу визначено, що у реченні йдеться про послідовність певних дій, перерахування, ствердження істинності простих предикатів, так як в логіко-лінгвістичній моделі використано лише операцію кон'юнкції.

Після застосування четвертого критерію аналізу видно, що в логіко-лінгвістичній моделі тотожними є елементи з множини характеристик відношень та множини суб'єктів, що говорить про використання у реченні дієприслівникового звороту або підрядного означального зв'язку.

Якщо співставити результати, отримані в результаті застосування критеріїв аналізу, та оригінальний текст: «*Описано процес формування бази знань СППР для обставин, пов'язаних з виявленням важко пояснюваних ознак аномалій та атак*» [12], то видно, що критерії аналізу дали достатньо точні показники щодо структури речення природної мови.

Висновки

У статті описано основні принципи формування логіко-лінгвістичних моделей, побудованих на основі використання граматичної організації речень природної мови. Це дало можливість сформулювати чотири критерії аналізу таких логіко-лінгвістичних моделей, за допомогою яких можна визначити інформацію про тип та склад речення природної мови та проаналізувати послідовність розмірковувань, про які йдеться у реченні.

Логіко-лінгвістична модель текстового документу – це абстрактна модель, яка об'єднує в собі основні властивості тексту та його складових частин, відображає основні взаємозв'язки між структурними компонентами, представляє собою впорядковану четвірку та масив логіко-лінгвістичних моделей речень природної мови, що входять до тексту. Тому описані критерії аналізу логіко-лінгвістичних моделей необхідні для побудови формальних моделей електронних текстових документів і являються необхідними складовими процесу їх автоматичного лінгвістичного аналізу.

Список літератури

1 **Jurafsky, D.** Natural Language Processing / **D. Jurafsky, C. Manning**. – Stanford University, 2012. – Available at: https://www.coursera.org/course/nlp/ – 15.05.2014.

2 **Ландэ, Д. В.** Интернетика: навигация в сложных сетях: модели и алгоритмы / **Ландэ Д. В., Снарский А. А., Безсуднов И. В.** – М.: Либроком, 2009. – 264 с.

3 **Zhang, Y.** Discriminative syntax-based word ordering for text generation / **Y. Zhang** // *Computational linguistics*. – 2015. – Vol.41, №3. – P. 503–538.

4 **Evans, V.** Lexical concepts, cognitive models and meaning-construction / **V. Evans** // *Journal of Cognitive semiotics*. – 2006. – P. 73–107.

5 **Kumar, J.** Duplicate and near duplicate documents detection / **J. Kumar, P. Govindarajulu** // *European journal of scientific research*. – 2009. – Vol.32. – P. 514 – 527.

6 **Geeraerts, D.** Cognitive linguistics: basic readings research / **Geeraerts D., Dirven R., John R.** – Berlin-New York: Publ. mouton de cruyter, 2006. – 486 p.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

7 **Jiawei, H.** Data Mining: Concepts and Techniques / **H. Jiawei, K. Micheline** // *Morgan Kaufmann Publishers*. – 2000.
8 **Gries, S. Th.** Corpus-based methods and cognitive semantics: the many meanings of to run / **S. Th. Gries** // *Corpora in cognitive linguistics: corpus-based approaches to syntax and lexis*. – 2006. – P. 57–99.
9 **Chang, C.** Practical linguistic steganography using contextual synonym substitution and a novel vertex coding method/ **C. Chang, S. Clark** // *Computational linguistics*. – 2014. – Vol.40, №2. – P. 403–448.
10 **Вавіленкова, А. І.** Способи виявлення логічних зв'язків між частинами текстових документів / **А. І. Вавіленкова** // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет»*: зб. наук. праць. – (Серія «Нові рішення в сучасних технологіях»). – 2016. – № 12 (1184). – С. 101 – 105. doi: 10.20998/2413-4295.2016.12.14.
11 **Вавиленкова, А. И.** Основные принципы синтеза логико-лингвистических моделей / **А. И. Вавиленкова** // *Кибернетика и системный анализ*. – 2015. – Т. 51, № 5. – С. 176 – 185.
12 **Akhmetov, B.** Support system for the weakly formalized problems in the provision of cybersecurity / **B. Akhmetov, V. Lakhno, Y. Boiko, A. Mishcenko** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – № 1/2 (85). – P. 4 – 15, doi: 10.15587/1729-4061.2017.90506.

Bibliography (transliterated)

1 **Jurafsky, D., Manning, C.** Natural Language Processing, Stanford University, 2012, Available at: https://www.coursera.org/course/nlp/ – 15.05.2014.
2 **Lande, D. V., Snarskiy, A. A., Bezsudnov, I. V.** Internet: navigation in complex networks: models and algorithms, M.: Librocom, 2009, 264 c.
3 **Zhang, Y.** Discriminative syntax-based word ordering for text generation. *Computational linguistics*, 2015, Vol. **41**, №3, P. 503–538.
4 **Evans, V.** Lexical concepts, cognitive models and meaning-construction. *Journal of Cognitive semiotics*, 2006, P. 73–107.
5 **Kumar, J., Govindarajulu, P.** Duplicate and near duplicate documents detection. *European journal of scientific research*, 2009, Vol. **32**, P. 514 – 527.
6 **Geeraerts, D., Dirven, R., John, R.** Cognitive linguistics: basic readings research, Berlin-New York: Publ. mouton de cruyter, 2006, 486 p.
7 **Jiawei, H., Micheline, K.** Data Mining: Concepts and Techniques. *Morgan Kaufmann Publishers*, 2000.
8 **Gries, S. Th.** Corpus-based methods and cognitive semantics: the many meanings of to run. *Corpora in cognitive linguistics: corpus-based approaches to syntax and lexis*, 2006, P. 57–99.
9 **Chang, C., Clark, S.** Practical linguistic steganography using contextual synonym substitution and a novel vertex coding method. *Computational linguistics*, 2014, Vol. **40**, №2, P. 403–448.
10 **Vavilenkova, A. I.** Methods of identifying logical connections between parts of text documents. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, № **12** (1184), 101 – 105. doi: 10.20998/2413-4295.2016.12.14.
11 **Vavilenkova, A. I.** Basic principles of synthesis of logic and linguistic models. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2015, **51**, № 5, 176 – 185.
12 **Akhmetov, B., Lakhno, V., Boiko, Y., Mishcenko, A.** Support system for the weakly formalized problems in the provision of cybersecurity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, № **1/2** (85), P. 4 – 15, doi: 10.15587/1729-4061.2017.90506.

Відомості про авторів (About authors)

Вавіленкова Анастасія Ігорівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний авіаційний університет, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління, м. Київ, Україна; e-mail: a_vavilenkova@mail.ua.

Anastasia Vavilenkova – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Computerized Control Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine; e-mail: a_vavilenkova@mail.ru.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Вавіленкова, А. І. Критерії аналізу логіко-лінгвістичних моделей речень природної мови / **А. І. Вавіленкова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ» . – 2017. – № 7 (1229) . – С. 118-122. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.16.

Please cite this article as:

Vavilenkova, A. Methods of identifying logical connections between parts of text documents. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 118–122, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.16.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Вавиленкова, А. И. Критерии анализа логико-лингвистических моделей предложений естественного языка / **А. И. Вавиленкова** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 118-122. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.16.

АННОТАЦИЯ *Для осуществления содержательного анализа электронных текстовых документов предложено использовать формальные логико-лингвистические модели. Целью статьи является описание критериев анализа формальных моделей, которые способны отображать содержание предложений естественного языка, используя математический аппарат логики предикатов. Описаны критерии анализа логико-лингвистических моделей, необходимые для построения формальных моделей электронных текстовых документов.*

Ключевые слова: *логико-лингвистическая модель; естественный язык; анализ; содержание; текст*

Поступила (received) 17.03.2017

УДК 621.314 : 621.316.7 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.17

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ КОНТЕКСТНИХ ДАНИХ

Є. В. ВЕРБИЦЬКИЙ[1*], А. Г. КИСЕЛЬОВА[2], Г. Д. КИСЕЛЬОВ[2]

[1] Кафедра промислової електроніки, факультет електроніки, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Київ, УКРАЇНА
[2] Кафедра системного проектування, ННК «Інститут прикладного системного аналізу», НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Київ, УКРАЇНА
**email: verbitskiy@bigmir.net*

АНОТАЦІЯ *В статті розглянута побудова контекстно-залежної системи керування електроспоживанням, що виконує задачі, пов'язані із прогнозуванням та інтелектуальним реагуванням на дії всіх електроустановок, об'єднаних за допомогою перетворювачів в єдине інформаційне середовище, з метою раціонального використання енергії, оперативного керування штатними та аварійними режимами роботи SmartGrid з урахуванням вимог забезпечення комфортності користувача.*
Ключові слова: *контекстно-залежне керування; система електроживлення; пусковий режим; відпрацювання збурень*

POWER GRID CONVERTER CONTROL IMPROVEMENT BASED ON CONTEXTUAL DATA

I. V. VERBYTSKYI [1], A. G.KYSELOVA[2] , G.D.KYSELOV[2]

[1] The department of Industrial Electronics, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE
[2] The department of System Design, Educational Scientific Complex "IASA", National Technical University of Ukraine " Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute ", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT *The current state of energy requires the development of new efficient approaches to coordinated management of the generation, conversion, accumulation and consumption of electrical energy in power systems of different levels, including for power systems built on the basis of the SmartGrid concept. The integration of electrical devices into a single system with the provision of a given quality of electric power consumption is achieved by using converter devices that allow the generators and consumers of energy dissimilar in the physical principle to unite in one network on the basis of the context. This system can manage large amounts of energy related data and have to be able to react in correct way when conditions real-time changes. The main goals are the construction of a context-dependent power management system that performs tasks related to forecasting and intelligent response to the actions of all electrical installations combined with converters into a single information environment for the purpose of rational energy use, operational management of normal and emergency modes of SmartGrid operation with regard to requirements for user comfort. The control system should be able to rationally manages energy, efficiently control normal and emergency conditions and to take into account the user comfort. Context-aware energy management system as a complex information processing system integrates such organization levels as: Renewable sources of energy; Power converters; Electrical devices; Digital sensors; User tasks.*
Keywords*: Context-aware system; power supply system; starting mode; perturbation processing*

Вступ

Основна мета, що стоїть перед інтелектуальними мережами або SmartGrid [1] - це створення системи керування, яка може прогнозувати та інтелектуально реагувати на дії всіх приєднаних електроустановок (навантажень і генераторів) за допомогою напівпровідникових перетворювачів електроенергії в єдиному інформаційному середовищі, з метою раціонального використання енергії, оперативного керування нормальними і аварійними режимами, при цьому враховувати комфортність користувача

При реалізації основної мети, необхідно врахувати наступні умови[2]:

1) Насиченість мережі активними елементами, що дозволяють змінювати топологічні параметри.

2) Велика кількість давачів, що вимірюють поточні значення параметрів середовища SmartGrid в нормальних і в аварійних ситуаціях.

3) стохастичні дані сонячної і вітрової генерації, пов'язаної з некерованістю зовнішнього енергетичного ресурсу.

4) стохастичні дані споживання електроенергії. Розподіл випадкової величини включень / виключень навантажень в середовищі SmartGrid.

Таким чином, контекстно-залежна система керування електроспоживанням (КЗСК) у вигляді складної системи обробки інформації об'єднує такі рівні як: відновлювані джерела енергії;

© Є. В. ВЕРБИЦЬКИЙ, А. Г. КИСЕЛЬОВА, Г. Д. КИСЕЛЬОВ, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

напівпровідникові перетворювачі електроенергії; пристрої; давачі; побажання користувача [3,4].

Системне керування має виконувати задачі, пов'язані із прогнозуванням та інтелектуальним керуванням на зміни режимів роботи всіх електроустановок, об'єднаних за допомогою перетворювачів в єдине інформаційне середовище, з метою раціонального використання енергії, оперативного керування штатними та аварійними режимами роботи SmartGrid з урахуванням вимог забезпечення комфортності користувача.

Ціль роботи

В роботі пропонується новий підхід керування системою електроживлення із залученням конекстних даних про навколишнє середовища, параметри системи та навантаження - контекст, що дозволяє розширити вибір доступних стратегій керування та забезпечити швидше відпрацювання збурень.

Основний матеріал

Одним із засобів, що сприяє формалізації станів системи є модель контексту [5].

Контекстом називається будь-яка інформація, яка використовується для опису стану, в якій знаходиться SmartGrid. Інтеграція в контекст інформації одержуваної від гетерогенних джерел, дозволяє отримати модель поточного стану реального SmartGrid, на підставі якої алгоритмами керування може бути згенеровано безліч керуючих рішень, що надходять на блок перетворювачів SmartGrid (рис. 1), що дає змогу підвищити ефективність керування систем електроживлення шляхом залучення більш ефективних стратегій керування, таких як упереджувальне, оптимальне, робастне керування і поєднання цих стратегій з найпоширенішим методом керування з компенсацією сигналу помилки [6].

Рис. 1 – Структура перетворення контексту

Система керування може обрати один з найефективнішних режимів роботи для поточного режиму роботи, зображених на рис. 2, залежно від наявності необхідних контекстних даних.

Контекст може бути наступних типів: 1) час; 2) координати; 3) середовище; 4) локація; 5) активність; 6) стан інфраструктури.

Достовірність прогнозування параметрів контексту збільшується за рахунок попередньої обробки часових рядів (ЧР), що надходять з датчиків SmartGrid

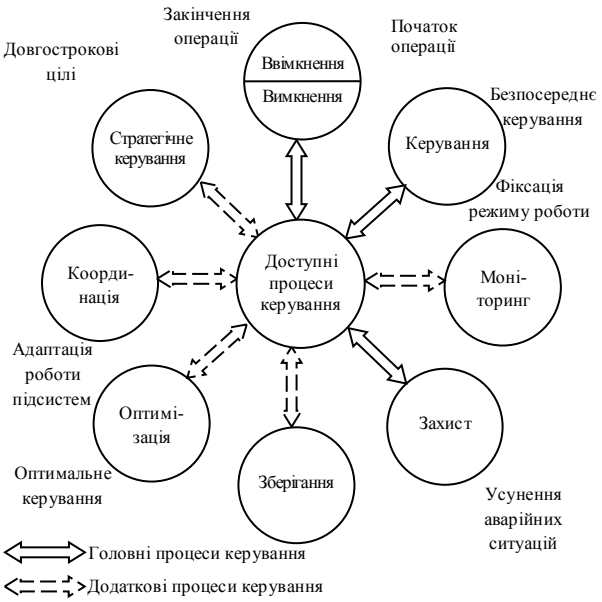


Рис. 2 – Режими роботи системи електроживлення

(рис. 1). Задачею обробки ЧР є зниження похибки прогнозування на заданому часовому горизонті прогнозу [7]. Параметром, за яким мінімізується ця похибка, є розмір вибірки членів ряду, попередніх по відношенню до прогнозованого члену ЧР. Похибка прогнозування має знаходитись в довірчому інтервалі, що досягається за допомогою регуляризації вибірки.

Для фільтрації ЧР досліджено наступні методи [8]: 1) просте ковзаюче середнє; 2) подвійне просте ковзаюче середнє; 3) просте експоненційне згладжування; 4) подвійне експоненційне згладжування; 5) фільтр Калмана. Оцінки можливості використання методів фільтрації виконувались на тестових ЧР з накладанням завад з нормальним розподілом ймовірності. На основі отриманих даних: похибки прогнозування членів досліджених часових рядів; обсягу використаних обчислювальних ресурсів; часу, що витрачається на обчислення - сформовано рекомендації експерту, щодо використання в КЗСК кожного з досліджених методів фільтрації, рис. 3.

Параметри алгоритмів прогнозування наведено в табл. 1.

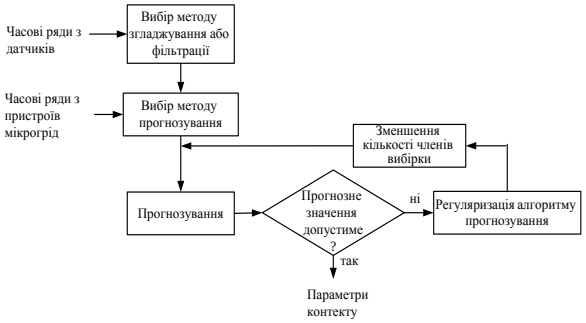


Рис.3 – Алгоритм обробки даних к контекстно-залежній системі

Таблиця 1 – Параметри алгоритму прогнозування

Умовні позначення параметрів	Опис умовних позначень
γ	Часовий горизонт прогнозу
t_{max}	Інтервал прогнозування ЧР
N	Кількість членів вибірки
t_k	Поточний момент часу
n_{min}	Мінімальна кількість членів вибірки
n_{max}	Максимальна кількість членів вибірки

Прогнозування членів часових рядів виконується за наступним алгоритмом (рис.4):

1) отримання поточного часового ряду;

2) визначення параметрів γ , n;

3) зчитування значення поточного члена ЧР $Y(t_k)$. За умови $t_k < t_{max}$ для поточного члена ЧР в момент часу t_k знаходиться прогнозоване значення $X(t_k + \gamma)$ на часовому горизонті прогнозу γ, яке запам'ятовується в динамічному списку прогнозованих членів ЧР;

4) розрахунок і збереження в лінійному списку значення середньоквадратичного відхилення (СКВ) $Q(t_k)$ прогнозованого члена ЧР у порівнянні з виміряним.

5) виявлення за критерієм Ірвіна аномальних членів ряду, для яких СКВ їх прогнозних значень знаходиться за межами довірчого інтервалу ($Q(t_k) > Q_{дов}$):

$$\lambda(t_k) = \frac{\left|Q(t_k) - Q(t_{k-1})\right|}{\left|Q(t_k)\right|},$$

де $\lambda(t_k)$ – коефіцієнт Ірвіна, $Q(t_k)$, $Q(t_{k-1})$ – СКВ членів ЧР в моменти часу t_k і t_{k-1};

6) порівняння розрахованого коефіцієнту Ірвіна $\lambda(t_k)$ з табличним значенням $\lambda_{таб}$. Якщо значення коефіцієнту Ірвіна перевищує табличне значення, зменшується кількість членів вибірки n і алгоритм повторюється з першого кроку. Якщо коефіцієнт Ірвіна є меншим за табличне значення, то прогнозні значення членів ЧР вважаються достовірними на інтервалі часу до t_{max}.

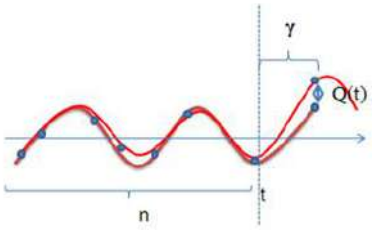


Рис. 4 – Модель прогнозування членів ЧР

На рис. 5 і 6, в якості прикладу, наведені результати порівняння роботи методу лінійного передбачення (ЛП) із застосуванням алгоритму регуляризації вибірки і без його застосування.

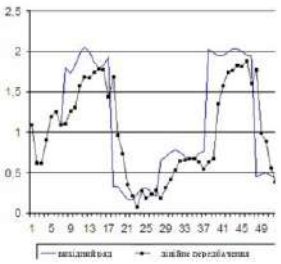


Рис. 5 – ЛП без застосування алгоритму регуляризації

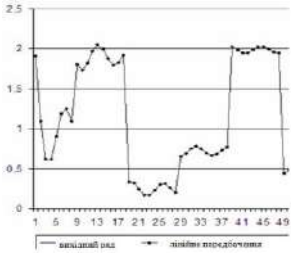


Рис. 6 – ЛП із застосуванням алгоритму регуляризації

Використання алгоритмів фільтрації і прогнозування з регуляризацією вибірки дозволяє зменшити обсяг математичних операцій при формуванні правил керування напівпровідниковими перетворювачами електроенергії та зменшити похибку прогнозування з (5-6) % до (1,5-2) %.

Для розширення можливостей контекстно-залежного керування в деяких випадках доцільне представлення контексту у формальній формі. Приклад формалізації контекстних даних ілюструються на прикладі системи відбору максимальної потужності від сонячної батареї (СБ). В цьому випадку для керування використовується струм I, напруга U і потужність P СБ, які нормуються значенням струму $I_{КЗ}$ в режимі короткого замикання, напругою в режимі холостого ходу U_{XX}, максимальною вихідною потужністю $P_{ММ}$ відповідно:

$$I^* = I / I_{КЗ}; U^* = U / U_{XX}; P^* = P / P_{МП}. \quad (1)$$

Також для керування доцільно використовувати: питому потужність сонячного випромінювання S^*, значення пульсації струму ΔI^*, значення вихідного опору системи для відбору потужності R^*, температури T_m^*.

Ефективність роботи СБ оцінюється значенням вихідної потужності P^*, яке залежить від значень виміряних даних всіх типів, $P^* = f(S,I^*,U^*,\Delta I^*,R^*,Tm)$. Інтеграція виміряних даних дозволяє повністю визначити режим роботи СБ за допомогою значення струму в точці максимальної потужності $I_{ММ}^*$, що дозволить зменшити обсяг оброблюваних даних в шість разів. Використовуючи інтегральний параметр і певні граничні умови дозволяє якісно охарактеризувати режими роботи СБ в сталому і перехідному режимах, що ілюструє рис. 7.

На ньому зображена функція вихідної потужності $P^* = f(I^*)$ із зазначеною на ній точкою максимальної потужності МП, якій відповідає струм $I_{МП}^*$. Також на кривій відзначені порогове значення потужності $P_П^*$, якому відповідають відхилення струму I^* від точки МП ΔI_1^*, ΔI_2^*.

Якщо вихідна потужність P* більше порогової, то СБ описується чи джерелом потужності, правіше цього діапазону СБ є джерелом напруги, лівіше - джерелом струму. За зміною значень струму

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

визначається зміна вихідної потужності СБ. На підставі наведеного аналізу формується контекст роботи СБ. Для прикладу в таблиці наведені умови формування та можливі значення двох атрибутів контексту - «Режим роботи» і «Вихідна потужність».

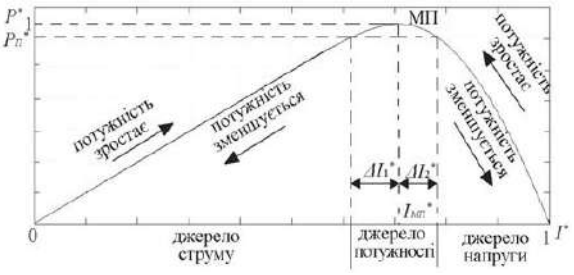


Рис.7 – СБ в сталому і перехідному режимах

Таблиця 2 – Умови формування атрибутів контексту

Умова	Контекст
$I^* < I_{МП}^* - \Delta I_1^*$	СБ: Режим роботи := джерело струму
$I_{МП}^* - \Delta I_1^* < I^* < I_{МП}^* + \Delta I_2^*$	СБ: Режим роботи := джерело напруги
$I^* > I_{МП}^* + \Delta I_2^*$	СБ: Режим роботи := джерело напруги
$(I_i^* < I_{МП}^*)$ AND $(I_i^* > I_{i-1}^*)$	СБ: Вихідна потужність := збільшується
$(I_i^* < I_{МП}^*)$ AND $(I_i^* < I_{i-1}^*)$	СБ: Вихідна потужність := зменшується
$(I_i^* > I_{МП}^*)$ AND $(I_i^* > I_{i-1}^*)$	СБ: Вихідна потужність := зменшується
$(I_i^* > I_{МП}^*))$ AND $(I_i^* < I_{i-1}^*)$	СБ: Вихідна потужність := збільшується

Частота зміни параметрів контексту значно менше частоти дискретизації вихідних даних і визначається частотою зміни параметрів навантаження та умов навколишнього середовища, тому контекстні дані, як пра-вило, передаються кілька разів на секунду. Кількість типів контекстних даних для СБ не перевищує десяти. Тому для сонячної електростанції, що складається з тисячі модулів, кількість переданих даних досягає 10^4 вибірок в секунду, що на чотири порядки менше, ніж при передачі ВР виміряних даних.

Можливі режими роботи, набір та тип контекстних даних та стратегії керування створюють множину можливих підходів керування силовим обладнанням та системою електроживлення в цілому. Процедура вибору найкращого серед можливих підходів полягає в ідентифікації поточного режиму, ранжуванні можливих стратегій керування відповідно до їх ефективності в даному режимі, перевірка забезпеченості даними кожної стратегії та вибору найкращої з них як показано на рис. 8.

Система електроживлення, зображена на рис. 9, складається з сонячних батарей та системи акумулювання енергії, під'єднаних до мережі через трифазні мостові інвертори напруги, та навантажень.

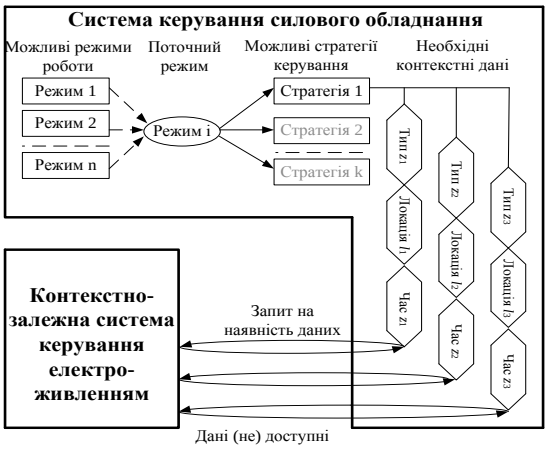


Рис.8 – Процедура вибору необхідного принципу керування

Згідно з рис. 8 для кожної стратегії керування визначається набір необхідних контекстних даних та надсилається запит на їх наявність. Якщо контекстні дані необхідного типу доступні, обирається одна з можливих стратегій керування.

Принцип застосування контекстно-залежного керування

Розглянемо одну з можливих структур системи електроживлення до якої входять джерела енергії на основі сонячних батарей, системи акумулювання енергії та навантажень, рис. 9.

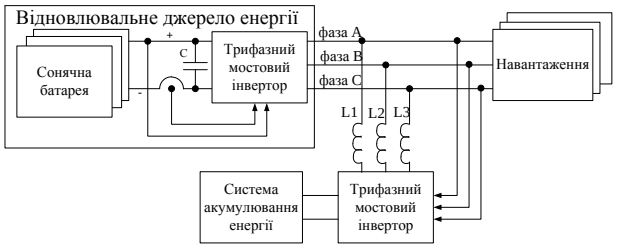


Рис. 9 – Структура системи електроживлення

Перетворювач, під'єднаний до сонячних батарей працює в режимі джерела напруги і виконує дві функції: пристрою відбирання максимального обсягу потужності від сонячних батарей та перетворення постійної напруги у трифазну. Для відбирання максимального обсягу енергії використовуються дані з давачів напруги і струму, під'єднаних на виході СБ. Конденсатор C виконує роль фільру і використовується для забезпечення протікання безперервного струму сонячної батареї.

Перетворювач системи акумулювання енергії працює в режимі джерела струму, для його керування використовується інформація з давачів напруги. Якщо потужність джерел є меншою ніж потужність навантажень, система акумулювання генерує необхідний обсяг енергії, у іншому випадку – споживає надлишок енергії. Діюче значення струму I_A, який генерується (споживається) системою акумулювання енергії визначається потужністю джерел P_S і навантажень P_L:

$$I_S = (P_S - P_L)/3U_{ph}, \quad (2)$$

де U_{ph} – номінальне діюче значення напруги фази.

За умови реалізації найпростішого принципу керування відбирання енергії від сонячної батареї забезпечується алгоритмом Pertub an observe (P&O) [9], у системі акумулювання реалізується принцип керування за відхиленням вихідної напруги. При цьому перетворювачі системи працюють незалежно один від одного. Ними використовується інформація з давачів, що належать до даної системи керування, додаткова обробка даних не використовується.

Вказаний підхід керування є досить ефективним лише за умови відсутності збурень, коли значення потужності джерел і нвантажень є постійними, в іншому випадку – в мережі після кожної зміни параметрів виникають тривалі перехідні процеси, що зменшують обсяг генерованої енергії і погіршують параметри якості напруги живлення мережі. Для ілюстрації цих недоліків синтезовано модель системи електроживлення у середовищі Simulink, що показана рис. 10. На рис. 11 показано її часові діаграми роботи.

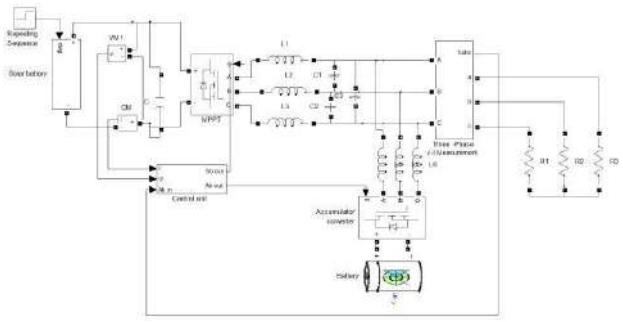


Рис. 10 – Модель системи електроживлення в системі Simulink

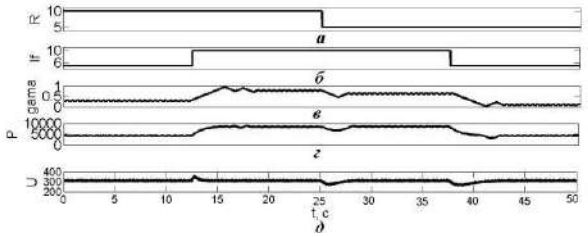


Рис. 11 – Часові діаграми роботи системи (коефіцієнт заповнення γ МРРТ (в), потужність на виході МРРТ Р (г), діюче значення напруги мережі (д)) за умови стрибкоподібної зміни опору навантаження (а) та фотоструму (б)

За умови використання керування по відхиленню вихідного параметра відпрацювання помилки здійснюється повільно тільки після появи помилки вихідного параметра внаслідок збурення, вказаний недолік призводить до появи тривалих перехідних процесів порядку декількох секунд, протягом яких від сонячної батареї відбирається потужність менше можливої, а діюче значення напруги відхиляється від номінального значення.

В контекстно-залежній системі електроживлення значення основних збурюючих факторів температури T, освітленості Ф (фотоструму I_0) сумарного опору навантажень R та значень параметрів перетворювачів системи зазвичай є відомими. Наявність вказаних даних дає можливість застосувати більш ефективні принципи керування в режимах пуску/зупинки, безпосередньому керуванні, стратегічному керуванні, захисті.

Для ефективного застосування вказаних алгоритмів доцільно визначити параметри математичної моделі системи. Для ефективного відбирання енергії від сонячної батареї необхідно знати її вольтамперну характеристику і залежність потужності від напруги.

$$I_{SB} = n_1\left(I_\Phi - I_0\left(e^{qU_{SB}/n_2kT} - 1\right)\right); \quad (3)$$

$$P_{SB} = n_1U_{SB}\left(I_\Phi - I_0\left(e^{qU_{SB}/n_2kT} - 1\right)\right). \quad (4)$$

де I, U – струм і напруга СБ, I_Φ – фотострум СБ, q – заряд електрона,k – стала Больцмана, n_1 – кількість паралельно включених фотоелементів СБ, n_2 – кількість послідовно включених фотоелементів СБ, T – температура.

Коефіцієнт заповнення γ роботи перетворювача сонячної батареї розраховується з рівняння [10]

$$P_{SB} = \frac{U_g(U_{SB}\gamma - U_g)}{L}; \quad (5)$$

де U_g – діюче значення напруги мережі, L – вихідна індуктивність перетворювача.

Практична реалізація

На основі рівнянь (3)-(5) за відомого значення вихідної потужності можливо розрахувати значення коефіцієнта заповнення імпульсів в номінальному режимі γ. Також за рівнянням (2) визначається значення діючого значення струму, який формується перетворювачем системи акумулювання енергії.

Розглянемо принципи реалізації можливих методів керування.

Пусковий режим

Під час пускового режиму доцільно скоротити час виходу у номінальний режим, що можливо за умови збільшення зарядного струму конденсатора C на вході МРРТ. Для цього до виходу у номінальний режим, що відповідає певній напрузі на конденсаторі $U_{пот}$ вся енергія СБ витрачається на його заряд, тобто γ = 0. Після виходу у номінальний режим параметр значення γ стибкоподібно змінюється на номінальне значення, $\gamma = \gamma_{НОМ}$. Такий підхід дозволяє в середньому у 2 рази зменшити тривалість перехідного процесу. Діаграми роботи перетворювача у пусковому режимі показано на рис. 12.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

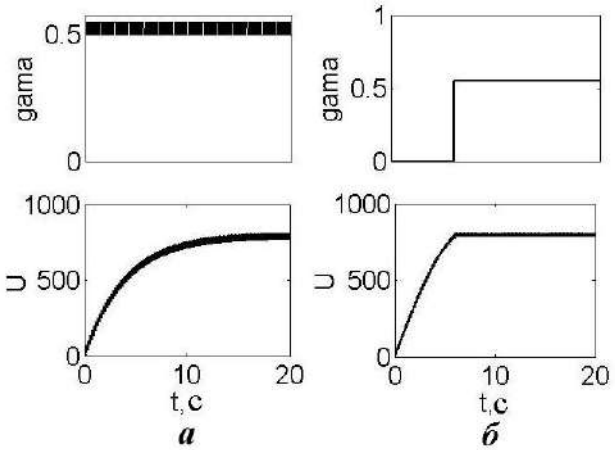


Рис. 12 – Часові діаграми під час пуску системи з P&O (а) і з врахуванням контексту (б)

Для реалізації даного режиму роботи, необхідно знати контекстні дані про режим роботи СБ – температуру T, фотострум $I_Ф$ короткого замикання, напругу холостого ходу U_{Sh}.

Режим відпрацювання збурень

Контекстно-залежне керування також може значно зменшити час перехідного процесу, зумовлених основними збуреннями – зміною освітленості поверхні сонячних батарей та сумарного опору навантажень R. При цьому здійснюється по компенсації збурення.

Врахування зміни освітленості Ф полягає у найшвидшому переході до режиму відбирання максимальної потужності від сонячних батарей. Припустимо, що спочатку освітленість фотобатарей становила $Ф_1$, а після збурення $Ф_2$. Тоді нове значення максимальної потужності P_{SB2} має значення:

$$P_{SB2} = P_{SB1}\frac{Ф_2}{Ф_1}. \qquad (6)$$

Відповідно до нового значення потужності за формулою (5) розраховується нове значення параметра γ.

За умови зміни сумарного опору навантаження R, зазнає зміни режиму роботи система акумулювання енергії, тоді як система відбирання потужності працюватиме в тому ж режимі. Нове значення струму системи акумулювання розраховується за формулою (2). Часові діаграми роботи системи електроживлення показано на рис. 13.

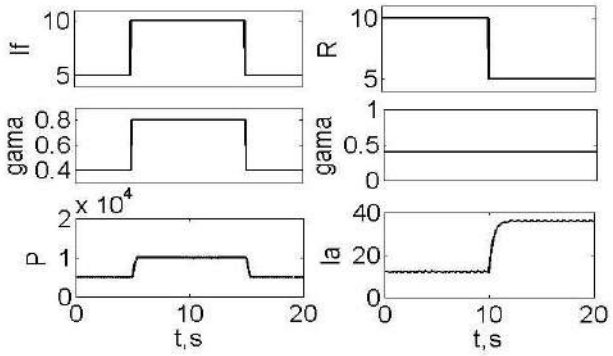


Рис. 13 – Часові діаграми відпрацювання збурень

У порівнянні з керуванням по відхиленню вихідного параметра, керування з компенсацією збурення дозволяє одразу встановити необхідне значення задавального сигналу, що значно скорочує час перехідного процесу у порівнянні з рис.

Режим стратегічного керування

Вказані підходи керування лише збільшують ефективність керування під час появи збурень. За наявності довгострокового прогнозу щодо параметрів зовнішнього середовища і параметрів навантажень, та можливості розподіляти у часі деяких з них (опалення, вентиляція, кондиціювання), можливо оптимізувати процес генерування і споживання енергії, тобто реалізувати режим роботи стратегічного керування. Можливим критеріями для керування можуть бути мінімізація втрат енергії, мінімізація використання системи акумулювання, що збільшує її строк служби, тобто використання оптимального керування [11].

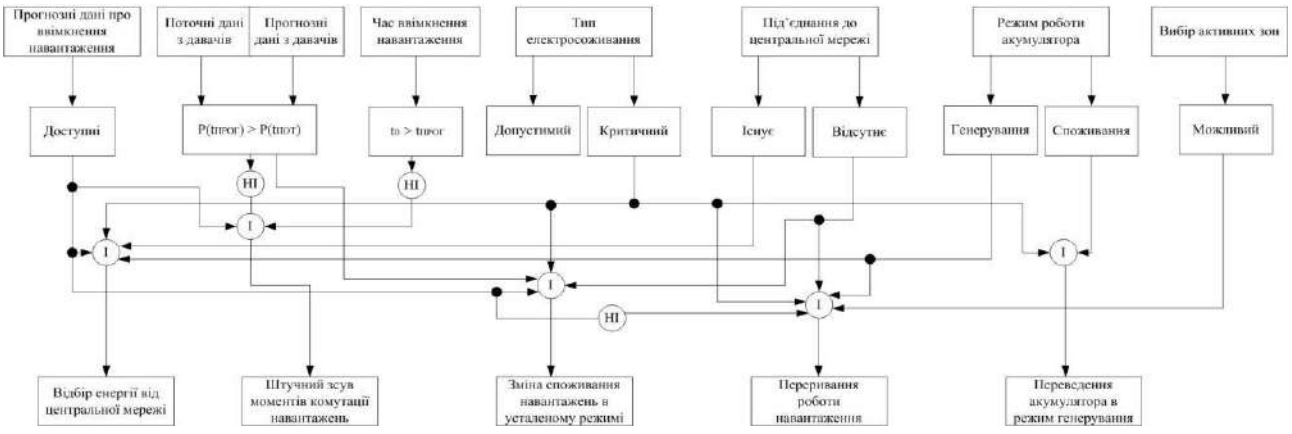


Рис. 14. Приклад правила, складеного на основі знань експертів

Складність аналізу процесів керування передбачає залучення знань експертів [4]. Ці знання описують процес керування у формальній формі, за допомогою формалізованих контекстних даних на основі правил, рис. 14.

На рис. 14 показано правило вибору режиму роботи системи електроживлення. Це правило має чотирівневу структуру. На першому рівні задаються параметри контексту, на другому – його атрибути. На третьому рівні за допомогою логічних операторів описується взаємозв'язок контекстних даних на основі знань експертів. На останньому рівні – можливі керуючі дії на систему електроживлення.

Вище розглянуто лише незначну кількість можливих режимів роботи силового устаткування системи електроживлення та можливих підходів керування, однак навіть з цих прикладів можливо зробити висновок про збільшення ефективності керування за умови використання контекстних даних.

Висновки

У статті запропоновано використовувати контекстні дані для збільшення ефективності керування системи, яка складається з системи багатьох джерел енергії, шляхом інтеграції на силовому та інформаційному рівні. Основними результатами інтеграції джерел є:

1. Зменшення час пускового режиму та відпрацювання збурень за допомогою використання ефективних методів керування залежно від доступності контекстних даних.

2. Зменшення похибки прогнозу з 6-5% до 2-1.5% при використанні запропонованого методу регуляризації.

3. Поява можливості здійснювати оптимальне керування по одному з критерію, наприклад мінімізації втрат в системі.

4. Можливість інтеграції знань експертів в систему керування за допомогою формалізації їх знань і запису у формі правил.

Список літератури

1. **Kyrylenko, O. V.** Main Features of the Stability and Reliability Enhancement of Electricity GRID with DG in Ukraine Based on IEEE Standards/ **O. V. Kyrylenko, R. Strzelecki, S. P. Denysiuk, D. G. Derevianko** // *Технічна електродинаміка*. – 2013. – № 6. – с. 52–57.
2. **Kroposki, B.** Microgrid Standards and Technologies. – in Power and Energy Society General Meeting / **B. Kroposki, T. Basso, and R. DeBlasio** // *Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. – Pittsburgh. PA. – 2008. – pp. 1–4.
3. **Kyselova, A. G.** Context–aware framework for energy management system / **A. G. Kyselova, I. V. Verbitskyi and G. D. Kyselov** // *2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)* . – Kyiv. – 2016. – pp. 1–4.
4. **Zhuiko, V. J.** Kotelnikov double series of modulating signals with limited spectrum / **V. J. Zhuiko, I. V. Verbitskyi and A. G. Kyselova** / *IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)* . – *Kyiv*. – 2014. – pp. 18–20.
5. **Hong, J**. Context–aware Systems: A Literature Review and Classification / **Hong, J**.. – **Suh, E., Kim** // *Expert Systems with Applications* – 36(4). – pp. 8509–8522. doi: 10.1016/j.eswa.2008.10.071.
6. **Кисельова, А. Г.** Регуляризація контекстних даних при керуванні автономними системами електроживлення/ **А. Г. Кисельова, Г. Д. Кисельов** // *Вісник НТУ «ХПІ». – Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 43 (1016). – С. 125–130. doi: 10.20998/2413– 4295.2016.12.18.
7. **Verbitskyi, I. V.** Context approach for electric grid control/ **I. V. Verbitskyi, A. G**. **Kyselova** //. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2016. – № 18. – 123–127. – doi:10.20998/2413–4295.2016.12.01.
8. **Boytsov A.** Extending Context Spaces Theory by Predicting Run–Time Context / **A. Boytsov, A. Zaslavsky, and K. Synnes**. – // *Smart Spaces and Next Generation Wired/Wireless Networking. – S. Balandin. – D. Moltchanov. – and Y. Koucheryavy. – Eds.. – Springer Berlin* / Heidelberg. –2009. – pp. 8–21. doi: 10.1007/978-3-642-04190-7_2.
9. **Surya Kumari, J.**. Design and Analysis of P&O and IP&O MPPT Techniques for Photovoltaic System **// J. Surya Kumari, Dr. Ch. Sai Babu, A. Kamalakar Babu** // *International Journal of Modern Engineering Research*. – 2012. – Vol.2. – Issue.4. – Pp. 2174–2180.
10. **Gonz·lez, L.** Effects of the PWM carrier signals synchronization on the DC–link current in back–to–back converterse / **L. Gonz·lez, G. Garcer·, E. Figueres, R. Gonz·lez //** *Applied Energy*. – 2010. – Vol. 87. –. pp. 2491–2499. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.02.023.
11. **Issermann R.** Digital control systems. Volume 1: Fundamentals. – deterministic control. *Springer–Verlag*. – 1989. – 334 p. doi: 10.1007/978-3-642-86417-9.

Bibliography (transliterated)

1. **Kyrylenko, O. V., Strzelecki, R., Denysiuk, S. P., Derevianko, D. G.** Main Features of the Stability and Reliability Enhancement of Electricity GRID with DG in Ukraine Based on IEEE Standards, *Tehnichna electrodunamika*, 2013, № **6**, 52-57.
2. **Kroposki, B., Basso, T., and DeBlasio, R.** Microgrid Standards and Technologies, in Power and Energy Society General Meeting, *Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. Pittsburgh. PA, 2008, 1-4.
3. **Kyselova, A. G., Verbitskyi, I. V. and Kyselov, G. D.** Context-aware framework for energy management system, *2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv. 2016, 1-4.
4. **Zhuikov, V. J., Verbitskyi, I. V. and Kyselova, A. G.** Kotelnikov double series of modulating signals with limited spectrum, *2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. *Kyiv*. 2014. 18-20.
5. **Hong, J, Suh, E., Kim** Context-aware Systems: A Literature Review and Classification. *Expert Systems with Applications*, **36**(4). 8509–8522 doi: 10.1016/ j.eswa.2008.10.071
6. **Kyselova, A. G., Kyselov, G. D.** Regularization of context data of autonomous power supply systems, *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. –*

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Kharkiv: NTU "KhPI" – 2015. – № **43** (1016). – С. 125-130. doi: 10.20998/2413- 4295.2016.12.18.

7. **Verbitskyi, I. V., Kyselova, A. G.** Context approach for electric grid control, *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. - № **18**. - 123-127. doi:10.20998/2413-4295.2016.12.01.
8. **Boytsov, A., Zaslavsky, A., and Synnes, K.** Extending Context Spaces Theory by Predicting Run-Time Contex *Smart Spaces and Next Generation Wired/Wireless Networking, S. Balandin, D. Moltchanov, and Y. Koucheryavy, Eds., Springer Berlin*, Heidelberg. 2009. 8-21. doi: 10.1007/978-3-642-04190-7_2.
9. **Surya Kumari, J., Sai Babu, Dr. Ch., Kamalakar Babu, A.** Design and Analysis of P&O and IP&O MPPT Techniques for Photovoltaic System, *International Journal of Modern Engineering Research*. 2012, Vol.**2**, Issue.4, 2174-2180.
10. **Gonz·lez, L., Garcer, G., Figueres, E., Gonz·lez, R.** Effects of the PWM carrier signals synchronization on the DC-link current in back-to-back converterse. *Applied Energy*. 2010, Vol. **87**. 2491-2499. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.02.023.
11. **Issermann, R.** Digital control systems. Volume 1: Fundamentals, deterministic control. *Springer-Verlag*, 1989, 334 p. doi: 10.1007/978-3-642-86417-9.

Відомості про авторів (About authors)

Вербицький Євген Володимирович **–** кандидат технических наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри промислової електроніки, факультет електроніки, Київ, Україна ; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

Ievgen Verbytskyi – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Ph. D., Assoc. Prof., The department of Industrial Electronics, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prospect Peremohy, 03056, Kyiv, Ukraine; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

Кисельова Анна Геннадіївна – кандидат технічний наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри системного проектування; м. Київ, Україна; e-mail: a.g.kyselova@gmail.com.

Anna Kyselova – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Assoc. Prof., National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine; e-mail: a.g.kyselova@gmail.com.

Кисельов Геннадій Дмитрович – кандидат технічний наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри системного проектування; м. Київ, Україна; e-mail: kiselev_gd@bigmir.net.

Gennadiy Kyselov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Ph. D., Assoc. Prof., National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine; e-mail: kiselev_gd@bigmir.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Вербицький, Є. В. Підвищення ефективності керування системою електроживлення на основі використання контекстних даних / **Є. В. Вербицький, А. Г. Кисельова, Г. Д. Кисельов** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 123-130. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.17.

Please cite this article as:

Verbytskyi, I. V., Kyselova, A. G., Kyselov, G. D. Power Grid Converter Control Improvement Based On Contextual Data. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 123–130, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.17.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Вербицкий, Е. В. Повышение эффективности управления системой электропитания на основании контекста / **Е. В. Вербицкий, А. Г. Киселева, Г. Д. Киселёв** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 123-130. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.17.

АННОТАЦИЯ *В статье рассмотрена построение контекстно-зависимой системы управления электропотреблением, выполняющего задачи, связанные с прогнозированием и интеллектуальным реагированием на действия всех электроустановок, объединенных с помощью преобразователей в единую информационную среду, с целью рационального использования энергии, оперативного управления штатными и аварийными режимами работы SmartGrid с учетом требований обеспечения комфортности пользователя.*

Ключевые слова: *контекстно-зависимое управление; система электропитания; пусковой режим; отработка возмущений*

Поступила (received) 04.03.2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online) СЕРІЯ "НОВІ РІШЕННЯ В СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ"

УДК 005.8:005.41 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.18

PRODUCT MODEL OF INFORMATION RESOURCES MANAGEMENT OF A PROJECT-ORIENTED ENTERPRISE

***N. YEHORCHENKOVA*[1*], *O. YEHORCHENKOV*[2], *I. KHLEVNA* [1], *N. OBEREMOK* [2]**

[1] *Department of technology management , Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, UKRAINE*
[2] *Department geoinformatics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, UKRAINE*
[*] *email: realnata@ukr.net*

ABSTRACT *In the article it is proposed to consider resource management processes as separate projects of creation and provision of information resources (PCPIR). To manage such projects product structure is developed. Such classes of information resources as external, interim, internal and final resources are formalized. Their relationship and transformation in process of the implementation of information procedures are shown. Procedures of creation and provision of information resource are allocated. It is shown that the informational product is formed on basis of interpenetration final information resource in the knowledge of the consumer. Features of PCPIR in terms of construction of management models are defined. Dependent processing technology from product PCPIR structure is attributed to these features. It is shown that in PCPIR it is necessary to start tasks as late as possible, closer until the late start. It is determined that the PCPIR oriented to information resource quality. The definition of quality of information resources is given and its measure is proposed. It is shown that the product model can provide projects of creating and provision of information resources in the form of patterns that reflect different approaches to the implementation of these projects, depending on their characteristics and specificity. The model of information resource management on basis on bipartite graphs is presented. The use of this model is shown in the example of project of creation and provision of the project statute.*
Keywords*: product model; information resource; project management*

ПОПРОДУКТОВА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМИ РЕСУРСАМИ ПРОЕКТНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДПРИЄМСТВА

***Н. Ю. ЄГОРЧЕНКОВА*[1], *О. В. ЄГОРЧЕНКОВ*[2], *Ю. Л. ХЛЕВНА*[1], *Н. В. ОБЕРЕМОК*[2]**

[1] *кафедра технологій управління, Київський національний університет ім.Т.Шевченка, Київ, УКРАЇНА*
[2] *кафедра геоінформатики, Київський національний університет ім.Т.Шевченка, Київ, УКРАЇНА*

АНОТАЦІЯ *В статті запропоновано розглядати процеси управління інформаційними ресурсами як окремі проекти створення та надання інформаційних ресурсів (ПСНІР). Для управління такими проектами розроблено попродуктову структуру. Формалізовано класи інформаційних ресурсів: зовнішні, проміжні, внутрішні та кінцеві. Показано їх взаємозв'язок та взаємоперехід в процесі реалізації інформаційних процедур. Виділено процедури створення та надання інформаційного ресурсу. Показано, що інформаційний продукт формується на основі взаємопроникнення кінцевого інформаційного ресурсу в знання споживача.*
Ключові слова: *попродуктова модель; інформаційний ресурс; управління проектами*

Introduction

Present development period of Ukrainian business is linked to the economic and political crisis and to the output to the relatively stable development, characterized by the development of project activities in all areas of national entrepreneurship. However, the management of any enterprise can not exist without an effective information interaction both within the enterprise and the environment. Ensuring such effective information interaction requires a new organization of processes of management of operating, production and project activities that are focused not just on solutions of functional tasks, but ensure the formation of an information resource of systems that solve these problems. New information technologies that form a such resource are necessary.

So many project-oriented enterprises need to improve their work creating new methods, models and tools of information management.

Today there are many scientific works that are devoted to the problem of resource management in enterprises [1-6]. Using of product model that was used for the management of logistical and human resources of a project-oriented enterprise is proposed in the article [7,8].

The purpose of the study

The purpose of the article is to describe product model of a project-oriented enterprise resource management.

© N. YEHORCHENKOVA, O. YEHORCHENKOV, I. KHLEVNA, N. OBEREMOK, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Presentation of basic material

The paper proposes to apply the project approach to the creation and use of information resource of project-oriented enterprises. The essence of this approach to resource management is the creation and use of this resource is considered as the project implementation with all the attributes and components of the control system. Because when you create and use any information resource you must to plan actions (project integration management and project content management), organize work services, monitor, consider the risks, information communications, human resources, sometimes - procurement, etc. In the future such projects will be called Project of creation and provision of information resources (PCPIR) [9].

In projects of creation and provision of information resource a set of processes of creation, receiving, analysis, processing, storing and providing information to various participants of PCPIR is implemented. And the result of the project is an information resource for customers. A wide variety of information resources, which are the products of separate stages of PCPIR is created and used in projects during its receiving. Consider these products in terms of procedures of the creation and transmission of information (Figure 1).

In the PCPIR management each information resource can be internal, external, intermediate or final.

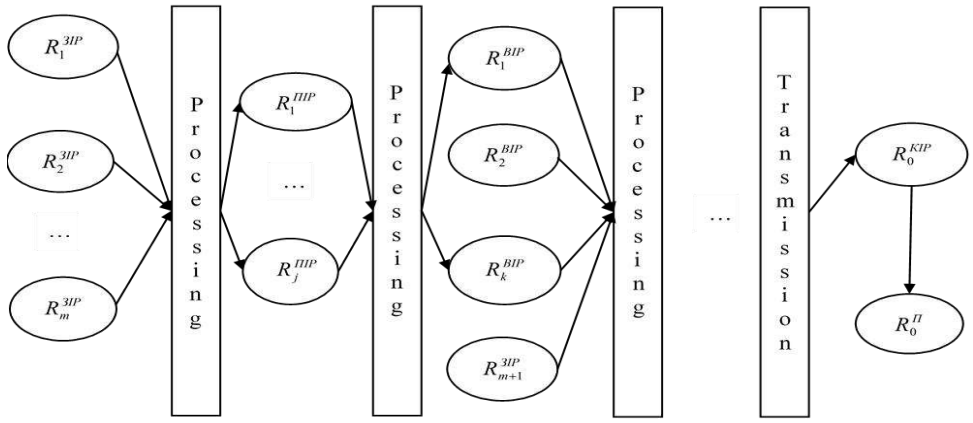


Fig. 1 - Scheme of the process of an information resource creating and providing

Definition 1. The interim information resource (IIR) – the information resource that received in PCPIR and which is not suitable for consumer use because of incompleteness, but to be used to create an information product:

$$R^{ПІР} = I^{С}(R^{ЗІР}, R^{ВІР}), \quad (1)$$

where $R^{ПІР}$ – the interim information resource;
$R^{ВІР}$ – the internal information resource;
$R^{ЗІР}$ – the external information resource;
$I^{С}$ – the procedure of creation of the information resource.

In the fig. 1 these are the following resources: $R_1^{ПІР}, R_j^{ПІР}$.

IIR is formed from the external and internal information resources by the procedures of creation of the information resource.

An IIR consumer is an enterprise department or a PCPIR subject, which requires an interim information resource to implement procedures for the formation of other intermim or final information resource. When a consumer receives IIR it integrates with other data and knowledge of the consumer and becomes an internal information resource PCPIR.

Definition 2. The internal information resource – the information resource transmitted in PCPIR for further use for receiving another interim or final information resource.

$$\forall R^{ВІР} \exists R^{ПІР} : R^{ВІР} = I^{П}(R^{ПІР}), \quad (2)$$

where $R^{ПІР}$ – the interim information resource;
$R^{ВІР}$ – the internal information resource;
$I^{П}$ – the procedure of transmission of the information resource;

In the fig. 1 these are the following resources: $R_1^{ВІР}, R_2^{ВІР}, R_k^{ВІР}$.

Definition 3. The external information resource (EIR) – the information resource that is created outside the project.

In the fig. 1 these are the following resources: $R_1^{ЗІР}, R_2^{ЗІР}, R_m^{ЗІР}, R_{m+1}^{ЗІР}$.

This resource is not formed in PCPIR, but it is available in a project-oriented enterprise.

Definition 4. The final information resource (FIR) – the product of the project of creation and provision of the information resource.

$$R^{KIP} = I^{C}(R^{3IP}, R^{BIP}), \quad (3)$$

where R^{KIP} – the final information resource,

In the fig. 1 this is the following resources: R_0^{KIP}.

Definition 5. The information product (IP) – accepted for consumer use and integrated with his knowledge final resource.

$$R^{П} = I^{П}(R^{KIP}), \quad (4)$$

where $R^{П}$ – the information product.

In the fig. 1 this is $R_0^{П}$.

Definition 6. The procedure of provision the information resource ($I^{П}$) – the process of the information resource transfer and integration with correspondent/consumer knowledge.

Definition 7. The procedure of creation the information resource (I^{C}) – the process of analysis and processing of information resource by services of project-oriented enterprise or by the information system.

Now consider the requirements and features of PCPIR for various classes of projects.

Features PCPIR management compared to traditional project management are:

1. Links between tasks determine not so much the technology (as in traditional projects), but the readiness of incoming IR created in previous works. In fact, each model PCPIR management is a dynamic model that reflects the dependence and sequence in receiving and use the interim IR, which are then used to get the final information resource.

2. Because the end point of information procedures is not the IR creation, but its receiving by staff that implement the following procedures (where this resource is input), the type of communication is not the traditional models of network "finish-start" (FS), but rather rare "start-finish" (SF). This means that the previous procedure will end only when the performers following procedure will start their work (to accept the internal information resource in use). This brings these models with algorithmic (in terms of the need to check the quality of IR: if incoming IR quality meets the requirements, you can get started).

3. Based on feature 2 it is beneficial to start procedures implementing "as late as possible". This is due to the fact that often the quality of the information resource can be checked only in comparison with other IR that is used to create a new IIR or FIR. Thus, even before creating some IR performer must wait until all the IR will be received for the following procedure in order to get a response about compliance its IR to quality requirements.

4. The result of the information procedure does not include quantitative measures. The result of the information procedure is the IR for which can be set only quality assessment. We cannot say the procedure has given much or little information. We can only say that this information gives the opportunity to make decision or not. And this is a category of quality.

Let's introduce the concept of quality.

Definition 8. The information resource quality - is compliance of the information resource with the requirements of completeness, availability, accuracy, clarity, timeliness.

Definition 9. Estimating of the information resource quality is a numerical value that determines the part of consumers (for the interim information resource - correspondents) which would satisfy the received resource.

$$\alpha_k = \Lambda(R_k^v), \quad (5)$$

where $\Lambda(R_k^v)$ – function for estimation of the information resource equality R_k^v;

α_k – measure of the quality of the information resource R_k^v.

Thus, the measure of quality is a number between 0 and 1. If 0 - Nobody will be satisfied with this information resource. If 1 – everyone will be satisfied.

5. The feature control for PCPIR is that it does not include verification of the number of information resources, but includes a check of conformity of the actual formation IR plan in control points (milestones). PCPIR is controlled by duration and results of the work (IR quality). The quality of the project product is not determined at the end of the project, but by results of the formation of certain IIR. Each task gives the part of the product IR. The quality of this IR is verified before performing the successor procedures (when converting it to the internal information resource).

5.1. Duration control:

Definition 10. PCPIR duration – the time required to complete all tasks within the PCPIR.

At duration control, it is checked whether the actual duration of the project exceeds the planned duration and whether the sequence of implementation procedures for receiving and providing the information resource is not broken.

$$C_i = T_i^p / T_i^f; \quad (6)$$

where C_i – reference value;

T_i^p – the planned project duration Π_i;

T_i^f – the actual project duration Π_i.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

If

$$C_i \le 1,$$

then PCPIR is implemented as planned.

If

$$C_i > 1,$$

then PCPIR task will be completed with a delay.

5.2. *Quality control:*

At quality control, it is determined whether the received IRs meet the requirements of the persons that are responsible for the project.

If

$$\mathrm{A}(R_i^v) \le \Lambda(R_i^v), \quad (7)$$

where $\mathrm{A}(R_i^v)$ – responsible for the project requirements for information resource quality R_i^v,

then the result of PCPIR corresponds to the query.

If

$$\mathrm{A}(R_i^v) > \Lambda(R_i^v),$$

then, the PCPIR result does not meet the requirements and it needs to finalize.

Discussion of the results

Product model can provide project of creation and provision of information resources in the form of patterns that reflect different approaches to the implementation of these projects, depending on the characteristics and specificity.

Such models include: hierarchical, linear, iterative, algorithmic, cross-border models and models based on bipartite graphs.

In the figure 2 the project of creation and provision of project statute using bipartite graphs is presented.

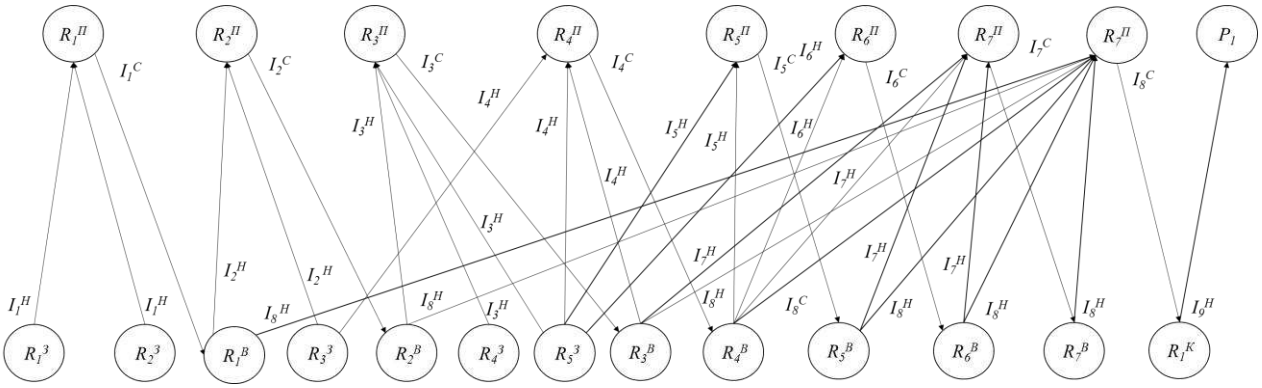


Fig. 2 - Model of the project of creation and provision of project statute

Figure designation:

1. External information resources: $R_1^З$ - project scopes, $R_2^З$ - project requirements, $R_3^З$ - project product requirements, $R_4^З$ - description of the project team, $R_5^З$ - templates of standard projects.

2. Internal information resources: $R_1^В$ - project justification, $R_2^В$ - project product management plan, $R_3^В$ - project team management plan, $R_4^В$ - project plan, $R_5^В$ - project risks management plan, $R_6^В$ - project quality management plan, $R_7^В$ - project budget management plan.

3. Interim information resources: $R_1^П$ - project justification, $R_2^П$ - project PBS (product breakdown structure), $R_3^П$ - project OBS (organization breakdown structure), $R_4^П$ - project plan, $R_5^П$ - project risks management plan, $R_6^П$ - project quality management plan, $R_7^П$ - project budget management plan.

4. Final information resource: $R_1^К$ - project statute.

5. Information product: P_1 - project statute.

6. Procedures: $I_1^С, I_1^Н$ - creation and provision project justification, $I_2^С, I_2^Н$ - creation and provision project product management plan, $I_3^С, I_3^Н$ - creation and provision project team management plan, $I_4^С, I_4^Н$ - creation and provision project plan, $I_5^С, I_5^Н$ - creation and provision project risks management plan, $I_6^С, I_6^Н$ - creation and provision project quality management plan, $I_7^С, I_7^Н$ - creation and provision project budget management plan, $I_8^С, I_8^Н$ -

creation and provision project statute, I_9^H - project statute use.

Such product model is the basis of the information resources management system of the project-oriented enterprise "PrimaDoc", which was implemented at the Taras Shevchenko National University of Kyiv and at the others Ukrainian project-oriented enterprises. [10]

Conclusions

In the article resource management processes are presented as separate projects. To manage such projects suggested to use the product model in which information resources are divided into interim, external, internal and final. Features of management of project of creation and provision information resources compared to traditional project management are shown. It is shown that on the basis of the product model it is possible to develop different types of models depending on the specific application of information resources. These models include: hierarchical, linear, iterative, algorithmic, cross-border models and models based on bipartite graphs. A project of creation and provision a project statute represented by bipartite graphs was given as an example.

Список літератури

1. **Bergeron P.** Information resources management / **P. Bergeron** // *Annual Review of Information Science and Technology*. – 1996 – 31 – P. 263–300.
2. **Dalkir, K.** Knowledge Management in Theory and Practice / **K. Dalkir** // Cambridge, Massachusetts: the MIT Press – 2011.
3. **Hai, C. T.** Methodology for the 'live' capture and Reuse of project knowledge in construction / **Hai Chen Tan**// PhD Thesis. Loughborough University – 1996.
4. **Hoven, J.** Information resource management: foundation for knowledge management / **J. Hoven, V. Den** // *Information Systems Management*. – 2001 – 18(2). –P. 80–83.
5. **Schlögl, C.** Information and knowledge management: dimensions and approaches / **C. Schlögl** // *Information Research*. – 2005. – 10(4). – p. 235.
6. **Teslia, Y.** Control of informational impacts on project management / **Y. Teslia, A. Khlevnyi, I. Khlevna, S. Gerasymenko** // *Proceedings of the 2016 IEEE 1st International Conference on Data Stream Mining and Processing*. – 2016 – P. 387–392.
7. **Егорченкова, Н. Ю**. Продуктовые системы планирования проектов / **Н. Ю. Егорченкова, А. В. Егорченков, Ю. Н. Тесля, Д. С. Катаев** // *Управління проектами та розвиток виробництва*, Луганськ. – 2012. – №1(41). – С. 13–19.
8. **Yehorchenkova, N.** Product–Resource Planning System /**N. I. Yehorchenkova, A. V. Iegorchenkov** // *IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing, Ukraine*, Lviv. – 2016. – P.29–33.
9. **Yehorchenkova, N.** The conception of project–oriented enterprise information resources system management technology creation / **N. Yehorchenkova, O. Yehorchenkov, Y. Kataieva, G. Zaspa** // *Journal of technology and exploitation in mechanical engineering*. – 2016. – №2. – P. 60–66.
10. **Yehorchenkova, N.** Enterprise Information Planning – new class in information technologies of higher educational institutions of Ukraine / **N. Yehorchenkova, I. N. Teslia, A. V. Iegorchenkov, Y. I. Kataieva** // *Східно–Європейський журнал передових технологій*. – №4/2(82). – 2016. – P .11–24.

Bibliography (transliterated)

1 **Bergeron, P.** Information resources management. *Annual Review of Information Science and Technology*, 1996, **31**, 263-300.
2 **Dalkir, K.** Knowledge Management in Theory and Practice. Cambridge, Massachusetts: the MIT Press, 2011.
3 **Hai, C. T.** Methodology for the 'live' capture and Reuse of project knowledge in construction. PhD Thesis. Loughborough University. 2006.
4 **Hoven, J., Den, V.** Information resource management: foundation for knowledge management. *Information Systems Management*, 20011, **8**(2), 80-83.
5 **Schlögl, C.** Information and knowledge management: dimensions and approaches. *Information Research*, 2005, **10**(4), 235.
6 **Teslia, Y., Khlevnyi, A., Khlevna, I., Gerasymenko, S.** Control of informational impacts on project management. *Proceedings of the 2016 IEEE 1st International Conference on Data Stream Mining and Processing*. 2016, 387-392.
7 **Егорченкова, Н. Ю., Егорченков, А. В., Тесля, Ю. Н., Катаев, Д. С.** Продуктовые системы планирования проектов .*Управління проектами та розвиток виробництва*. Луганськ. 2012, №**1**(41), 13-19.
8 **Yehorchenkova, N., Iegorchenkov, A.V.** Product-Resource Planning System. *IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing*. Ukraine, Lviv, 2016, 29-33.
9 **Yehorchenkova, N., Yehorchenkov, O., Kataieva, Y., Zaspa, G.** The conception of project-oriented enterprise information resources system management technology creation. *Journal of technology and exploitation in mechanical engineering*. 2016, **2**, 60-66.
10 **Yehorchenkova, N., Teslia, I. N., Iegorchenkov, A. V., Kataieva, Y. I.** Enterprise Information Planning – new class in information technologies of higher educational institutions of Ukraine. *Eastern-European Journal of Eenterprise Technologies*. 2016, **4/2**(82). 11-24.

Відомості про авторів (About authors)

Nataliia Yehorchenkova – Ph. D., Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kiev, Ukraine; e-mail: realnata@ukr.net.

Єгорченкова Наталія Юріївна – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, докторант кафедри технологій управління, м. Київ, Україна: e-mail: realnata@ukr.net.

Oleksii Yehorchenkov – Ph.d., Taras Shevchenko National University of Kiev, department of geoinformatics, Kiev, Ukraine; e-mail: alexee@ukr.net.

Єгорченков Олексій Володимирович – кандидат технічних наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, доцент кафедри геоінформатики, м. Київ, Україна; e-mail: alexee@ukr.net.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Yliia Khlevna – Ph.d., Taras Shevchenko National University of Kiev, department of project management, Kiev, Ukraine; e-mail: khlevna@yandex.ru.

Хлевна Юлія Леонідівна – кандидат технічних наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, асистент кафедри технологій управління, м. Київ, Україна; e-mail: khlevna@yandex.ru.

Nataliia Oberemok – Ph.d., Taras Shevchenko National University of Kiev, department of geoinformatics, Kiev, Ukraine; e-mail: oberemokn@gmail.com.

Оберемок Наталія Василівна – кандидат технічних наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, докторант кафедри геоінформатики, м. Київ, Україна; e-mail: oberemokn@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Єгорченкова, Н. Ю. Попродуктова модель управління інформаційними ресурсами проектно-орієнтованого підприємства / **Н. Ю. Єгорченкова, О. В. Єгорченков, Ю. Л. Хлевна, Н. В. Оберемок** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія:Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 131-136. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.18.

Please cite this article as:

Yehorchenkova, N., Yehorchenkov, O., Khlevna, I., Oberemok, N. Product model of information resources management of a project-oriented enterprise. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 131–136, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.18.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Егорченкова, Н. Ю. Попродуктовая модель управления информационными ресурсами проектно-ориентированного предприятия / **Н. Ю. Егорченкова, А. В. Егорченков, Ю. Л. Хлевна, Н. В. Оберемок** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017.– № 7 (1229). – С. 131-136. doi:10.20998/2413-4295.2017.07.18.

АННОТАЦИЯ *В статье предложено рассматривать процессы управления информационными ресурсами как отдельные проекты создания и предоставления информационных ресурсов (ПСПИР). Для управления такими проектами разработано попродуктовую структуру. Формализована классы информационных ресурсов: внешние, промежуточные, внутренние и конечные. Показано их взаимосвязь и взаимопереход в процессе реализации информационных процедур. Выделено процедуры создания и предоставления информационного ресурса. Показано, что информационный продукт формируется на основе взаимопроникновения конечного информационного ресурса в знания потребителя.*

Ключевые слова: *попродуктовая модель; информационный ресурс; управление проектами*

Надійшла (received) 10.03.2017

УДК 519.68 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.19

МЕТРОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗВОРОТНОГО ІНЖИНІРИНГУ СТАНДАРТИЗОВАНИХ ВИРОБІВ

***В. В. ІВАНОВ*[1*], *Н. В. ЧУМАК*[2]**

[1] кафедра машинознавства і деталей машин, Одеський національний політехнічний університет, Одеса, УКРАЇНА
[2] відділ аспірантури і докторантури, Одеський національний політехнічний університет, Одеса, УКРАЇНА
[*]email: vvict@ukr.net

АНОТАЦІЯ *Уточнено поняття зворотного інжинірингу. Показано як на підставі метрологічних вимірювань за допомогою бібліотек стандартних елементів та стандартних методів розрахунку, що реалізовані в САПР, може бути побудована концептуальна модель виробу. Послідовність процедур метрологічних, розрахункових та евристичних, яка при цьому виконується, формалізована у вигляді евроритму.*
Ключові слова*: зворотний інжиніринг; САПР; концептуальна модель виробу; послідовність процедур; евроритм*

METROLOGICAL ASPECTS OF REVERSE ENGINEERING OF STANDARDIZED PRODUCTS

***V. IVANOV*[1], *N. CHUMAK*[2]**

[1] Department of Mechanical Engineering and Machine Parts, Odessa National Polytechnic University, Odesa, UKRAINE
[2] Postgraduate and doctoral department, Odessa National Polytechnic University, Odesa, UKRAINE

ABSTRACT *The aim of the work is the development of an algorithm of reverse engineering for standardized products. To create metrological models, and even more to solve the complex task of reverse engineering, it is necessary to have not only metrological measurements and calculations using CAD, but also heuristic techniques that allow to recreate the conceptual model and design a new product instead of the damaged one taking into account real technological capabilities. These heuristic techniques are the selection of elements, the establishment of interrelations between elements, the identification of interrelated and independent groups of elements, the definition of inputs and outputs of the system, the use of models in the form of matrices and graphs. The relationship between realistic, conceptual, ideal and normative models is found in the case when the input data are the actual dimensions of the existing product, which are measured with certain errors. As a result of the work it is obtained the heuristic algorithm of the reverse engineering process for gear transmission; it is established that in order to determine the parameters of an ideal model, along with metrological measurements that allow us to find a realistic experimental model, it is necessary to use heuristic techniques and CAD; for complex engineering products with a high degree of standardization, reverse engineering is connected first of all with the use of databases of standard parts, elements of parts, steel grades, and the standard methods of calculation contained in CAE modules.*
Keywords*: reverse engineering; CAD; conceptual model; sequence of procedures; heuristic algorithm*

Вступ

Більшість дослідників розуміють зворотний інжиніринг досить вузько, як отримання математичної моделі на основі вимірювання реального об'єкту [1, 2, 3, 4, 5]. При такому підході зворотний інжиніринг включає наступні етапи: визначення параметрів виробу на основі вимірювань реального об'єкту; використання спеціального устаткування для сканування поверхонь; використання програмного забезпечення для формування 3-D поверхонь; створення математичної моделі об'єкту, яка дає можливість його дослідити та відтворити [1, 6, 7].

Інжинірингова компанія TECIC пропонує послуги зворотного інжинірингу для випадків, коли при виготовленні виробу неможливо обійтись без його фізичного прототипу [6, 8].

Інжинірингова компанія Bibus наводить такий приклад, для обгрунтування необхідності своїх послуг. Підприємство досить довго використовує певне устаткування, а технічну документацію на нього було втрачено. Або це імпортне обладнання, на яке з самого початку не мали повної документації [6, 9]. Приходить час, коли важливі деталі виходять з ладу. Знайти креслення або фахівців, які знайомі з таким обладнанням, іноді буває вкрай важко. Зворотний інжиніринг за рахунок застосування координатно-вимірювального обладнання і відповідної програми по формуванню 3-D поверхонь дозволяє вирішити задачу відновлення креслень деталей. Проектна документація і математична модель деталі дають конструктору необхідну інформацію по розробці оснащення для її виготовлення.

Але поряд з таким розумінням зворотного інжинірингу є й інше уявлення – «зворотний інжиніринг є сучасним формулюванням колишнього поняття – копіювання, вдосконалення ...» [10]. Для нас в цьому визначенні важливо, що зворотний інжиніринг є не просто копіювання, а й вдосконалення. Існує ще одне визначення, а саме: «Зворотний інжиніринг – це дослідження деякого пристрою або програми з метою вивчення принципів роботи досліджуваного об'єкту. Найчастіше

© В. В. ІВАНОВ, Н. В. ЧУМАК, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

використовується для створення об'єкту по функціональності аналогічного досліджуваному, але без точного копіювання його функцій» [11].

У цьому визначенні міститься важливе зауваження щодо того, що метою може бути не відтворення об'єкту і навіть не побудова його математичної моделі, а дослідження принципів його роботи. І цікавим є пряма вказівка на те, що створюваний об'єкт не обов'язково повинен бути точною копією, важливим є лише відтворення його функціональності.

Проведений огляд існуючих підходів до зворотного інжинірингу показує, що в основному вони спрямовані на відтворення складних поверхонь. Насправді обсяг завдань зворотного інжинірингу набагато ширший. Це відтворення конструкції, технічних характеристик і технічної документації за наявними зразками виробів.

Нами запропоновано наступне визначення: зворотний інжиніринг – це процес вивчення конструкції і технічних характеристик існуючого виробу, побудова на їх основі його математичної моделі і розробка технічної документації для його виготовлення.

Постановка завдання

Завдання зворотного інжинірингу складне і багатогранне, але є дещо, що в значній мірі спрощує його вирішення – стандартизація. В сучасному машинобудуванні значна частина деталей є стандартними. Стандартними є елементи деталей, матеріали, розміри. Більш складні вироби мають більшу степінь стандартизації.

Мета роботи – розробка алгоритму зворотного інжинірингу для стандартизованих виробів.

Виклад основного матеріалу

Вирішення завдання зворотного інжинірингу базується на трьох складових. Перша – це метрологічне обладнання. І не в такому вузькому сенсі як сканування та обмір складних поверхонь, а взагалі всі види метрологічного обладнання, включаючи також устаткування для хімічного аналізу. Другою складовою є програмне забезпечення і не тільки те, яке аналізує результати сканування. Все програмне забезпечення CAD/CAM/CAE необхідне для аналізу за допомогою розрахунків CAE і співставлення зі стандартами і базами даних уніфікованих елементів CAD. Програмне забезпечення необхідне для проектування CAD і для організації технологічного процесу CAM.

В машинобудуванні виріб може складатися з великої кількості уніфікованих вузлів, стандартних деталей і стандартних елементів деталей. При цьому відомі параметри ряду вузлів, в силу їх уніфікації, і розміри стандартних деталей. Наявність стандартних дискретно змінних параметрів, таких як: модуль, посадочні розміри, міжосьові відстані та ін. з одного боку ускладнює пошук, а з іншого − дає додаткові можливості по розшифровці параметрів. Це дозволяє не здійснювати обмір всіх геометричних розмірів, а визначати тільки ключові, за якими можна встановити інші стандартні, пов'язані з ними розміри. Поряд з геометричними параметрами необхідно визначити механічні властивості матеріалів, похибки виготовлення і монтажу, що дозволить встановити точність, з якою були виготовлені деталі виробу.

Зворотний інжиніринг в широкому розумінні включає проектування. Наприклад, після встановлення параметрів оригінального виробу потрібно розробити вузол власної конструкції, який сумісний з оригінальним виробом.

Для визначення геометричних параметрів об'єкту нам необхідно знати з якою точністю він був виготовлений. Вимірюються не номінальні геометричні розміри, а фактичні геометричні розміри обумовлені похибками виготовлення, монтажу і похибками самого процесу вимірювання і вимірювальних приладів. Тобто в процесі вимірювань ми отримуємо експериментальну модель [12].

Вимірявши товщину зуба, ми не знаємо відхилення товщини зуба розрахункової, для евольвентного зубчастого колеса, з виміряною. Це пов'язано з тим, що це або значна похибка виготовлення, або неприпустима похибка вимірювань, або це зуб нарізаний зі зміщенням, а можливо це взагалі не евольвентне зачеплення, а циклоїдальне.

На основі експериментальної моделі отримаємо концептуальну модель, із залученням бібліотеки стандартних елементів CAD і розрахунків геометрії зубчастого зачеплення з використанням CAE. Концептуальна модель містить інформацію про тип зачеплення (евольвентне, циклоїдальне, цевочне, Новікова та ін.), стандарт, на основі якого зачеплення виготовлено (ISO, AGMA, DIN, ГОСТ тощо), основні геометричні та міцнісні характеристики. Точно встановити марку сталі, коефіцієнт корекції, величину фланкірування тощо, часто є неможливим. Та це й не завжди необхідно. При виготовленні зубчастого колеса на зміну тому, що вийшов з ладу в Україні, неможливо отримати заготовку колеса з японської сталі або поковку, що виготовляєтья в США. Нема обладнання для виготовлення коліс по стандартам AGMA або DIN. Важливо забезпечити необхідну міцність зубчастої передачі замість тієї, що вийшла з ладу, та ідентичні геометричні характерстики.

Все це дозволяє створити ідеальну модель зубчастого колеса.

Якщо геометричні та міцнісні характеристики можуть бути при більших витратах на дослідження все таки повністю відновлені, то точність зубчастого колеса ніяк не може бути встановлена на основі вимірювання однієї деталі. Нормативна модель об'єкту створюється в процесі проектування і оформлюється технічною документацією, містить параметри об'єкту і призначена для його створення

[12]. Тобто, при проектуванні зубчастої передачі замість тієї, що вийшла з ладу, ми самі повинні вказати технічні вимоги до неї. Точність оригінальної передачі опосередковано може бути встановлена на основі аналізу функцій і параметрів виробу, частиною якого вона була. Звичайно, не знаючи технічних умов, враховуємо наявні реальні технологічні можливості. (рис.1).

Реалістична модель відображає параметри зубчастого колеса, які можуть бути отримані з урахуванням особливостей способу вимірювання та використовуваного вимірювального обладнання.

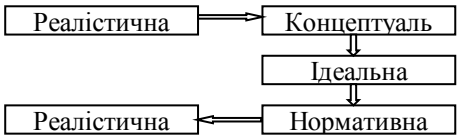


Рис. 1 – Метрологічні моделі об'єкту контролю

Таким чином, для створення метрологічних моделей, а тим більше для вирішення комплексної задачі зворотного інжинірингу необхідні не тільки метрологічні вимірювання і розрахунки з використанням САПР, а й евристичні прийоми, що дозволяють відтворити концептуальну модель і спроектувати новий виріб замість пошкодженого з урахуванням реальних технологічних можливостей.

Ці евристичні прийоми:

- виділення елементів,
- встановлення взаємозв'язків між елементами,
- виявлення взаємопов'язаних і незалежних груп елементів,
- визначення входів і виходів системи,
- використання моделей у вигляді матриць і графів [13].

Прі зворотному інжинірингу проектувальник виконує набір процедур. Деякі з них евристичні прийоми і самі процедури можуть складатися з операцій. Певну послідовність дій прийнято називати алгоритмом. Однак дана послідовність не може бути реалізована у вигляді програми, тому що містить процедури - евристичні прийоми, що виконуються безпосередньо проектувальником. Тому точніше таку велику кількість процедур можна назвати евроритмом. Безліч процедур виконуваних проектувальником відрізняється одна від одної, але існує якась інваріантна до об'єкту зворотного інжинірингу кількість процедур, яка виконується завжди [14,15,16]. Нами запропонована така інваріантна множина процедур (табл.1).

Множина процедур при зворотному інжинірингу зубчастої передачі може бути записана наступним чином:

(P_1, P_2, P_3 P_4 P_5 P_6 P_7 P_8 P_9 P_{10} P_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} P_{16} P_{17} P_{18} P_{19} P_{20} P_{21} P_{22} P_{23} P_{24} P_{25} P_{26} P_{27} P_{28} P_{29} P_{30} P_{31} P_{32})

Аналіз передачі, що має ушкодження, починається з виділення елементів P_1 та фотофіксації P_6, яка дає можливість зафіксувати і дослідити пошкодження поверхні.

Таблиця 1 – Множина процедур при зворотному інжинірингу зубчастої передачі

1.	Виділення елементів	P_1
2.	Встановлення взаємозв'язків між елементами	P_2
3.	Виявлення взаємозв'язаних і незалежних груп елементів	P_3
4.	Визначення входів і виходів системи	P_4
5.	Використання моделей у вигляді матриць і графів	P_5
6.	Фотофіксація	P_6
7.	Макро- і мікроаналіз металів та сплавів	P_7
8.	Визначення твердості	P_8
9.	Випрбування механічних властивостей матеріалів	P_9
10.	Віброакустичні вимірювання	P_{10}
11.	Вимірювання міжосьових відстаней корпусних деталей	P_{11}
12.	Вимірювання посадочних поверхонь	P_{12}
13.	Вимірювання зубчастих коліс, шліців, кулачків та інших спеціальних профілей	P_{13}
14.	Вимірювання складних поверхонь	P_{14}
15.	Використання бібліотеки уніфікованих вузлів	P_{15}
16.	Використання бібліотеки стандартних деталей	P_{16}
17.	Використання бібліотеки стандартних елементів деталей	P_{17}
18.	Використання модулей CAE. Стандартні методики розрахунку деталей.	P_{18}
19.	Використання модулей CAE для розрахунку динаміки	P_{19}
20.	Використання модулей CAE для розрахунку МКЕ	P_{20}
21.	Створення 3-D моделі складних поверхонь	P_{21}
22.	Проектування з використанням модулей CAD	P_{22}
23.	Проектування з використанням модулей CAM	P_{23}
24.	Визначення стандартів відповідно до яких виготовлений виріб	P_{24}
25.	Визначення стандартних вузлів, деталей, елементів деталей	P_{25}
26.	Визначення розрахункових нагрузок для вузлів і деталей	P_{26}
27.	Вивчення конструкції виробу	P_{27}
28.	Створення математичної моделі конструкції	P_{28}
29.	Пошук і вибір аналогів	P_{29}
30.	Використання принципу уніфікації та методів секціонування, базового агрегату, конвертування, компаундування, модифікування, параметричних рядів	P_{30}
31.	Використання принципу стандартизації і принципу технологічності	P_{31}
32.	Використання принципу оптимального підбору матеріалу та принципу місцевої якості	P_{32}

Параметр міжосьова відстань є один з найбільш інформативних. Вимірюємо її P_{11}. Вимірюємо також параметри зубчастого зачеплення, а саме кількість зубів, висоту зубу, крок і т.п. P_{13}. Використовуємо модулі CAE для геометричного розрахунку параметрів зачеплення P_{18}. Порівнюємо знайдені параметри зі стандартними P_{17}. Визначаємо стандарт відповідно до якого виготовлено передачу P_{24}.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Визначаємо стандартні елементи коліс P_{25}. Проводимо повний розрахунок геометричних параметрів, використовуючи модулі CAE P_{18}. Визначаємо твердість поверхні зубів P_8. Використовуємо модулі CAE для розрахунку передачі на міцність. P_{18}. Визначаємо розрахункові навантаження у зачепленні P_{26}. Після чого для аналізу пошкоджень може бути необхідним використання процедур – встановлення взаємозв'язків між елементами P_2 та побудова моделі передачі P_5. Якщо цього не достатньо для аналізу причин пошкоджень, проводимо аналіз металу коліс P_7. Створюємо 3-D модель зубів коліс P_{21}. Використовуємо модуль CAE для розрахунку МКЕ P_{20}. При необхідності проектування нової передачі замість пошкодженої, враховуємо принципи стандартизації і технологічності P_{31}, а також оптимального підбору матеріалу та місцевої якості P_{32}. Використовуємо модулі CAD P_{22} та передаємо дані на металорізальне обладнання – модуль CAM P_{23}. Таким чином отриманий спрощений евроритм аналізу передачі.

Множина процедур при зворотному інжинірингу зубчастої передачі у спрощеному варіанті може бути записана наступним чином:

(P_1, P_6, P_{11}, P_{13}, P_{18}, P_{17}, P_{24}, P_{25}, P_{18}, P_8, P_{18}, P_{26}, P_2, P_5)

Повний евроритм:

(P_1, P_6, P_{11}, P_{13}, P_{18}, P_{17}, P_{24}, P_{25}, P_{18}, P_8, P_{18}, P_{26}, P_2, P_5, P_7, P_{21}, P_{20}, P_{31}, P_{32}, P_{22}, P_{23}).

Обговорення результатів

Зворотний інжиніринг є достатньо поширеним проектом для інжинірингових компаній. Але за браком теоретичних розробок та термінологічної визначеності, він часто не усвідомлюється, як такий. Це призводить то втрат часу і фінансів, через невизначеність послідовності дій для такого специфічного типу проектів. Застосування відповідної множини процедур для певного виробу дозволяє компанії накопичувати досвід з виконаних проектів. І з часом може бути упорядковане як стандартна множина процедур для проектів зворотного інжинірингу визначеного типу виробів.

Евроритм дає можливість складання розкладу процедур. Особливість проектів зворотного інжинірингу полягає в тому, що виконуючи процедури послідовно, ми отримаємо мінімальну вартість проекту, а при одночасному виконанні деяких процедур ми виграємо в часі, але збільшуємо вартість проекту**.** Евроритм дає підстави для оцінки вартості проекту, вірогідності знаходження вірного рішення, та оцінки ризику проекту на базі оцінки ризиків кожної з процедур.

Висновки

1. Отримано евроритм процесу зворотного інжинірингу для зубчастої передачі.

2. Встановлено, що для визначення параметрів ідеальної моделі поряд з метрологічними вимірами, які дозволяють знайти реалістичну експериментальну модель, необхідно використовувати евристичні прийоми і САПР.

3. Для складних машинобудівних виробів з високою степінню стандартизації зворотний інжиніринг пов'язаний, перш за все, з використанням баз даних стандартних деталей, елементів деталей, марок сталей, а також стандартних методів розрахунків, що містяться в модулях CAE.

Список літератури

1. **Грабченко, А. И.** Современное оборудование и программное обеспечение обратного инжиниринга промышленных изделий / **Грабченко А. И., Доброскок В. Л., Чернышов С. И., Гаращенко Я. Н.** // *Збірник наукових праць НТУ "ХПІ": Сучасні технології в машинобудуванні*. – 2010. – № 5. – С. 138-152.
2. **Raja, V.** Reverse engineering – an industrial perspective / **V. Raja, K. J. Fernandes** // *Springer*. – 2008. – № 1. – P. 242. – doi: 10.1007/978-1-84628-856-2.
3. **Доброскок,В.Л.** Обратный инжиниринг промышленных изделий с использованием оптико-цифровой установки объемного сканирования ImetricIscan / **Доброскок В.Л., Чернышов С.И., Гаращенко Я.Н., Сидорчук Д.П.** // *Збірник наукових праць НТУ "ХПІ": Сучасні технології в машинобудуванні*. – 2010. – № 4 – С. 123-135.
4. **Várady, T.** Reverse engineering of geometric models – an introduction / **T. Várady, R. R. Martin, J. Cox** // *Comput Aided Design*. – 1997. – Vol. 29, Iss. 4. – P. 255-268. doi: 10.1016/S0010-4485(96)00054-1.
5. **Клименко В. Ю.** Реверсный инжиниринг: учебн. пособие, Запорожье, 2009. – 116 с.
6. Зворотний інжиніринг/*сайт ЦентрСАПР.*–Режим доступу:/http://www.centersapr.com/static/reverse_engineering
7. **Ferreira, J. C.** Integration of reverse engineering and rapid tooling in foundry technology / **J. C. Ferreira, N. F. Alves** // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – 142, 2. – 374-382. – doi:10.1016/S0924-0136(03)00601-0.
8. Инжиниринговая компания ТЕСИС / Режим доступу: / http://www.tesis.com.ru**.**
9. Компания Bibus Украина – Режим доступу: /http://bibus.com.ua.
10. Зворотний інжиніринг / *сайт Національний гірничий університет.* – Режим доступу: / http://gmi.nmu.org.ua/ua/news/news_kaf/1406031.
11. Зворотна розробка / Вікіпедія. – uk.wikipedia.org/wiki/Зворотна_розробка.
12. http://cyberleninka.ru/article/n/metrologicheskoe-modelirovanie-kak-osnova-proektirovaniya-i-realizatsii-metodik-vypolneniya-izmereniy.
13. **Иванов, В. В.** Управление проектами обратного инжиниринга / **В. В. Иванов** // *Вісник національного технічного університету ХПІ*. – 2015. – 1. – С. 122-127.
14. **Brandyberry, A.** Determinants of adoption for organizational innovations approaching saturation. / **A. Brandyberry** // *European journal of innovation management*. – 2003. – Vol. 6, Iss. 3. – P. 150-158. – doi: 10.1108/14601060310486226.
15. **Lopez-Herrejon, R. E.** An assessment of search-based techniques for reverse engineering feature models / **R. E. Lopez-Herrejon, L. Linsbauer, J. A. Galindo, J. A. Parejo, D. Benavides, S. Segura , A. Egyed** // *Journal of systems and software*. – 2015. – №103. – P. 353-369. – doi: 10.1016/j.jss.2014.10.037.

16. **Seewig, J.** Design and verification of geometric roughness standards by reverse engineering / **J. Seewig, M. Eifler, F. Schneider, J. C. Aurich** // *Procedia CIRP*. – 2016. – № 45. – P. 259-262. – doi: 10.1016/j.procir.2016.02.157.

Bibliography (transliterated)

1. **Grabchenko, A. I., Dobroskok, V. L., Chernyshov, S. I., Gerashchenko, Ya. N.** Sovremennoe oborudovanie i programmnoe obespechenie obratnogo inzhiniringa promyishlennyih izdeliy. *Zbirnyk naukovykh prats NTU "HPI": Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni*, 2010, **5**, 138-152.
2. **Raja, V., Fernandes, K. J.** Reverse engineering – an industrial perspective. *Springer*, 2008, **1**, 242, doi: 10.1007/978-1-84628-856-2.
3. **Dobroskok, V. L., Chernyshov, S. I., Gerashchenko, Ya. N., Sidorchuk D. P.,** Obratnyiy inzhiniring promyishlennyih izdeliy s ispolzovaniem optiko-tsifrovoy ustanovki ob'emnogo skanirovaniya ImetricIscan. *Zbirnyk naukovykh prats NTU "HPI": Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni*, 2010, **4**, 123-135.
4. **Várady, T., Martin, R. R., Cox, J.** Reverse engineering of geometric models – an introduction. *Comput Aided Design*, 1997, **4**(29), 255-268, doi:10.1016/S0010-4485(96)00054-1.
5. **Klimenko, V. Yu.** (2009). Reversnyiy inzhiniring: uchebnoe posobie, Zaporozhye, 116.
6. Zvorotniy inzhiniring / sait Tsentr SAPR. – Avialable: /http://www.center-sapr.com/static/reverse_engineering.
7. **Ferreira, J. C., Alves, N. F.** Integration of reverse engineering and rapid tooling in foundry technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, **2**(142), 374-382, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00601-0.
8. Inzhiniringovaya kompaniya TESIS – Avialable: / http://www.tesis.com.ru.
9. Kompaniya Bibus Ukraina. – Avialable: /http://bibus.com.ua.
10. Zvorotniy Inzhiniring. *Cait Natsionalniy girnichiy universitet* – Avialable: /http://gmi.nmu.org.ua/ ua/news/news_kaf/ 1406031.
11. Zvorotna rozrobka. *Wikipedia*. – Avialable: uk.wikipedia.org/wiki/ Zvorotna_rozrobka.
12. http://cyberleninka.ru/article/n/metrologicheskoe-modelirovanie-kak-osnova-proektirovaniya-i-realizatsii-metodik-vypolneniya-izmereniy.
13. **Ivanov, V. V**. Upravlenie proektami obratnogo inzhiniringa. *Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 2015, **1**, 122 – 127.
14. **Brandyberry, A.** Determinants of adoption for organizational innovations approaching saturation. *European journal of innovation management*, 2003, **3**(6), 150-158, doi: 10.1108/14601060310486226.
15. **Lopez-Herrejon, R. E., Linsbauer, L., Galindo, J. A., Parejo J. A., Benavides, D., Segura, S., Egyed, A.** An assessment of search-based techniques for reverse engineering feature models. *Journal of systems and software*, 2015, **103**, 353-369, doi: 10.1016/j.jss.2014.10.037.
16. **Seewig, J., Eifler, M., Schneider, F., Aurich, J. C.** Design and verification of geometric roughness standards by reverse engineering. *Procedia CIRP*, 2016, **45**, 259-262, doi: 10.1016/j.procir.2016.02.157.

Відомості про авторів (About authors)

Іванов Віктор Володимирович – доктор технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедрі машинознавства і деталей машин, м. Одеса, Україна; e-mail: vvict@ukr.net.

Victor Ivanov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Mechanical Engineering and Machine Parts Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; e-mail:vvict@ukr.net**.**

Чумак Наталія Володимирівна – старший інспектор відділу аспірантури і докторантури, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедрі машинознавства і деталей машин, м. Одеса, Україна; e-mail: n_chumak25@ukr.net.

Nataliia Chumak – inspector of Postgraduate and doctoral department**,** Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; e-mail: n_chumak25@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Іванов В. В. Метрологічні аспекти зворотного інжинірингу стандартизованих виробів / **В. В. Іванов, Н. В. Чумак** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 137-141. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.19.

Please cite this article as:

Ivanov, V., Chumak, N. Metrological aspects of reverse engineering of standardized products. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 137–141. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.19

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Иванов, В. В. Метрологические аспекты обратного инжиниринга стандартизированных изделий / **В. В. Иванов, Н. В. Чумак** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 137-141. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.19.

АННОТАЦИЯ *Уточнено понятие обратного инжиниринга. Показано как на основании метрологических измерений с помощью библиотек стандартных элементов и стандартных методов расчета, реализованных в САПР, может быть построена концептуальная модель изделия. Последовательность процедур метрологических, расчетных и эвристических, которая при этом выполняется, формализована в виде эвроритма.*

Ключевые слова*:обратный инжиниринг; САПР; концептуальная модель изделия; последовательность процедур; евроритм*

Надійшла (received) 24.02.2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

УДК 004.9 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.20

АНАЛІЗ ПІДРОЗДІЛІВ ВНЗ ДЛЯ УСПІШНОГО ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ З ІНФОРМАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Р. О. КОРЖ[1], С. С. ФЕДУШКО[1], О. Р. ТРАЧ[1], О. В. МАСТИКАШ[1], Г. О. БАНДРОВСЬКИЙ[2]

[1] кафедра соціальних комунікацій та інформаційної діяльності, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА
[2] кафедра дискретного аналізу та інтелектуальних систем, Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів, УКРАЇНА
**email: korzh@lp.edu.ua, felomia@gmail.com, olya@trach.com.ua, mastykash@itstep.org, henrikh.bandrovskyi@gmail.com*

АНОТАЦІЯ *У статті розглянуто актуальні проблеми дослідження використання новітніх інформаційних технологій для ефективного віртуального представництва вищого навчального закладу, що дає змогу сформувати позитивний інформаційний образ навчально-наукової установи у глобальній світовій спільноті. Здійснено аналіз інформаційної діяльності вищого навчального закладу та його підрозділів. Застосовано методи виявлення підрозділів вищого навчального закладу з низькою продуктивністю формування потенціалу. Розроблено методи підвищення продуктивності формування інформаційного ресурсу та інформаційного образу вищого навчального закладу. Визначено зони співвідношення між повнотою та інтенсивністю інформаційної діяльності для віртуальних спільнот Національного університету «Львівська політехніка».*
Ключові слова: *вищий навчальний заклад; інформаційний образ; віртуальне представництво; інформаційна діяльність; соціальні комунікації; підрозділ внз; віртуальні спільноти*

ANALYSIS OF A HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTION DEPARTMENTS FOR SUCCESSFUL FULFILLMENT OF THE INFORMATION ACTIVITIES

R. KORZH[1], S. FEDUSHKO[1], O. TRACH[1], O. MASTYKAS[1], H. BANDROVSKYI[2]

[1] Department of Social Communication and Information Activities, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE
[2] Discrete Analysis and Intelligent Systems, Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, UKRAINE

ABSTRACT *The article reviews current research issues concerning the latest information technologies for effective virtual representation of a Higher Educational Institution, which serve to create its positive informational image in the global world community. The information activities of the university departments and offices are analyzed. The methods identifying university units with low production capacity are applied. The productivity methods aimed at formation of information resources and the image of a Higher Educational Institution were elaborated. It is stated that the departments of the university should consider preparing information resource and potential as well as their publication for forming its informational image; training and support actions, communication in generators, interaction with administrative and information departments should be provided to form an information image. The main purpose of the article is to analyze the university departments to successfully perform the tasks of information activities. The methods of using excessive information resource of the departments are also elaborated. The procedures which make the release of the Higher Educational Institution out of the informational image generator and preservation of social-informative interface possible are devised. It is established that the main causes of low productivity of the unit in the generator is degradation of the community and reduction of current resources in the Higher Educational Institution. Low productivity of the information activities leads to compromising messages provoked by the absence of activity yet the presence of representative of a Higher Educational Institution, the appearance of the messages that carry misinformation and do not have objections from the Higher Educational Institution, deliberate aggression in the form of underscored inactivity and the lack of response to critical messages from a Higher Educational Institution. Elimination of these risks requires fulfilling the following stages: preparatory, official announcement, changing the signature, termination of personalized log, monitoring communities. Ratio zones between the fullness and intensity of information activities for virtual communities of Lviv Polytechnic National University are defined.*
Keywords: *Higher Educational Institution; education; informational image; a virtual representation; information activities; social communication; unit of a Higher Educational Institution; virtual community*

Вступ

Розвиток інформаційних технологій стрімко вплинув на діяльність вищих навчальних закладів. Віртуальне представництво університетів, коледжів, інститутів є успішним чинником формування їхнього рівня авторитетності в Україні та закордоном.

Інформаційна діяльність установи є комплексним завданням [1-3], яке складається з багатьох підзадач до яких належать віртуальні представництва окремих підрозділів установи з точно

© Р. О. КОРЖ, С. С. ФЕДУШКО, О. Р. ТРАЧ, О. В. МАСТИКАШ, Г. О. БАНДРОВСЬКИЙ, 2017

визначеними завданнями з інформаційної діяльності вищого навчального закладу.

Згідно з формулюванням завдання з інформаційної діяльності ВНЗ [1, 4-6] підрозділи повинні здійснювати наступні види діяльності:

- підготовку інформаційного потенціалу;
- підготовку інформаційного ресурсу та його публікацію для формування образу;
- підготовчі та допоміжні дії з формування інформаційного образу;
- комунікацію у генераторах для формування інформаційного образу;
- взаємодія з адміністративним та інформаційним підрозділами.

Відповідно, по кожному з указаних напрямків діяльності базового підрозділа існує імовірність невиконання завдань. Виявлені недоліки є підставою для вживання додаткових адміністративних і технічно-організаційних заходів для покращення діяльності підрозділів.

Ціль роботи

Основною метою роботи є аналіз інформаційної діяльності вищого навчального закладу загалом та виявлення підрозділів з низькою продуктивністю формування потенціалу та методів підвищення продуктивності формування інформаційного ресурсу та інформаційного образу вищого навчального закладу. Розроблення вище наведених методів дасть змогу підвищити продуктивність формування позитивного інформаційного образу, вести неперервний систематичний моніторинг офіційних спільнот вищого навчвального закладу, популяризувати вищий навчальний заклад на теренах України та міжнародній арені.

Виявлення підрозділів, що не виконують завдань з інформаційної діяльності

Виявлення підрозділів з низькою продуктивністю формування потенціалу

Виявлення підрозділів, що формують недостатньо інформаційних матеріалів, що є потенціалом для ІД ВНЗ, базується на порівняльному аналізі з підрозділами, що є схожі між собою за рядом показників. Такими показниками є, згідно до формальної моделі підрозділу [2]:

- функціональне призначення підрозділу ВНЗ (показники *DOT* і *DOCh*);
- загальна тематика діяльності підрозділу (показник *DTDr*);
- кількість працівників, що задіяні в ІД ВНЗ (показник *DOE*).

Наведений перелік можна розглядати як ієрархічно визначений критерій порівняння підрозділів, за яким можна порівнювати не лише підрозділи, але й групи підрозділів.

Тобто, визначивши лише функціональне призначення підрозділів, доцільно аналізувати різницю у сумарній продуктивності діяльності підрозділів різних груп. Як приклад, це може дозволити виявити недостатньо ефективну роботу групи підрозділів «коледжі».

Визначення за тематикою і функціональним призначенням дозволяє виявити окремі групи підрозділів (як правило, об'єднані в межах однієї організаційної структури), які відрізняються від інших. Наприклад, це може дозволити виявити факультет, кафедри якого недостатньо інтенсивно працюють над інформаційним потенціалом.

Основним показником, що дозволяє виявити недостатню роботу, є сумарний показник інтенсивності створення інформаційного потенціалу:

$$DPTotal(Dep_i) = DPDI(Dep_i) + \\ + DPCI(Dep_i) + DPFI(Dep_i), \quad (1)$$

Тоді припущення щодо недостатньої ефективності у формуванні потенціалу доцільно формулювати щодо підрозділів, для яких:

$$DPTotal(Dep_i) < 0{,}7 * DPTotal^*(Dep_i), \quad (2)$$

де $DPTota*(Dep_i)$ - середнє значення *DPTotal* для підрозділів, що відібрані за визначеним вище критерієм схожості.

У випадку, якщо не вдалося виявити схожих підрозділів з близькою кількістю працівників, доцільно замість *DPTotal* використати середню інтенсивність на працівника:

$$DPAvr(Dep_i) = \frac{DPTotal(Dep_i)}{DOE(Dep_i)}, \quad (3)$$

Виявлення підрозділів з низькою продуктивністю формування ІР та ІО ВНЗ та методи її підвищення

Характеристики підрозділів груп DI та DR (показники обсягу та інтенсивності формування інформаційного потенціалу, інформаційного образу та інформаційного ресурсу) є основою для визначення синтетичних показників повноти подання підрозділу та повноти інформаційної діяльності у соціальних середовищах, які є індикаторами достатньої активності підрозділу з публікації наявного та нового інформаційного потенціалу. Для формального визначення цих показників введено ще додаткові показники [2]:

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

- показник повноти подання підрозділу відображає, наскільки повно використано наявні у підрозділу матеріали у його компоненті інформаційного образу $KF(Dep_i)$;
- показник достатності активності підрозділу відображає, наскільки активно проводиться діяльність з розміщення нових матеріалів підрозділу в його компоненті інформаційного образу $KFi(Dep_i)$;
- показник інформаційних втрат який відображає, наскільки ефективним є процес трансформації інформації від потенціалу до компоненти образу $KLi(Dep_i)$. Ідеальний випадок $KLi(Dep_i) = 0$ для більшості підрозділів практично недосяжний. Проте саме зменшення втрат $KLi(Dep_i) \to \min$ є однією із задач, що розв'язується у процесі підвищення ефективності інформаційної діяльності та управління нею.

Підрозділи, для яких показник інформаційних втрат суттєво перевищує середній показник серед аналогічних підрозділів (див. вище) визначатимемо як проблемний з точки зору інформаційних втрат.

Для підрозділів з значними інформаційними втратами необхідно проводити комплекс заходів, які зводяться до підвищення компетентності працівників:

- впровадження методик ефективного збереження та опрацювання інформаційного потенціалу для подальшої трансформації в ресурс [7-9];
- навчання технікам ефективної форматизації та трансформації текстів з офісних документних форматів у гіпертекстові формати [10-12];
- навчання навикам формування «живих» текстів для соціальних середовищ [13-15].

Пропоновані показники є важливими індикаторами достатності залучення підрозділу в загальний процес інформаційної діяльності ВНЗ. Вони повинні використовуватися в методах та алгоритмах управління інформаційною діяльністю ВНЗ. Самі по собі ці показники уже дають змогу оцінити діяльність підрозділу. Для цього, зокрема, можна використати матрицю KF*Kfi з обчисленими значеннями та рекомендаціями для кожної комірки. Схематично цей підхід відображено далі на рис. 1.

Для кожної із зон, наведених на рис. 1, доцільно формувати окремі рекомендації щодо діяльності підрозділу. Фактично, саме визначення зон уже включає базові рекомендації для них.

Для зон 1 та 2 критично важливим є підвищення активності з розміщення матеріалів в соціальних середовищах. Імовірно, що низька активність може бути обумовлена недостатньою кваліфікацією у публічному онлайн-спілкуванні або соціальною інертністю працівників. У такому разі основними методами покращання ситуації є проведення навчань та тренінгів, методична підтримка з боку інформаційного підрозділу.

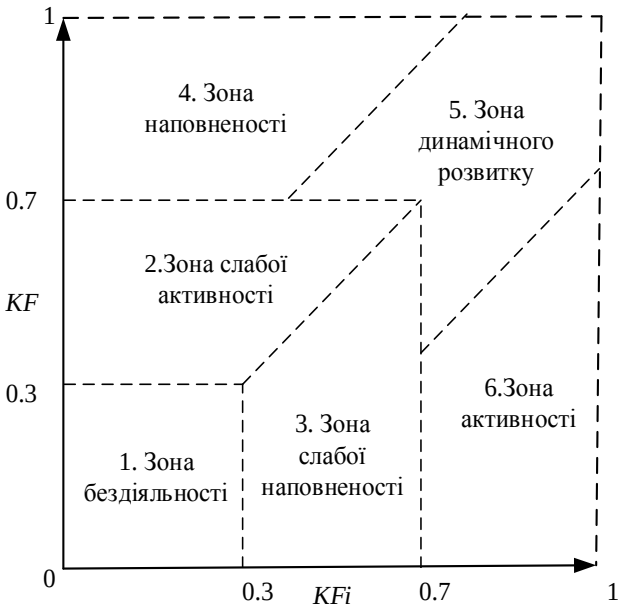


Рис. 1 – Співвідношення між повнотою та інтенсивністю інформаційної діяльності

Для зон 3 та 6 важливим є питання швидкої підготовки ресурсу для забезпечення активного розміщення матеріалів. Доцільним є залучення допоміжного персоналу та/або використання засобів автоматизації опрацювання інформаційних матеріалів (сканування та розпізнавання текстів, автореферування тощо).

Для зон 4 та 5 важливим є формування нових напрямків інформаційної діяльності, підвищення компетенцій у предметній області, актуалізації інформаційного потенціалу та інші заходи, орієнтовані на якісне поглиблення тематики підрозділу.

Використання надлишкового інформаційного ресурсу підрозділу

Вище було розглянуто задачу виявлення підрозділів, для яких інформаційний ресурс окремого підрозділу не в повній мірі використувався в формуванні ІО ВНЗ, що обумовлено низькими комунікаційними навичками персоналу та схожими проблемами. Проте, можливий і інший варіант суттєвого відставання об'ємів інформаційного образу від наявного ресурсу. Цей випадок наведено в [3] а саме – коли продуктивність підрозділу з формування ресурсу принципово перевищує можливість

розміщення його в зонах відповідальності підрозділа. Така ситуація має місце для підрозділів, що проводять активні наукові та методичні розробки в інноваційних [16] та високотехнологічних [17] напрямках, які в силу новизни та складності мало дискутуються у соціальних середовищах Інтернету.

У такому разі надлишковий інформаційний ресурс може бути використаний наступними способами:

- формування спеціалізованих навчальних та інформаційних сайтів інноваційних напрямків, з подальшим цитуванням у ССІ;
- формування власних (започаткованих, але не обов'язково контрольованих ВНЗ) спільнот, де основною часткою контенту певний час виступає саме невикористаний інформаційний ресурс;
- спрямування зусиль на формування статтей у системах колаборативних знань (Вікіпедія та інші) – як найбільш відкритого для інноваційних напрямків знань середовища.

Указані вище три способи не є альтернативами. Навпаки, максимальна ефективність досягається при послідовній (в указаному вище порядку) реалізації кожного з способів. Тоді отримується кумулятивний ефект не лише щодо соціальних середовищ, але й підвищення цитованості та позиціонування сайту ВНЗ у пошукових системах (відповідно і його популярності).

Цей підхід краще реалізується саме для інноваційних наукових тематик у силу того, що соціум менше схильний сприймати такі послідовні стратегії як агресивне просування саме для нових областей (фактори відсутності конкуренції та інформаційного голоду). У той же час для традиційних, уже усталених областей знань такий підхід часто сприймається як форма спаму (зокрема з метою підвищення рангу сайту).

У будь-якому разі такий інформаційний ресурс потребує ретельнішого, ніж зазвичай, стилістичного опрацювання та змістовної адаптації до непідготовленого споживача. Важливіша ніж для інших, для таких тематик є наявність доступних ілюстрацій та стриманість у використанні спеціальної термінології.

Використання перших двох указаних способів вимагає від ВНЗ додаткових затрат на їхнє забезпечення. Якщо для першого способу це лише затрати на формування та технічну платформу сайту (які на сьогодні рідко є надто значними) то формування власних спільнот вимагає також відповідного довгострокового планування людських ресурсів на модерацію спільноти та виконаття ряду процедур з популяризації спільноти і формування її активної аудиторії. Такі процедури і методики є на сьогодні пропрацьованими у дослідженнях до позиціонування певних видів сайтів та технологій SMM [4].

Загалом, публікація за указаним алгоритмом наявних інформаційних ресурсів з інноваційних наукових напрямів дозволяє ВНЗ отримати довготривалий іміджовий ефект: на багато років саме ВНЗ та спільноти, лояльні до нього, стають основним носієм інформації за тематикою та площадками для обговорення «за замовчуванням» для користувачів. У цьому сенсі формування таких площадок та публікацію інформаційних ресурсів слід розглядати як певного роду довгострокову інвестицію людських та інформаційних ресурсів.

Процедури виходу ВНЗ з генератора та консервації соціально-інформаційного інтерфейсу

Типовою задачею, що виникає у процесі інформаційної діяльності ВНЗ на макрорівні є задача виходу ВНЗ певної спільноти у силу різних обставин. Серед обставин виділимо низьку продуктивність діяльності підрозділа в генераторі (без можливості її покращення), деградацію спільноти, зменшення наявних у ВНЗ ресурсів.

Припинення активної діяльності в генераторі не призводить до зникнення відповідних елементів ІО ВНЗ. Більше того, контент у елементах може збільшуватися, адже дискусії, у яких брали участь представники ВНЗ, не закриваються і не ліквідовуються. Інші учасники спільноти можуть вільно продовжувати обговорення ВНЗ, що в результаті призводить до появи ряду ризиків:

- появи компроментуючих повідомлень, спровокованих бездіяльністю проте наявністю представництва ВНЗ;
- поява повідомлень, що несуть дезінформацію (достовірність якої зростає через наявність представництва ВНЗ) і не мають заперечень від ВНЗ;
- цілеспрямована агресія у формі підкреслення бездіяльності та відсутності реакції ВНЗ на критичні повідомлення.

Ці та інші ризики є достатньо суттєвими, і у випадку наявності у спільноті групи вмотивованих осіб можуть повністю змінити тональність елементів ІО ВНЗ у спільноті у негативну.

Для усунення таких ризиків пропонується типова процедура планового виходу з генератора та закриття його як соціально-інформаційного інтерфейсу.

У процедурі виділяються наступні етапи.

Підготовчий. Опрацьовуються усі важливі повідомлення в дискусіях, що формують елементи ІО ВНЗ.

Офіційне оголошення. Розміщається офіційне повідомлення про перспективний вихід представника ВНЗ зі спільноти (орієнтовно за 1 місяць). Указуються причини, розміщається прохання обдумати і оперативно задати необхідні

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

питання. У повідомленні також обов'язково повідомляються альтернативні активно функціонуючі канали зв'язку для продовження комунікації з ВНЗ.

Зміна підпису. Змінюється підпис користувача-представника ВНЗ, у якому вказується інформація про його відсутність у спільноті та альтернативні координати. Вносяться інші необхідні зміни в профіль користувача.

Повторне оголошення. За короткий термін до виходу (2-7 днів) повторно розміщається оголошення про вихід зі спільноти. Можливе розміщення відповідей на нові повідомлення в альтернативних генераторах.

Припинення персоніфікованого входу. Розміщення прощального повідомлення (стилістика повідомлення повинна бути максимально витриманою і привітною). Після цього вхід у спільноту (якщо можливо) здійснюється у прихованому режимі або як анонімний користувач.

Моніторинг спільноти. Систематичний моніторинг появи важливих повідомлень у дискусіях, що формують компоненту ІО ВНЗ (не рідше разу на 1 місяць, проте перших 3 місяці – раз на 1 тиждень).

Такий підхід дозволяє однозначно трактування «мовчання» з боку ВНЗ як припинення діяльності у спільноті, а не відсутність аргументів чи бажання допомогти. Наявність альтернативних каналів зв'язку дозволить не втрачати контакт з зацікавленими особами.

Неперервний систематичний моніторинг спільноти передбачає можливість виходу з режиму консервації. Це може мати місце в наступних випадках:

- зміна ресурсів або пріоритетів ВНЗ;
- суттєва зміна характеристик генератора;
- поява суттєвих загроз для ІО ВНЗ.

Повернення у спільноту (розконсервація представництва) також повинна відбуватися формалізовано – зі збереженням логіна представника, офіційним повідомленням про відновлення активної діяльності.

Крім наведеного способу консервації генератора можливий також і полегшений варіант: представник ВНЗ декларує мінімізацію представництва (наприклад, що він писатиме не частіше 1 разу на місяць), проте цей варіант є доцільним лише для толерантних до ВНЗ спільнот.

Заміна представника (наприклад, при звільненні конкретної особи) не є окремим випадком виходу зі спільноти. У такому разі діяльність підрозділа в генераторі не припиняється, а повинне відбутися офіційне повідомення про передачу повноважень.

У будь-якому разі вихід представників ВНЗ зі спільноти не призводить до усунення відповідного компонента ІО ВНЗ з розгляду як складової активної частини ІО ВНЗ. Інформація про законсервовану спільноту повинна зберігатися в базі даних системи управління інформаційною діяльністю ВНЗ.

Обговорення результатів

Інформаційну діяльність з створення позитивного інформаційного образу Національного університету «Львівська політехніка» здійснює декілька спільнот на платформах соціальних мереж «Фейсбук» та «Вконтакті» та у формі Веб-форумів і колективних блогів.

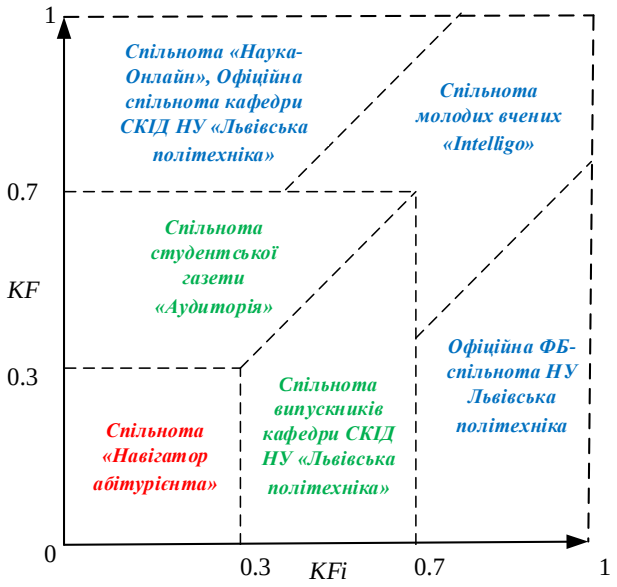


Рис. 2 – Співвідношення між повнотою та інтенсивністю інформаційної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»

Розподіл зон виглядатиме наступним чином:

- зона бездіяльності – спільнота «Навігатор абітурієнта»;
- Зона слабої активності – спільнота студентської газети «Аудиторія»;
- Зона слабої наповненості – спільнота випускників кафедри СКІД НУ «Львівська політехніка»;
- Зона наповненості – спільнота «Наука-Онлайн», Офіційна спільнота кафедри СКІД НУ «Львівська політехніка»;
- Зона динамічного розвитку – спільнота молодих вчених «Intelligo»;
- Зона активності - офіційна ФБ-спільнота НУ Львівська політехніка.

Висновки

У статті розглянуто акутальну проблему аналізу інформаційної діяльності вищого навчального закладу загалом та його підрозділів для успішного виконання завдань з інформаційної діяльності. Розроблено методику виявлення підрозділів, що не виконують завдань з інформаційної діяльності. Застосовано методику виявлення підрозділів з низькою продуктивністю формування інформаційного ресурсу та інформаційного образу вищого навчального закладу та методів їх підвищення. Розроблено методи використання надлишкового інформаційного ресурсу підрозділу. Розроблено процедури виходу вищого навчального закладу з генератора інформаційного образу та консервації соціально-інформаційного інтерфейсу. Визначено зони співвідношення між повнотою та інтенсивністю інформаційної діяльності для віртуальних спільнот Національного університету «Львівська політехніка».

Список літератури

1 **Корж, Р. О.** Аналіз сучасних видів та методів інформаційної діяльності ВНЗ в Інтернеті / **Р. О. Корж, А. М. Пелещишин** // *Східно–Європейський журнал передових технологій*. – 2013. – №2/2 (62). – С. 62-65.

2 **Пелещишин, А. М.** Базові характеристики та модель підрозділів ВНЗ як суб'єкта інформаційної діяльності / **А. М. Пелещишин, Р. О. Корж** // *Східно–Європейський журнал передових технологій*. – 2015. – 2/2(74) – 27-34.

3 **Korzh, R.** University's Information Image as a Result of University Web Communities' Activities / **R. Korzh, A. Peleshchyshyn, Yu. Syerov, S. Fedushko** // *Advances in Intelligent Systems and Computing: Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologie*s, CSIT 2016, September 6-10 Lviv, Ukraine, Shakhovska N. (Ed.). – Springer International Publishing: 2017.– V. 512.– pp 115-127. – doi: 10.1007/978-3-319-45991-2_8.

4 **Форкун, Ю. В.** Сучасні підходи технології розроблення та формування інформаційно-довідкового забезпечення суспільних комунікаційних систем / **Ю. В. Форкун, А. М. Пелещишин** // *Східно-Європейський журнал передових технологій*, №2/2(56)2012 - С. 3-12.

5 **Марковець, О. В.** Опрацювання звернень до ВНЗ із Інтернету / **О. В. Марковець** // *Інформація, комунікація, суспільство : Матеріали І Міжнародної наукової конференції ICS-2012*. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. - С. 94-95.

6 **Trach, O.** Functional-network model of tasks performance of virtual communication life cycle directions / **O. Trach, A. Peleshchyshyn** // *Proceedings of the XIth International Scientific and Technical Conference (CSIT 2016*). Lviv Polytechnic Publishing House. 2016. P. 108-110. – doi: 10.1109/STC-CSIT.2016.7589881.

7 **Bacon, J.** The Art of Community: Building the New Age of Participation (Theory in Practice) / **J. Bacon.** – O'Reilly Media, 2009. – p. 400.

8 **Alphy, M.** Study on online community user motif using web usage mining / **M. Alphy, A. Sharma** // 4th International Conference on Science and Engineering in Mathematics, Chemistry and Physics (ScieTech). – 710. – *Journal of Physics Conference Series* – 2016. – doi: 10.1088/1742-6596/710/1/012015.

9 **Syerov, Yu.** Web-Community Ontological Representation Using Intelligent Dataspace Analyzing Agent / **Yu. Syerov, N. Schahovs'ka** // *Proceedings of the X-th International Conference CADSM-2009 «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microeletronics*». – Polyana–Svaliava (Zakarpattya), February 24-28, 2009. – С.479-480.

10 **Lambert, R.** The future of European universities: Renaissance or decay? / **R. Lambert, N. Butler** // London: Centre for European Reform, 2006. – 65 p.

11 **Kraut, R.** Building Successful Online Communities: Evidence-Based Social Design / **Robert E. Kraut, Paul Resnick** // *Massachusetts Institute of Technology*. - MIT Press, 2012. - 283p.

12 **Strunga, A.** The Integration of Virtual Learning Communities into Universities' Knowledge Management Models / **Strunga A** // *7th World Conference on Educational Sciences*. – 2015. – T. 197. – p. 2430-2434. – doi: 10.1016/j.sbspro.2015.07.306.

13 **Russell, M.** Mining the Social Web: Data Mining Facebook, Twitter, LinkedIn, Google+, GitHub, and More / **M. A. Russell** // O'Reilly Media, Inc., 2013. – 424p.

14 **Prabowo, H**. Effect of Higher Education Image and the Use of Information Technology Towards Relational Quality in Jakarta Private Universities / **H. Prabowo, T. Sriwidadi** // *Advanced Science Letters*. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 866-870. – doi: 10.1166/asl.2015.5908.

15 **Hager, L.** Building dynamic virtual and hybrid learning communities in higher education through eportfolios and web 2.0/3.0 / **L. Hager** // *4th International Conference of Education, Research and Innovation (Iceri)*. – 2011. – p. 3807-3814.

16 **Buss, A.** Online Communities Handbook: Building your business and brand on the Web / **A. Buss, N. Strauss**. – *New Riders Press*, 2009. – 288 p.

17 **Cintron, R.** Advances in Higher Education and Professional Development / **Cintron R., Samuel J., Hinson J.** - IGI *Global*, 2016. - 316p.

Bibliography (translitareted)

1 **Korzh, R., Peleshchyshyn, A.** Analysis of modern forms and methods of university information activities in Internet. *Eastern-European Journal of Eenterprise Technologies*, 2013, **2/2 (62)**, 62-65.

2 **Peleshchyshyn, A., Korzh, R.** Baseline characteristics and model of university departments as the subject of information activities. *Eastern-European Journal of Eenterprise Technologies*, 2015, **2/2 (74)**, 27-34.

3 **Korzh, R., Peleshchyshyn, A., Syerov, Yu., Fedushko, S.** University's Information Image as a Result of University Web Communities' Activities. *Advances in Intelligent Systems and Computing: Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2016*, September 6-

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

10 Lviv, Ukraine, Shakhovska N. (Ed.), Springer International Publishing, 2017, **512**, 115-127, doi: 10.1007/978-3-319-45991-2_8.
4 **Forkun, Yu., Peleshchyshyn, A.** Modern approaches to technology development and formation of information and help ensure public communication systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2012, **2/2(56)**, 3-12.
5 **Markovec, O.** Processing of applications to universities from the Internet. *Information, communication and society: Materials of the International Conference ICS-2012*, Lviv Polytechnic National University Publishing House, 2012, 94-95.
6 **Trach, O., Peleshchyshyn, A.** Functional-network model of tasks performance of virtual communication life cycle directions. *Proceedings of the XIth International Scientific and Technical Conference (CSIT 2016)*, Lviv Polytechnic Publishing House, 2016, 108-110. – doi: 10.1109/STC-CSIT.2016.7589881.
7 **Bacon, J.** The Art of Community: Building the New Age of Participation (Theory in Practice), O'Reilly Media, 2009, 400.
8 **Alphy, M., Sharma, A.** Study on online community user motif using web usage mining. 4th International Conference on Science and Engineering in Mathematics, Chemistry and Physics (ScieTech),. *Journal of Physics Conference Series*, 2016, **710.** doi: 10.1088/1742-6596/710/1/012015.
9 **Syerov, Yu., Schahovs'ka, N.** Web-Community Ontological Representation Using Intelligent Dataspace Analyzing Agent. *Proceedings of the X-th International Conference CADSM-2009 «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microeletronics»*, 2009, 479-480.
10 **Lambert, R., Butler, N.** The future of European universities: Renaissance or decay?. London: Centre for European Reform, 2006, 65.
11 **Kraut, R., Resnick, P.** Building Successful Online Communities: Evidence-Based Social Design. *Massachusetts Institute of Technology*, MIT Press, 2012, 283.
12 **Strunga, A.** The Integration of Virtual Learning Communities into Universities' Knowledge Management Models. *7th World Conference on Educational Sciences*, 2015, **197**, 2430-2434, doi: 10.1016/j.sbspro.2015.07.306.
13 **Russell, M.** Mining the Social Web: Data Mining Facebook, Twitter, LinkedIn, Google+, GitHub, and More, O'Reilly Media, Inc., 2013, 424.
14 **Prabowo, H**., **Sriwidadi, T.** Effect of Higher Education Image and the Use of Information Technology Towards Relational Quality in Jakarta Private Universities. *Advanced Science Letters*, 2015, **21 (4)**, 866-870, doi: 10.1166/asl.2015.5908.
15 **Hager, L.** Building dynamic virtual and hybrid learning communities in higher education through eportfolios and web 2.0/3.0. *4th International Conference of Education, Research and Innovation (Iceri)*, 2011, 3807-3814.
16 **Buss, A., Strauss, N**. Online Communities Handbook: Building your business and brand on the Web. *New Riders Press*, 2009, 288.
17 **Cintron, R., Samuel, J., Hinson, J.** Advances in Higher Edu-cation and Professional Development,IGI *Global*, 2016, 316.

Відомості про авторів (About authors)

Корж Роман Орестович – кандидат технічних наук, доцент, проректор з науково-педагогічної роботи, Національний університет "Львівська політехніка", доцент кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності; м. Львів, Україна; e-mail: korzh@lp.edu.ua.

Roman Korzh – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Vice-rector for scientific and pedagogical work, Department of Social Communication and Information Activities, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; e-mail: korzh@lp.edu.ua.

Федушко Соломія Степанівна – кандидат технічних наук, асистент, Національний університет "Львівська політехніка", асистент кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності; м. Львів, Україна; e-mail: felomia@gmail.com.

Solomia Fedushko – Philosophy Doctor of Engeneering, assistant, Department of Social Communication and Information Activities, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; e-mail: felomia@gmail.com.

Трач Ольга Романівна – асистент, Національний університет "Львівська політехніка", асистент кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності; м. Львів, Україна; e-mail: olya@trach.com.ua

Olha Trach – assistant, Department of Social Communication and Information Activities, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; e-mail: olya@trach.com.ua.

Мастикаш Олег Володимирович – аспірант, Національний університет "Львівська політехніка", аспірант кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності; м. Львів, Україна; e-mail: mastykash@itstep.org.

Oleh Mastykash – postgraduate student, Department of Social Communication and Information Activities, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; e-mail: mastykash@itstep.org.

Бандровський Генріх Олександрович – студент, Львівський національний університет імені Івана Франка, кафедра дискретного аналізу та інтелектуальних систем, м.Львів, Україна; e-mail: henrikh.bandrovskyi@gmail.com.

Henrikh Bandrovskyi – student, Ivan Franko National University of Lviv, Department of Discrete Analysis and Intelligent Systems, Lviv Ukraine; e-mail: henrikh.bandrovskyi@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Корж, Р. О. Аналіз підрозділів внз для успішного виконання завдань з інформаційної діяльності / **Р. О. Корж , С. С. Федушко, О. Р. Трач, О. В. Мастикаш, Г. О. Бандровський** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 142-149. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.20.

Please cite this article as:

Korzh, R., Fedushko, S., Trach, O., Mastykas, O., Bandrovskyi, H. Analysis of a higher educational institution departments for successful fulfillment of the information activities abstract. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 142–149, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.20.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Корж, Р. О. Анализ подразделений вузов для успешного выполнения задач по информационной деятельности / **Корж Р. О., Федушко С. С., Трач О. Р., Мастикаш О. В., Бандровский Г. А.** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 142-149. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.20.

АННОТАЦИЯ *В статье рассмотрены актуальные проблемы исследования использования новейших информационных технологий для эффективного виртуального представительства высшего учебного заведения, позволяет сформировать положительный информационный образ учебно-научного учреждения в глобальной мировой общественности. Осуществлен анализ информационной деятельности высшего учебного заведения и его подразделений. Применены методы выявления подразделений высшего учебного заведения с низкой производительностью формирования потенциала. Разработаны методы повышения производительности формирования информационного ресурса и информационного образа вуза. Определены зоны соотношение между полнотой и интенсивностью информационной деятельности для виртуальных сообществ Национального университета «Львовская политехника».*

Ключевые слова: *высшее учебное заведение; информационный образ; виртуальное представительство; информационная деятельность; социальные коммуникации; подразделение вуза; виртуальные сообщества*

Надійшла (received) 01.03.2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

УДК 004.7. doi:10.20998/2413-4295.2017.07.21

ТОПОЛОГИЯ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ FTTH (FIBER-TO-THE-HOME)

Ю. В. КРАВЧЕНКО, С. В. ТОЛЮПА, О. В. БАРАБАШ, А. В. ТРУШ*, О. А. ЛЕЩЕНКО

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченка, г. Киев, УКРАИНА
**email: trush-viti@mail.ru*

АННОТАЦИЯ *В настоящее время архитектуры на базе PON получили большое распространение. Основными факторами большинства конфигураций Ethernet FTTH является гибкость бизнес-модели и способность поддерживать будущие сервисы. В этой статье описываются различные архитектуры сетей доступа, рассматриваются протоколы доступа, а также анализируются характеристики оптических сетей FTTH (Fiber to the Home). Успешность их деятельности является стимулом к динамичному развитию этой отрасли.*
Ключевые слова: *топология; PON; Ethernet FTTH; оптические сети; архитектура сети*

TOPOLOGY OF OPTICAL NETWORKS FTTH (FIBER-TO-THE-HOME)

Y. KRAVCHENKO, S. TOLYUPA, O. BARABASH, A. TRUSH, O. LESHCHENKO

Taras Shevchenko National University of Kiev, Kiev, UKRAINE

ABSTRACT *This article describes different architecture of access networks, access protocols; also, we analyzed the characteristics of optical networks FTTH (Fiber to the Home). The optical fiber with today is the main transport medium in the backbone and metro network. Using of fiber optic cable instead of copper cable has allowed to significantly increasing the quality of service. The greatest potential for broadband networks today have a fiber-optic technology under the general term FTTX (Fiber To The X - fiber to the X point), in which from the node connection to a specified location (point X) comes optics, and then to the subscriber - copper cable (and possible option, in which optics routed directly to a subscriber unit).*
Fiber optic access networks currently based on different architectures and technologies. Standards for these technologies and available of equipment make development of service-provider networks without risks. The success of their work stimulate to the dynamic development of the industry. Nowadays the PON architecture became very popular. The main factors of the most configurations of Ethernet FTTH it is the flexibility of the business model and the ability to support future services.
Keywords*: Topology; PON; Ethernet FTTH; optical networks; network architecture*

Introduction

Goal. This article describes different architecture of access networks, access protocols; also, we analyzed the characteristics of optical networks FTTH (Fiber to the Home).

The optical fiber with today is the main transport medium in the backbone and metro network. Using of fiber optic cable instead of copper cable has allowed to significantly increasing the quality of service.

At present, many corporate customers have access to the services of the type "point to point" fiber-optic networks. At the same time, residential customers and small business sector often use digital subscriber line (xDSL) and hybrid fiber-coaxial lines, the main drawback is that limited bandwidth.

Although fiber-optic lines have throughput limitations, there is one obstacle complicating their active implementation in the residential sector and small businesses - is the high cost of connecting each caller. After a great number of connections type "point to point" would require large amounts of active components, fiber optic cables. The cost of construction and operation would become unreasonably large.

The greatest potential for broadband networks today have a fiber-optic technology under the general term FTTX (Fiber To The X - fiber to the X point), in which from the node connection to a specified location (point X) comes optics, and then to the subscriber - copper cable (and possible option, in which optics routed directly to a subscriber unit).

There are variations of FTTX network architectures, the main ones are:

FTTN - Fiber to the Node, Fiber to the node 1km from the subscriber;

FTTC - Fiber to the Curb, fiber to the cabinet 500m from the subscriber;

FTTB - Fiber to the Building, fiber to the building, only 100m from the subscriber;

FTTH - Fiber to the Home, fiber to the apartment / office phone.

Services and bandwidth requirements

Speed Internet access is growing rapidly. It related to the respective application requirements and the possibilities of service providers and the industry as a whole. Most of the bandwidth of most modern broadband networks consumes peer applications and content with increased insistence to network resources (eg, videos). The race between the demands of applications and technical capabilities similar to the one that took place in

© Ю. В. КРАВЧЕНКО, С. В. ТОЛЮПА, О. В. БАРАБАШ, А. В. ТРУШ, О. А. ЛЕЩЕНКО, 2017

the PC manufacturing industry, where at each step of increasing processor speed and memory applications appear instantly, fully absorb new resources, such as application processing system or video editing.

Still, the deployment of new broadband networks stimulated mainly the requirements of today's applications, rather than future needs. The most capacious in terms of bandwidth usage are apps for streaming video. It would seem that for streaming high-definition television (HDTV) and browsing the Internet bandwidth of 20-25 Mbit / s is enough for a long time. However, historical data and the forecast for the near future (see. Figure 1) shows that the growth of bandwidth requirements is exponential. Currently, in some European countries, some service providers already offer for private customer's access at speeds of 1 Gbit / s, and it has built an extensive network with 100 Mbit / s. Such connection speed subscribers are only possible based on FTTH technology.

Fig. 1 – Bbandwidth growth (according to Heavy Reading «FTTH Worldwide Market & Technology Forecast».

Some applications require a stable broadband access:

1. Download large movie files for editing and post-processing.

2. Collaborative editing or other forms of cooperation in which very large files transmitted.

3. Telepresence systems (Telepresence), including parallel transmission of video, voice and data applications.

Traffic most applications has been uneven and high-speed data transmission is required only for a short period. Because they can share aggregation and backbone network, where you can lay the significant oversubscription. In contrast, streaming applications such as video broadcasting, video on demand and IP-telephony (VoIP), on the other hand, require a bandwidth reservation for the entire period of application. It is also necessary to bear in mind the growing traffic symmetry. File sharing in peer networks, remote collaboration, IP-telephony and other applications create initially symmetric traffic flows as opposed to client-server applications with asymmetric traffic, such as streaming video or web browsing [1].

Web aggregation and backbone networks are relatively easy to modernizing and increasing the capacity is possible with relatively little additional cost. Investments in the infrastructure of access, however, viewed as long-term. In this regard, network designers have to determine whether the use does not involve limitations, selected access technology in the future required bandwidth.

Architecture FTTH networks

Experience suggests that the main costs when deploying FTTH networks accounted for construction works and the cost of the fiber optic cable is a relatively small part. Moreover, although the cycle life FTTH network and its electronics is several years, fiber optic cable and the distribution network have a longer life span (at least 30 years). Such durability and high cost of construction involve high demands on the proper design of fiber optic lines.

Architecture deployed FTTH networks divided into three main categories:

- "Ring» Ethernet-switch.
- «Star» Ethernet-switch.
- "Tree" using PON passive optical network technology.

Architecture based on Ethernet

The need for fast time to market and reduce costs for customers led to a network architecture based on Ethernet-switching. Data transfer via Ethernet and Ethernet-switching began to generate income on corporate networks market, led to a decline in prices, the appearance of the finished products, and accelerate the development of new products.

At the heart of the first European Ethernet FTTH network projects lay architecture, in which the switches are located on the ground floors of apartment houses were united in technology for Gigabit Ethernet ring.

Then the widespread Ethernet architecture of the "star" (see. Figure 2). This architecture requires a dedicated fiber-optic lines (typically single-mode, single-fiber lines with Ethernet data transmission over 100BX or 1000BX technology) from each terminal to the point of presence (point of presence, POP), where there is their connection to the switch. Terminals may be in the individual residential houses, apartments or apartment buildings, in the basement of which are located switches that put their lines for all the apartments with the appropriate transfer of technology [2].

Architecture-based PON

If you are using architecture based on passive optical network PON networks to deploy FTTH fiber optic distributed via passive optical splitters with a branching factor of up to 1:64 or even 1: 128.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Architecture based on the PON FTTH usually supports the Ethernet protocol. In some cases, an additional length of the downstream wavelength (downstream), allowing you to provide traditional analog and digital TV services to users without the use of set-top boxes with IP support.

Figure 3 shows a typical passive optical network PON, which uses a variety of optical network terminators (optical network termination, ONT) and optical network unit (optical network unit, ONU). ONT designed for individual use by the end user. ONU devices are usually located on the ground floors or in the basement and shared by a group of users. Voice services, and data services and video brought from the ONU or ONT to the subscriber via cables laid in the customer premises. [3].

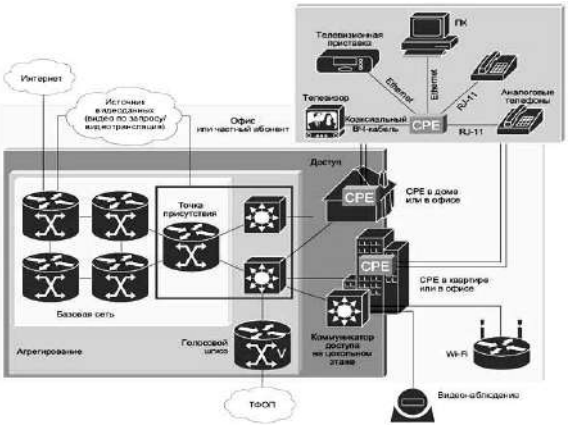


Fig. 2 – Ethernet FTTH architecture topology "Star"

The most significant aspect of FTTH deployments based on the PON is saving fiber optic lines in the area of optical splitters to a central office or point of presence.

Firstly, in the topology "point to point" a dedicated optical interface for each subscriber, which increases the cost of this architecture greatly compared with that where the ports shared by a large number of subscribers. However, experience in implementation of a large number of projects has shown that the use of the Ethernet-allocated ports can compete on price with the use of PON ports of the high cost of the latter. Ethernet ports cost is very low due to the sheer number of shipments of such ports for corporate networks and service provider networks, while GPON ports used only for this technology and manufactured in much smaller quantities.

Second, assuming the presence of a 100 percent subscription service FTTH, then the network point of presence is required on basis of half the PON equipment than for Ethernet FTTH network. At the same time, if we take into account the actual percentage of the subscription to the services (as described below), the difference erased. This is the fact that the need to port the optical line termination (OLT) to the first network subscriber based on PON, so the amount cannot be reduced OLT ports due to the low percentage of subscription services.

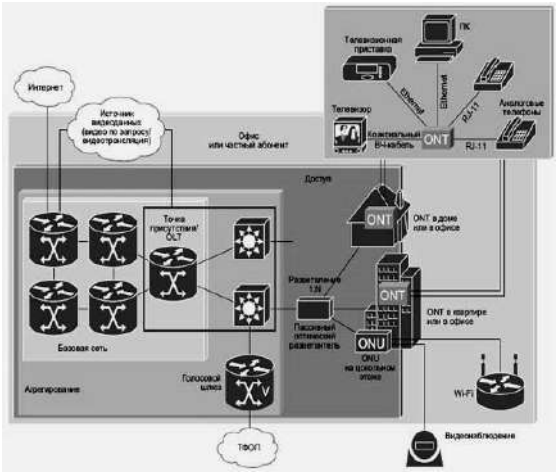


Fig. 3 – The architecture of a passive optical network (PON)

Third, a large number of fiber-optic lines of service appears to be very challenging, if there are no latest optical racks that allow you to build points of presence with thousands of fiber optic lines running from linear structures. These node deployed now in Europe FTTH network architecture using "point-to-point» (P2P FTTH). Such an assembly may comprise approximately 2000 optical network of lines in each rack.

Because PON is inherently a broadcast medium, some service providers are finding it attractive for video broadcasting, which allows use the coaxial wiring at the subscriber to transmit an analog or digital TV signal.

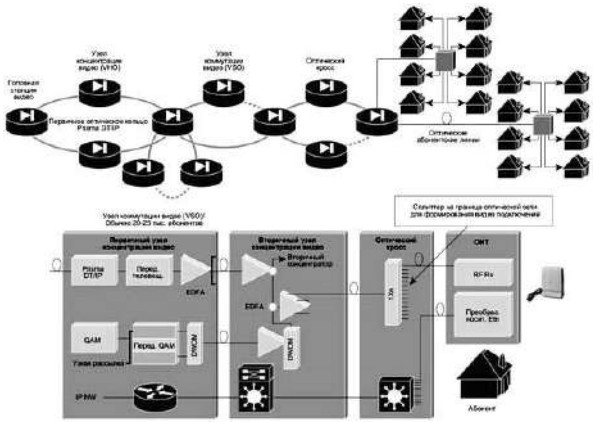


Fig. 4 – Architecture overlapping television signal.

However, the widespread addition of a second fiber-optic lines to the topology of P2P FTTH «point-to-point" (see. Figure 4). Currently, service providers are deploying hybrid architecture, topology using "point-point" for all interactive services, including IP-TV, and the topology of overlay additional passive optical network for the dissemination of video broadcasting. This structure optimized for a larger number of subscribers as compared with PON network for interactive services [4,5].

PON-architecture issues

- The total bandwidth. Bandwidth tree in the PON fiber-optic lines used as a large number of subscribers, which allows making a profit at the expense of reducing the cost of each subscriber. Although GPON technology provides total bandwidth downstream of 2.5 Gbit / s, it cannot reflect the growth of services and future customer's requirements in the long term, because the bandwidth needs grow exponentially.

-Encryption. Because the PON - a technology with a common transmission medium, it is necessary to encrypt all data streams.

The GPON technology is carried downstream encryption only, and the use of secure Advanced Encryption Standard (Advance Encryption Standard, AES) with 256-bit keys allows you to increase the security of personal data of end users and provides service providers the ability to prevent theft of services. However, the reliability of the standard AES leads to reduced productivity. To encrypt a substantial amount necessary to transfer the service information together with each packet, which may lead to a noticeable reduction in the useful data rate PON (depending on the combination of different traffic types) [6].

- High operating transmission speed. In connection with the use in passive optical networks PON common transmission medium, each terminal (ONT or OLT) is forced to operate at the aggregate data rate. Even if the customer has paid only for 25 Mbit / s, each endpoint optical network (ONT) PON in this tree must operate at a speed of 2.5 Gb / s (GPON). Operation of electronic and optical devices at a rate 100 times greater than the required data rate increases the price of components.

- Need for greater power of the optical signal. Each branching ratio of 1: 2 link budget decreases by 3.4 dB. When the branching ratio of 1:64 in the energy potential of the communication line is reduced by 20.4 dB (equivalent to a power ratio of 110). Thus, in this model all the optical transmitters in the PON architecture should provide 110 times more optical power in comparison with the architecture FTTH «point to point" transmission on the same distance.

- Access to the local loop. LLU (Local Loop Unbundling (LLU) - this is the method used currently abroad on a mandatory basis in the networks of telephony to provide access to alternative operators to subscriber copper communication lines This approach allowed us to significantly increase the penetration of the DSL service market and reduce prices for broadband access services to subscribers by competing providers [7].

PON networks are not satisfy the requirements LLU because there is only one fiber optic line to connect the caller group, which therefore can't be separated on the physical level, but only at the logical level (see. Figure 5). Most of the new FTTH networks in Europe offer some form of LLU, which opens up new business opportunities.

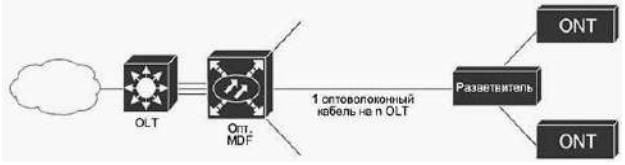


Fig. 5 – LLU implementation limits for architecture based on the PON splitter

It is theoretically possible to increase the flexibility of switching of clients between the optical splitters PON by combining the splitter with an optical distribution frame in the switch cabinet area (see. Figure 6). This feature is useful when it is difficult to predict the percentage of subscribers to the subscription services, such as too large building, and fulfill the requirements LLU if necessary [8,9].

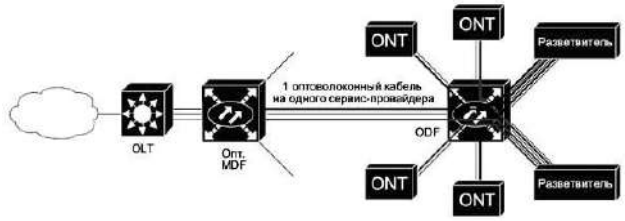


Fig. 6 – A fiber optic line with an optical distribution node for the implementation of LLU requirements

Subscriber Access. Typically, when deploying FTTH network is performed simultaneous connection of fiber-optic lines to all potential customers in the region. In the case of a passive optical network all, the fiber optic connected to the hub and shrink feeder optical cable to the central office or point of presence. Subscribers can subscribe to FTTH services only after the deployment of fiber-optic lines.

Ethernet FTTH solution has many advantages over the architecture based on the PON.

1. Virtually unlimited selectable bandwidth.

Direct fiber optic line can provide virtually unlimited bandwidth, which allows for maximum flexibility in deploying services in the future, as bandwidth needs increase.

2. Ethernet FTTH architecture enables service providers to ensure that each subscriber and bandwidth required creating network profiles bandwidth for each client individually. Each individual or business user can get a symmetrical bandwidth of any desired width to it.

3. Long range.

In typical configuration, it has cheap monofilament line, or using the 100BX 1000BX technology, with predetermined maximum steps of 10 km radius in typical configurations of Ethernet FTTH access networks.

4. Flexible growth.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Use ports on Ethernet FTTH access switch may only those subscribers who have subscribed the service provider.

5. Technological independence.

Although Ethernet FTTH current configuration may employ Gigabit Ethernet technology, it can become irrelevant for the next 30-40 years. However, single-mode fiber optic is a medium capable of supporting any new transmission technology. Moreover, in some cases, to connect corporate subscribers using fiber-optic technology, such as SONET / SDH and Fibre Channel.

6. Migration of bandwidth.

Since single-mode fiber optic are not dependent on the technology used and the data rate can be easily increased speed for a subscriber, without affecting the other. This means, for example that the subscriber is currently used Fast Ethernet technology, in the next year can choose Gigabit Ethernet by its simply switching the fiber-optic subscriber lines to another port on the switch and replace the Ethernet device at the customers home. This change will not affect the work of other subscribers Ethernet FTTH access networks.

7. LLU.

LLU - a property that has Ethernet FTTH architecture. The implementation of the principle of separation of subscriber lines was the main criterion for choice of FTTH in Europe, as they sought to build a network, where the access to the infrastructure of fiber optic access network could have multiple service providers.

8. Safety.

Today fiber line is the most protected area (in the physical layer), especially in comparison with the common transmissions. In addition, Ethernet switches used in service provider areas and they used to ensure the separation of the physical layer ports and logical level of subscribers and have a lot of security features that are able to prevent practically all intrusion attempts.

9. Equipment at the customer home.

10. High optical signal power (per 20.4 dB higher than Ethernet optical interfaces)

11. High speeded

Conclusion

Fiber optic access networks currently based on different architectures and technologies. Standards for these technologies and available of equipment make development of service-provider networks without risks. The success of their work stimulate to the dynamic development of the industry.

Nowadays the PON architecture became very popular. The main factors of the most configurations of Ethernet FTTH it is the flexibility of the business model and the ability to support future services.

The development of fiber-optic communication lines in living areas - a big investment and will bring incomes in the next 30-40 years. Different circuit of FTTH network has advantages, but if we will use a fiber optic infrastructure of FTTH architecture based on the PON, in future we can use less expensive fiber infrastructure. In general, we don't talk about using of FTTH networks, we talk about how quickly it can developing.

Bibliography (transliterated)

1. **Mashkov, V., Barilla, J., Simr, P.** Applying Petri Nets to Modeling of Many-Core Processor Self-Testing when Tests are Performed Randomly. *Journal of Electronic Testing Theory and Applications (JETTA)*, 2013, Volume **29**, Issue 1, P. 25–34.
2. **Hu, Z., Mukhin, V., Kornaga, Y., Barabash, O., Herasymenko, O.** Analytical Assessment of Security Level of Distributed and Scalable Computer Systems. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2016, Vol. **8,** № 12, 57 – 64.
3. **Kravchenko, Yu., Vialkova, V.** The problem of providing functional stability properties of information security systems. *Proceedings of the XIIIth International Conference «Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science» (TCSET'2016)* Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. – P. 526-530.
4. **Mukhin, V., Loutskii, H., Barabash, O., Kornaga, Ya., Steshyn, V.** Models for Analysis and Prognostication of the Indicators of the Distributed Computer Systems' Characteristics. *International Review on Computers and Software (IRECOS)*, 2015, Vol. **10**, N 12, 1216 – 1224. ISSN 1828-6003.
5. **Barabash, O., Lukova-Chuiko, N., Musienko, A., Salanda, I.** Diagnostic Model of Wireless Sensor Network Based on Mutual Inspection of Network Elements / O. Barabash. *Proceedings of 14 International Conference the Experience of Designing and Application of Cad Systems in Microelectronics (CADSM 2017)*, Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine, Lviv: Lviv Polytechnic National University, **303** – 305.
6. **Lukova-Chuiko, N., Toliupa, S.** Choice of Reasonable Variant of Signal and Code Constructions for Multirays Radio Channels. *Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology. - IEEE PIC S&T* , 2015, 269 – 271.
7. **Gorban, N. V., Kapustyan, O. V., Kasyanov, P. O.** Uniform trajectory attractor for non-autonomous reaction–diffusion equations with Caratheodory's nonlinearity. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 2014, Vol. **98,** 13 – 26.
8. **Alexeev, E. B.** Fundamentals of design and technical operation of the digital fiber optic transmission systems. Textbook, IPK MTUCI, LLC "ORGSERVIS-2000", Moscow, 2004.
9. **Fokin, V. G.** Design of the optical access network. Textbook / FGOBU VPO "SibSUTI". - Novosibirsk, 2012. - 320 p.
10. Wikipedia - the free online encyclopedia [Electronic resource]. URL: https: // ru. wikipedia.org/wiki/PON.

Список литературы

1. **Машков, В.** Применение сетей Петри для моделирования процесса самодиагностирования многоядерных процессоров при выполнении тестов в произвольном порядке / **В. Машков, Д. Барила, П. Симр** // *Журнал теории и приложений электронного тестирования (JETTA)*. – 2013. – Том 29. – Вып. 1. – С. 25 – 34.

2. **Ху, З.** Аналитическая оценка уровня безопасности распределенных и масштабируемых компьютерных систем / **З. Ху, В. Мухин, Я. Корнага, О. Барабаш, О. Герасименко** // *Международный журнал интеллектуальных систем и приложений*. – Том 8. – № 12. – Гонконг: MECS Publisher, 2016. – С. 57 – 64.
3. **Кравченко, Ю.** Проблема обеспечения свойства функциональной устойчивости систем информационной безопасности / **Ю. Кравченко, В. Вялкова** // *Материалы XIII Международной конференции «Современные проблемы радиотехники, телекоммуникаций и информатики» (TCSET'2016).* Львов-Славское, Украина, 23-26 февраля 2016 года. – Львов, Национальный университет «Львовская политехника», 2016. – С. 526 – 530.
4. **Барабаш, О.** Модели анализа и прогнозирования показателей характеристик распределенных вычислительных систем / **В. Мухин, Г. Луцкий, О. Барабаш, Я. Корнага, В. Стешин** // *Международный обзор компьютеров и программного обеспечения (IRECOS).* – 2015. – Vol. 10. – № 12. – С. 1216 – 1224.
5. **Барабаш О.** Диагностическая модель беспроводной сенсорной сети на основе взаимного контроля элементов сети / **О. Барабаш, Н. Лукова-Чуйко, А. Мусиенко, И. Саланда** // *Материалы 14-й Международной конференции «Опыт разработки и применения САПР в микроэлектронике» (CADSM 2017)*, Поляна-Свалява (Закарпатье), Украина, Львов: Национальный университет «Львовская политехника», 2017. – С. 303 – 305.
6. **Толюпа С.** Выбор рационального варианта сигнальных и кодовых конструкций для многоканальных радиоканалов / **Н. Лукова-Чуйко, С. Толюпа** // II *Международная научно-практическая конференция «Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технология»*. – *IEEE PIC S&T*, 2015 – С. 269 – 271.
7. **Горбань Н. В.** Равномерный траекторный аттрактор для неавтономных уравнений реакции-диффузии с нелинейностью Каратеодори / **Н. В. Горбань, О. В. Капустян, П. О. Касьянов** // *Нелинейный анализ: теория, методы и приложения*. – Том. 98. 2014. – С. 13 – 26.
8. **Фокин В. Г.** Проектирование оптической сети доступа. Учебное пособие / ФГОБУ ВПО «СибГУТИ». – Новосибирск, 2012. – 320 с.
9. **Алексеев Е. Б.** «Основы проектирования и технической эксплуатации цифровых волоконно-оптических систем передачи». Учебное пособие, ИПК МТУСИ, ООО «Оргсервис-2000», М., 2004.
10. Википедия – свободная интернет-энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/PON.

Сведения об авторах (About authors)

Kravchenko Y. **–** professor of Taras Shevchenko National University of Kiev, Kiev, Ukraine.

Кравченко Юрий Васильевич – доктор технических наук, профессор, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, заведующий кафедрой сетевых и интернет технологий, г. Киев, Украина.

Tolyupa S. – professor of Taras Shevchenko National University of Kiev, Kiev, Ukraine.

Толюпа Сергей Васильевич – доктор технических наук, профессор, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, профессор кафедры кибербезопасности и защиты информации, г. Киев, Украина.

Barabash O. **–** professor of Taras Shevchenko National University of Kiev, Kiev, Ukraine.

Барабаш Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, профессор кафедры сетевых и интернет технологий, г. Киев, Украина,

Trush A. **–** assistant professor of Taras Shevchenko National University of Kiev, Kiev, Ukraine, e-mail: trush-viti@mail.ru

Труш Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, доцент кафедры сетевых и интернет технологий, г. Киев, Украина, e-mail: trush-viti@mail.ru

Leshchenko O. - assistant professor of Taras Shevchenko National University of Kiev, Kiev, Ukraine

Лещенко Ольга Александровна – кандидат технических наук, доцент, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, доцент кафедры сетевых и интернет технологий, г. Киев, Украина.

Please cite this article as:

Kravchenko, Y., Tolyupa, S., Barabash, O., Trush, A., Leshchenko, O. Topology of optical networks FTTH (FIBER-TO-THE-HOME). *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 150–155, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.21.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Кравченко, Ю. В. Топология оптических сетей FTTH (FIBER-TO-THE-HOME) / **Ю. В. Кравченко, С. В. Толюпа, О. В. Барабаш, А. В. Труш, О. А. Лещенко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 150-155. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.21.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Кравченко, Ю. В. Топологія оптичних мереж FTTH (FIBER-TO-THE-HOME) / **Ю. В. Кравченко, С. В. Толюпа, О. В. Барабаш, О. В. Труш, О. О. Лещенко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 150-155. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.21.

АНОТАЦІЯ *В даний час архітектури на базі PON набули великого поширення. Основними факторами більшості конфігурацій Ethernet FTTH є гнучкість бізнес-моделі і здатність підтримувати майбутні сервіси. У цій статті описуються різні архітектури мереж доступу, розглядаються протоколи доступу, а також аналізуються характеристики оптичних мереж FTTH (Fiber to the Home). Успішність їх діяльності є стимулом до динамічного розвитку цієї галузі.*

Ключові слова: *топологія; PON; Ethernet FTTH; оптичні мережі; архітектура мережі*

Поступила (received) 08.05.2016

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

УДК 681.325 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.22

ЗАСТОСУВАННЯ ІНСТРУМЕНТАРІЮ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

В. В. ПУТРЕНКО[1], Н. М. ПАШИНСЬКА[2]

[1]ННК «Інститут прикладного системного аналізу»КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, УКРАЇНА
[2]кафедра інтелектуальних та інформаційних систем,Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, УКРАЇНА
e-mail: putrenko@wdc.org.ua, n_pashynska@ukr.net

АНОТАЦІЯ *Розглянуто методологічні підходи до використання індексних показників стану вегетації на основі даних дистанційного зондування програми Copernicus в якості підґрунтя для формування індексу пожежної небезпеки на територію України. Розроблено модель обробки даних глобальних земельних сервісів Copernicus з метою отримання значень індексу пожежної небезпеки. Отримані результати моделювання було верифіковано за допомогою даних про природні пожежі з використанням методів розрахунку географічно-зваженої регресії та кореляції між геопростовими даними.*
Ключові слова: *фактори пожежної небезпеки; дистанційне зондування Землі; програма Copernicus; геоінформаційна модель; стандартна відстань; просторова регресія*

APPLYING TOOLS OF GEOINFORMATION MODELING FOR FIRE HAZARD DATA MINING

V. PUTRENKO[1], N. PASHYNSKA[2]

[1]ESC «Institute for Applied System Analysis», Igor Sikorsky KPI, Kyiv, UKRAINE
[2]Department of intellectual and information systems, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT *The methodological approaches to the use of index indicators of vegetation based on Copernicus program remote sensing data as a basis for forming anfire hazard index on the territory of Ukraine were considered. The purpose of this study is to develop indicative model based on the basic vegetation parameters of Copernicus program and its verification using available data about the monitoring of natural fires. As input parameters were chosen Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which is an indicator of the greenness of the biomes;Dry Matter Productivity (DMP), represents the overall growth rate or dry biomass increase of the vegetation, expressed in kilograms of dry matter per hectare per day; the Soil Water Index quantifies the moisture condition at various depths in the soil. Based on methods of combining data of different nature and mechanisms of normalization of geospatial data was obtained integral fire hazard index. The model of data processing of global land services Copernicus was developed for obtain fire hazard index values, which is implemented in the environment of ArcGIS 10.3. The results were verified by simulation using data on natural fires product Burnt Area using calculation methods geographically weighted regression and correlation of geospatial data. This was found closeness link between raster model fire hazard index and raster model of the density distribution of fires that have already appeared, which was calculated using optimization methods by establishing a standard distance. The close link between high values of the fire hazardindex and high density of recorded fires was established. In the area of low values of indicators tightness of links is significantly reduced. This suggests the possibility of using ranges of high values of the fire hazard index for predicting natural fires with high probability and extends the scope of products processing usingof program Copernicus.*
Keywords*: fire hazard factors; remote sensing; program Copernicus; GIS model; standard distance; spatial regression*

Вступ

Сучасні космічні системи розвиваються швидкими темпами у напрямі удосконалення знімального обладнання, зростання його роздільної здатності, урізноманітнення знімальних технологій, розширення спектральних можливостей, часового та просторового охоплення території. Перелічені передумови стали основою бурхливого розвитку систем та інструментів моніторингу навколишнього середовища, в тому числі систем спостереження за станом сільськогосподарських угідь. Нині в цьому сегменті працює багато приватних та державних компаній у всьому світі. Основними напрямами розвитку цього сектору економіки є постійне покращення якості вхідних даних та розширення спектру доступних даних, в тому числі відкритих даних. Найбільшими постачальниками даних ДЗЗ у вільному доступі є геологічна служба США та Європейське космічне агентство, яке за останні роки значно зміцнило групування космічних супутників ДЗЗ та розгорнуло програму Copernicus, в межах якої надаються безкоштовні дані космічної зйомки та похідні тематичні продукти, які можуть використовуватися під час аналізу стану рослинного покриву, кліматичних змін та забезпеченості водними ресурсами.

© В. В. ПУТРЕНКО, Н. М. ПАШИНСЬКА, 2017

Copernicus є європейською системою для моніторингу Землі. Дані збираються з різних джерел, включаючи супутники спостереження Землі та датчики на місці. Дані обробляються і забезпечують достовірну та актуальну інформацію у шести тематичних областях: земний покрив, морські акваторії, атмосфера, зміна клімату, управління у надзвичайних ситуаціях та безпека.

Глобальний сервіс земного покриття є складовою частиною сервісу земного покриву Copernicus, який забезпечує ряд біогеофізичних продуктів про стан і еволюцію земної поверхні в глобальному масштабі із середнім та низьким просторовим розрізненням. Продукція використовується для моніторингу рослинності, водного циклу і енергетичного балансу.

В зв`язку з цим постає актуальне питання використання тематичних продуктів програми Copernicus для вивчення динаміки регіональних кліматичних змін та природних загроз на основі вивчення динамічної та структурної складової оцінок стану рослинного покриву для території України. Ці продукти отримуються на основі використання супутникових даних системи Proba-V.

Одним із напрямів, який підтримується системою, є накопичення даних про постраждалі в наслідок пожеж території. Продукт BurntArea містить дані про спалені протягом сезону земельні площі. Продукт дозволяє отримати як інтегровані відомості на певний період часу про площі пожеж, так і визначити появу нових пожеж за проміжок часу між зйомками. У 2015 році порівняно із 2014 роком, кількість пожеж в природних екосистемах збільшилась у 2,2 рази [1]. У цілому в Україні в середньому на рік фіксується близько 3,5 тис. лісових пожеж, які знищують більше 5 тис. гектарів лісу. Окрім лісових, серед природних пожеж виділяють торфові, степові та пожежі на сільськогосподарських угіддях. Вони мають різний характер у залежності від умов виникнення пожежі, рослинного та ґрунтового покриву. До основних груп природних факторів відносять рельєф, рослинний покрив та кліматичні ресурси, які разом визначають особливості ландшафтної структури та за певної вірогідності можуть сприяти виникненню пожеж. Тому необхідним етапом оцінки небезпек є вибір постійних та змінних факторів, які впливають на можливість виникнення пожеж.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

В останні роки зростає використання методів інтелектуального аналізу для дослідження та прогнозування природних пожеж. Активний розвиток технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та накопичення отриманих геопросторових даних зумовили збільшення кількості робіт, у яких досліджуються проблеми моніторингу природних пожеж засобами дистанційного моніторингу [2]. Проте, автори зазначеної роботи основну увагу зосередили лише на технічних особливостях інструменту MODIS. Загальні підходи до використання геоінформаційних технологій для оцінки небезпек пожеж та їх картографування розглянуто в [3]. Разом з тим, в цій роботі недостатньо представлені аналітичні можливості геоінформаційного інструментарію для моніторингу та прогнозування пожеж. Автори роботи [4] пропонують використання нейромережевих алгоритмів у прогнозуванні лісових пожеж. Прогнозна інформація цього дослідження переважно базується на метеорологічних параметрах, без урахування інших факторів. Аналіз динаміки природних пожеж протягом декількох століть з використанням шести змінних показників викладено в роботі [5], проте акцент зроблено на характеристиках рельєфу. Методи просторового аналізу для дослідження та картографування зон пожежної небезпеки території використано авторами роботи [6]. Основну увагу приділено зональним факторам (рослинність, ґрунтовий покрив, підстилаюча поверхня) та не враховані кліматичні чинники. Статистичному оцінюванню ризиків природних стихійних лих, у тому числі пожеж, присвячено роботу [7]. У ній переважно розглянуті закономірності розподілу, виникнення та наслідки природних пожеж. Просторово-часові особливості пожеж досліджено авторами роботи [8]. Розроблено алгоритм просторово-часового прогнозування з використанням різних методів інтелектуального аналізу даних з основним акцентом на методиці дослідження. Використанню методів багатомірної регресії даних та штучних нейронних мереж для прогнозування природних пожеж присвячено роботу [9], яка базується лише на метеорологічних даних. Проблема застосування інтелектуального аналізу геопросторових даних для класифікації факторів виникнення пожеж розглянута у роботі [10]. Проте, проведена класифікація лише постійних факторів, але не враховано змінні (динамічні) фактори. Методи штучного інтелекту задіяні при аналізі пожеж у роботі [11]. Автори статті розробили методику для дослідження територій, що зазнали природних пожеж, однак не розглядають чинників їх виникнення. Еволюційна технологія для визначення часу і шляху поширення пожежі, що базується на продукційних правилах, визначених експертним шляхом запропонована авторами роботи [12]. У моделюванні шляху та часу поширення пожежі не враховані параметри джерел виникнення пожеж та їх наслідки.

Таким чином, незважаючи на значний масив робіт з використання методів інтелектуального аналізу для дослідження та прогнозування природних пожеж, потребують уточнення загальноприйняті алгоритми оцінки небезпек в залежності від природних умов території.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Мета та завдання дослідження

Метою даного дослідження є розробка індикативної моделі на основі базових індексів стану рослинності програми Copernicusta її верифікація з використанням наявних даних щодо моніторингу природних згарищ.

Завданнями дослідження є визначення основних індексів вегетації, які мають зв'язок з пожежною небезпекою, розробка моделі сумісного використання індексних даних різної природи, розробка методів та верифікація моделі на прикладі існуючої бази даних про пожежі.

Виклад основного матеріалу

Спалені області розглядаються як основна змінна у моніторингу кліматичних змін. Вона може бути об'єднана з інформацією про наявне використання палива та ефективність горіння (або витрат палива) для оцінки емісії викидів газів і аерозолів. Спалена поверхня може також включати в себе спалювання поверхневих та підземних органічних матеріалів, таких як торф. Вимірювання спалених площ можуть бути використані в якості вхідних даних для прямого застосування у моделюванні клімату і вуглецевого циклу, або, коли довгі часові ряди даних, для параметризації кліматичних моделей для передбачення спалених областей. Пожежоіндуковані викиди є значним земним джерелом парникових газів, з великою просторовою і часовою мінливістю.

Інформаційний продукт Burnt Area складається з декількох файлів:

Contaminated Pixel dekad composite (CP_DEKAD) – файл показує число спостережень, які не використовувались для виявлення згарищ протягом поточної декади. Таким чином, чим нижче значення, тим більше спостережень використовувалось для виявлення спалених поверхонь.

Burned Area dekad composite (BA_DEKAD) – файл вказує на те, що піксель був виявлений як спалений (значення 1) принаймні один раз в декаді. Значення 0 не обов'язково означає, що піксель був розпізнаний як не спалений.

First Day of Burn in the dekad (FDOB_DEKAD) –файл вказує перший день спаленої поверхні в даній декаді.

First Day of Burn just after Season Reset (FDOB_SEASON) – файл вказує перший день спаленої поверхні протягом однієї або більшої кількості декад сезону [13].

Серед продуктів Copernicus, що можуть характеризувати пожежну небезпеку слід також виділити оцінку індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), яка з одного боку може служити індикатором стану рослинного покриву, а з іншого вказувати на наявність сухої органіки, що придатна до горіння. Крім індексу NDVI важливим індексом, що характеризує пожежний стан рослинності є індекс DMP, який вказує на темпи зростання сухої речовини. Також важливим є індекс ґрунтових вод, що вказує на стан вологості ґрунту. Цей індекс вказує на настання посухи та підвищення пожежної небезпеки. Таким чином, використовуються одразу кілька показників, що характеризують стан рослинного покриву, в тому числі пожежну небезпеку.

Сумісний аналіз цих даних може бути корисним при знаходженні інтегральних показників, що відображають потенційну пожежну небезпеку території. З цією метою використовуються ряд операцій ГІС-аналізу, які відносяться до модулю Spatial Analyst Arc GIS. Зокрема функції перекласифікації та растрової алгебри.

NDVI - нормалізований відносний індекс рослинності - простий кількісний показник кількості фотосинтетично активної біомаси (зазвичай має назву вегетаційний індекс). Один з найпоширеніших і використовуваних індексів для вирішення завдань, що застосовують кількісні оцінки рослинного покриву.

Обчислюється за такою формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

де, NIR - відображення в ближній інфрачервоній області спектра; RED - відображення в червоній області спектра

Відповідно до цієї формули, щільність рослинності (NDVI) в певній точці зображення дорівнює різниці інтенсивностей відбитого світла в червоному і інфрачервоному діапазоні, поділеній на суму їх інтенсивностей. Відповідно до цього щільність рослинності (NDVI) в певній точці зображення дорівнює різниці інтенсивності відбитого світла в червоному і інфрачервоному діапазоні, поділеній на суму їх інтенсивності.

Низькі значення NDVI вказують на поганий стан рослинного покриву, що може бути викликано посухою і відповідно призвести до підвищеної пожежної небезпеки. В даному випадку важливо зберігати відповідний масштаб та роздільну здатність даних, які повинні бути більш узагальненими ніж у випадку звичайного сільськогосподарського моніторингу.

DMP, або продуктивність сухої речовини, представляє загальний темп зростання або сухе збільшення біомаси рослинності, виражене в кілограмах сухої речовини на гектар в день (кг СР/ га / день). DMP безпосередньо пов'язана з NPP (чистою первинною продуктивністю), але її одиниці налаштовані для агростатистичних цілей. В даному випадку високі значення DMP можуть сприяти пожежній небезпеці території.

SWI - індекс ґрунтових вод, який оцінює стан вологи на різних глибинах в ґрунті. Він в основному обумовлений осадженням за допомогою процесу

інфільтрації. Вологість ґрунту є дуже неоднорідною змінною і змінюється на малих масштабах з властивостями ґрунту і зразків дренажу [14]. Супутникові вимірювання інтегруються за відносно великомасштабними областями з наявністю рослинності, що додає складності в інтерпретації. Високі значення індексу знижують пожежну небезпеку, а низькі вказують на ризик підвищення небезпеки природних пожеж.

Всі параметри природних комплексів знімаються з часовим розрізненням 1 раз на 10 днів, тому прогноз пожежної небезпеки повинен перераховуватися також 1 раз на 10 днів.

Загальний процес геоінформаційної обробки даних включає завантаження відповідних індексів з порталу, маскування території з використанням кордону України, нормалізацію значень в діапазоні від 1 до 10 для кожного показнику шляхом перекласифікації, растрове складання отриманих показників. Отримані результати тестуються за допомогою навчальної вибірки пожеж, що вже відбулися (рис. 1).

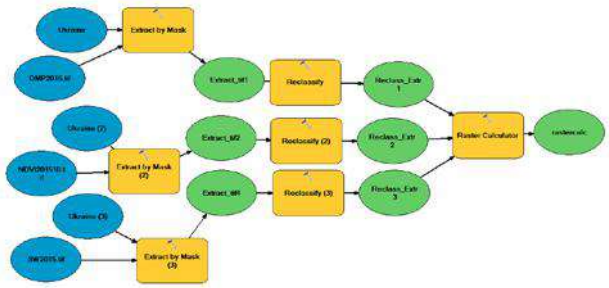


Рис. 1 –Модель обробки тематичних растрів в середовищі Arc GIS

Для тестування моделі були обрані дані на територію України за період першої декади вересня 2015 року. Також були підібрані відповідні дані за індексами NDVI, DMP та SWI. Згідно схеми моделі на рис. 1. спочатку дані були масковані за допомогою полігону території України. Це допомагає обмежити зону аналізу та зменшити час обробки даних.

Модель описується переліком перемінних F{R1, R2, R3}, де в якості перемінних R1 – R3 використовуються значення індексів.

Інтегральний індекс:

$$F = \sum_{n}^{1} Rx \qquad (2)$$

де Rx – індексна нормалізована перемінна в діапазоні R∈ [1- 10].

Тоді для растрової алгебри розрахунок інтегрального індексу буде:

$$F = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{21} \\ R_{1n} & R_{2n} \end{pmatrix}$$

На другому кроці виконання моделі відбувається перекласифікація даних до єдиної розмірності, що дає можливість для оперування в подальшому вже нормалізованими значеннями, які можуть бути сумісно оброблені в межах побудови ієрархічних індексів (рис. 2-5).

На третьому кроці виконання моделі відбувається сумування растрових матриць перекласифікованих значень з метою отримання інтегрального значення.

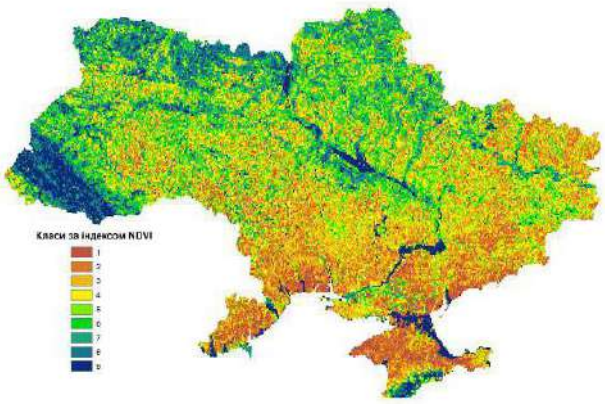


Рис. 2 – Рекласифікація даних індексу NDVIза 9 класами

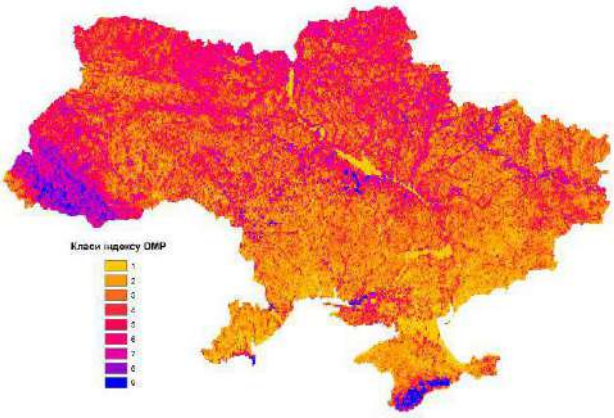


Рис. 3 – Рекласифікація даних індексу DMP за 9 класами

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

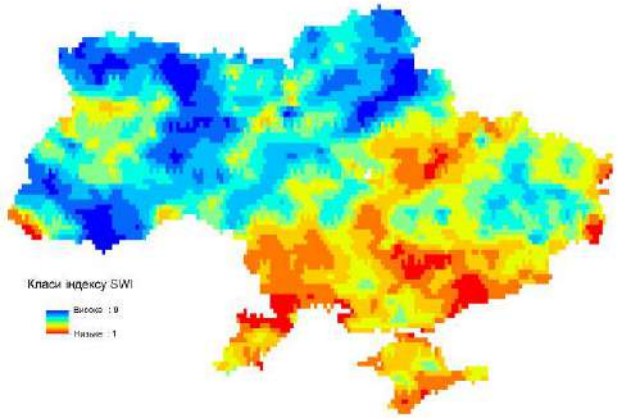


Рис. 4 – Рекласифікація даних індексу SWIза 9 класами

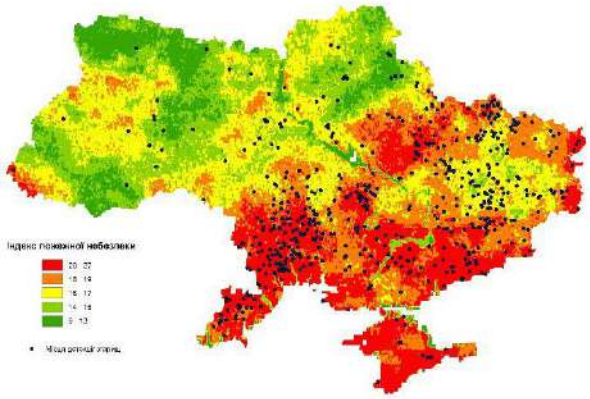


Рис. 5 – Інтегральний індекс пожежної небезпеки у порівнянні з розподілом місць згарищ

З метою перевірки отриманих значень використовується база даних *Burnt Area* з даними про пожежі протягом даної декади. Оскільки дані надаються у растровій формі та мають дискретні значення $N \in [0,1]$, в цьому випадку необхідно спробувати співставити дані візуального аналізу з даними математичної залежності між місцями пожеж та місцями з високими значення ризику сезонного виникнення пожеж. Для цього пропонується перейти від дискретних значень до безперервних шляхом визначення щільності точок детекції точок згорілих площ. Для цього спочатку растрові значення з підтвердженням згорілих площ трансформуються у векторний точковий шар із центрами в центрі комірок. Потім з використанням щільності Кернела будується шар безперервного розподілу щільності згарищ. Таким чином, ми можемо встановити зв'язок між просторовими растровими даними, які представлені поверхнею розподілу інтегрального індексу вірогідності настання природної пожежі та поверхнею щільності розподілу випадків пожеж.

Для визначення радіусу (SR) пошуку за замовчуванням використовується формула:

$$SR = 0{,}9 * \min\left(SD, \sqrt{\frac{1}{\ln(2)}} * D_m\right) \quad (3)$$

де SD – стандартна відстань, D_m – медіанна відстань, n – кількість точок.

Стандартна відстань задається формулою:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{X})^2}{n} + \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{Y})^2}{n}} \quad (4)$$

де x_i та y_i – координати об'єкту i, $\{\bar{X}, \bar{Y}\}$ представляють усереднений центр для об'єктів та n – загальна кількість об'єктів.

Зважена стандартна відстань розраховується як:

$$SD_\omega = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\omega_i(x_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^{n}\omega_i} + \frac{\sum_{i=1}^{n}\omega_i(y_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^{n}\omega_i}} \quad (5)$$

де ω_i - вага об'єкту i та $\{\bar{X}_\omega, \bar{Y}_\omega\}$ представляє зважений усереднений центр

Оскільки точки згарищ не мають додаткової ваги, яка може бути врахована у формулі, то в цьому випадку використовується формула звичайної стандартної відстані (рис. 6).

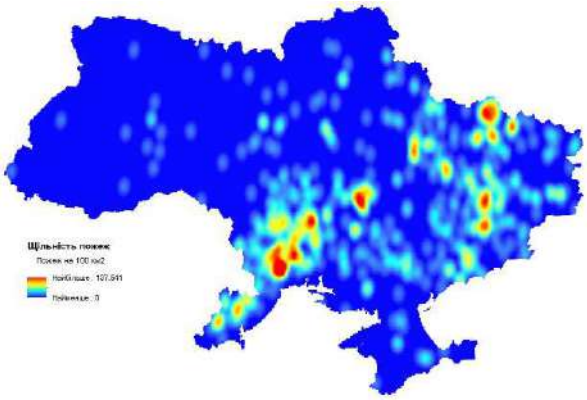


Рис. 6 – Розподіл щільності місць згарищ на дату 10.09.2015

Для встановлення зв'язку використовуються показники просторової кореляції та просторової регресії.

Географічна зважена локальна регресія визначається як:

$$u_i(x_k, y_k) = \beta_{0i}(x_k, y_k) + \beta_{1i}(x_k, y_k) * v_{1i} + \beta_{2i}(x_k, y_k) * v_{2i} + \ldots + \beta_{pi}(x_k, y_k) * v_{pi} + \varepsilon_i \quad (6)$$

для спостереження i, де $u_i(x_k, y_k)$ - залежна змінна, що оцінюється в місці i; v_{pi} - пояснююча перемінна;

$\beta_p(x_k, y_k)$ - локальні коефіцієнти регресії; p кількість перемінних, та ε_i залишок оцінений в місці розташування i. Кожне локальне регресійне $u_i(x_k, y_k)$ рівняння вирішується із різними вагами спостережень, що базуються на функції розпаду з відстанню, що центрована на спостереженніi.

Географічно зважений локальний коефіцієнт кореляції Пірсона дозволяє встановити тісноту зв'язку між просторово розподіленими даними. Для цього він розраховується для кожної пари значень двох явищ у місцях їх розміщення за формулою:

$$r_i(x_k, y_k) = \frac{\sum_{j=1}^{n} \varpi_j * (u_j - \bar{u}) * (v_j - \bar{v})}{(n-1) * S_u * S_v} = \beta_1(x_k, y_k) \frac{S_u}{S_v} \quad (7)$$

де $r_i(x_{ki}, y_k)$ - це коефіцієнт кореляції, (x_k, y_k) - це місце спостереження i; u_i та v_i - це окремі спостереження; $\bar{u}$ та $\bar{v}$ - це середні значення двох перемінних, ϖ_j це вага, яку має кожний вимір в залежності від функції розпаду з відстанню, що центрована на спостереження i; n – це розмір вибірки; S_u та S_v стандартні відхилення двох перемінних; $\beta_1(x_k, y_k)$ - розрахунковий параметр для двовимірної місцевої регресії спостереження i.

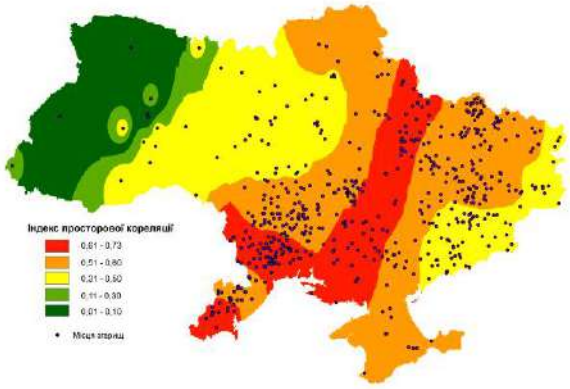


Рис. 7 – Розподіл значень локальної кореляції між значеннями індексу пожежної небезпеки та щільністю згарищ

Для використання методу географічно зваженої регресії та кореляції використовуються перетворення атрибутивних даних з тематичних растрів пожежної небезпеки та щільності розподілу згарищ до точкового векторного шару, що містить атрибутивні ознаки кожного растрового шару. Організація даних у такій моделі дозволяє застосувати алгоритми географічно-зваженої кореляції на мові Python.

В результаті обрахунку локальної кореляції було встановлено співпадіння значних показників кореляції з місцями високої щільності виникнення природних пожеж (рис. 7). Максимальні значення кореляції досягають значень 0,73 та мають субмеридіанальну спрямованість. На схід та захід від зони найбільшої кореляції зв'язок між даними зменшується. Центральна та східна частина країни мають суттєві значення кореляції більше ніж 0,5. Це свідчить про наявність достатньо тісного зв'язку між розрахунком індексу небезпеки та щільністю пожеж, що підтверджує можливість використання індексу на практиці. В західній та північній частині країни цей зв'язок значно знижується за рахунок значної флуктуації значень щільності та індексу пожежної небезпеки.

Висновки

Європейська програма космічного моніторингу Землі Copernicusє джерелом цінної інформації про стан природних комплексів, що може бути використано у аграрній сфері, попереджені надзвичайних ситуацій та природоохоронному моніторингу. Сучасний геоінформаційний інструментарій дозволяє швидко отримувати дані з порталу та обробляти їх на основі визначених алгоритмів. Прогнозування пожежних небезпек в короткочасові періоди спирається на збір та обробку комплексних даних, які отримуються в складі програми, що дозволяє здійснювати превентивні заходи запобігання поширенню природних пожеж та матеріальних збитків. Запропоновано використання індексу пожежної небезпеки, який спирається на індикатори стану земного покриву, що збираються в рамках програми Copernicus. За результатами верифікації індексу встановлено значні значення просторової кореляції між показниками індексу та концентрацією місць пожеж, що вказує на можливість використання індексу для передбачення пожежної ситуації. В областях низьких значень тіснота зв'язку значно зменшується між цими показниками. Це свідчить про можливість використання діапазону високих значень індексу для передбачення природних пожеж з високою вірогідністю та розширює рамки застосування продуктів обробки.

Подальші дослідження будуть спрямовані на пошук оптимізаційних критеріїв моделі для підвищення вірогідності прогнозу.

Список літератури

1. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2015 рік [Електронний ресурс] / УкрНДІЦЗ. - Режим доступу: http://undicz.dsns.gov.ua/ ua/Analitichniy-oglyad-stanu-tehnogennoyi-ta-prirodnoyi-bezpeki-v-Ukrayini.html.
2. **Hawbaker, T.** Detection rates of the MODIS active fire product in the United States [Текст] / **T. Hawbaker, V. Radeloff, A. Syphard, Z. Zhu, S.**

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Stewart // *Remote Sensing of Environment*. – 2008. – Vol. 112. – P. 2656–2664. – doi: 10.1016/j.rse.2007.12.008.
3. Atlas of natural hazards & risks of Georgia [Електронний ресурс] / Caucasus Environmental NGO Network. – Режим доступу : http://drm.cenn.org/index .php/en/.
4. **Ясинский, Ф. Н.** Прогнозирование вероятности возникновения лесных пожаров с помощью нейросетевого алгоритма на многопроцессорной вычислительной технике [Текст] / **Ф. Н. Ясинский, О. В. Потёмкина, С. Г. Сидоров, А. В. Евсеева** // *Вестник ИГЭУ*. – 2011. – Вып. 2. – С. 1-4.
5. **Oneal, C.** Geographic analysis of natural fire rotation in the California redwood forest during the suppression era [Текст] / **C. Oneal, J. Stuart, S. Steinberg** // *Fire Ecology*. – 2006. – Vol. 2, Iss. 1. – P. 73-99. – doi: 10.4996/fireecology.0201073.
6. **Jovanović, R.** Spatial analysis and mapping of fire risk zones and vulnerability assessment – case study mt .Stara Planina [Текст] / **R. Jovanović, Ž. Bjeljac, O. Miljković, A. Terzić** // *Prevention and Education in Natural Disasters*. – Режим доступу: http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0350-599/2013/0350-75991303213J.pdf. – doi: 10.2298/ ijgi1303213j.
7. **Guo, H.** Understanding global natural disasters and the role of earth observation [Текст] / **H. Guo** // *International Journal of Digital earth*. – 2010. – Vol. 3, No 3. – P. 221-230. – doi: 10.1080/ 17538947.2010.499662.
8. **Cheng, T.** Applications of spatio-temporal data mining and knowledge for forest fire [Текст] / **T. Cheng, J. Wang** // *In. Proceedings of the ISPRS Technical Commission VII Mid Term Symposium, Enschede*, The Netherlands. – 2006. – P. 148-153.
9. **Cortez, P. A** Data Mining Approach to Predict Forest Fires using Meteorological Data [Текст] / **P. Cortez, A. Morais** // *New trends in artificial intelligence: proceedings of the 13th Portuguese Conference on Artificial Intelligenc*e (EPIA 2007). - Lisboa: APPIA. – 2007. – P. 512-523.
10. **Pashynska, N.** A decision tree in a classification of fire hazard factors [Текст] / **N. Pashynska, V. Snytyuk, V. Putrenko, A. Musienko** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 5. - No 10 (83). – P. 32-37. – doi:10.15587/1729-4061.2016.79868.
11. **Özbayoğlu, A.** Estimation of the Burned Area in Forest Fires Using Computational Intelligence Techniques [Текст] / **A. Özbayoğlu** // *Complex Adaptive Systems*. – 2012. – Vol. 12. – P. 282-287. – doi: 10.1016/j.procs.2012.09.070.
12. **Снитюк, В. Е.** Эволюционное моделирование процесса распространения пожара [Текст] / **В. Е. Снитюк, А. А. Быченко** // *Proc. XIII-th Int. Conf. Knowledge – dialogue – Solution - Varna*, 2007/6. – 247-254.
13. Copernicus Global Land Service [Електронний ресурс] – Режим доступу : http://land.copernicus.eu/ global/ products/dmp.
14. **Putrenko, V.** Wildfire prediction and monitoring in Ukraine on base of Copernicus Land service [Текст] / **V. Putrenko, N. Pashynska** // *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки*. – 2016. – С. 41-43.

Bibliography (transliterated)

1. Analitychnyi ohliad stanu tekhnohennoi ta pryrodnoi bezpeky v Ukraini za 2015 rik (2015). UkrNDITsZ. Available at: http://undicz.dsns.gov.ua/ua/Analitichniy-oglyad-stanu-tehnogennoyi-ta-prirodnoyi-bezpeki-v-Ukrayini.html.
2. **Hawbaker, T. Radeloff, V., Syphard, A., Zhu, Z., Stewart S.** Detection rates of the MODIS active fire product in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**, 2656–2664. doi: 10.1016/j.rse.2007.12.008.
3. Atlas of natural hazards & risks of Georgia (2013). Caucasus Environmental NGO Network. Available at: http://drm.cenn.org/index.php/en/.
4. **Yasynskyy, F.N., Potëmkyna, O.V., Sydorov, S.H., Evseeva, A.V.** Prohnozyrovanye veroyatnosty voznyknovenyya lesnykh pozharov s pomoshch'yu neyrosetevoho alhorytma na mnohoprotsessornoy vichyslytel'noy tekhnyke. *Vestnyk YHЭU*, 2011, Vol. **2**, 1- 4.
5. **Oneal, C. Stuart, J., Steinberg S.** Geographic analysis of natural fire rotation in the California redwood forest during the suppression era. *Fire Ecology*, 2006, Vol. **2**, 1, 73 - 99. doi: 10.4996/fireecology.0201073.
6. **Jovanović, R. Bjeljac, Ž., Miljković, O., Terzić, A.** (2013) Spatial analysis and mapping of fire risk zones and vulnerability assessment – case study mt. Stara Planina. *Prevention and Education in Natural Disasters*. Available at: http://www.doiserbia. nb.rs/img/doi/0350-7599/2013/0350-75991303213J.pdf. doi: 10.2298/ ijgi1303213j.
7. **Guo, H.** Understanding global natural disasters and the role of earth observation. *International Journal of Digital earth*, 2010, **3**, 3, 221-230. doi: 10.1080/ 17538947.2010.499662.
8. **Cheng, T., Wang, J.** Applications of spatio-temporal data mining and knowledge for forest fire. *In. Proceedings of the ISPRS Technical Commission VII Mid Term Symposium, Enschede*, The Netherlands, 2006, 148-153.
9. **Cortez, P. Morais, A.** Data Mining Approach to Predict Forest Fires using Meteorological Data. *New trends in artificial intelligence: proceedings of the 13th Portuguese Conference on Artificial Intelligence* (EPIA 2007), 2007, 512-523.
10. **Pashynska, N.,Snytyuk,V., Putrenko,V., Musienko,A.** A decision tree in a classification of fire hazard factors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. **5**, 10 (83), 32-37. doi:10.15587/1729-4061.2016.79868
11. **Özbayoğlu, A.** Estimation of the Burned Area in Forest Fires Using Computational Intelligence Techniques. *Complex Adaptive Systems*, 2012, Vol. **12**, 282-287. doi: 10.1016/j.procs.2012.09.070.
12. **Snitjuk, V. E., Bychenko, A. A.** Jevoljucionnoe modelirovanie processa rasprostranenija pozhara, *Proc. XIII-th Int. Conf. Knowledge-dialogue-Solution, Varna*, 2007, 6, 247-254.
13. Copernicus Global Land Service, 2016. Available at: http://land.copernicus.eu/global/products/dmp.
14. **Putrenko, V.,Pashynska, N.** Wildfire prediction and monitoring in Ukraine on base of Copernicus Land service. *Aerokosmichni sposterezhenja v interesah staloho rozvutku ta bespeky*, Kyiv, 2016, 41-43.

Відомості про авторів (About authors)

Путренко Віктор Валентинович - кандидат географічних наук, старший науковий співробітник, Навчально-науковий комплекс «Інститут прикладного системного аналізу», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», докторант, м. Київ, Україна; e-mail: putrenko@wdc.org.ua.

Viktor Putrenko – PhD, Senior Researcher, Education and scientific complex "Institute for Applied System Analysis", National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", postdoc student, Kyiv, Ukraine; e-mail: putrenko@wdc.org.ua.

Пашинська Наталія Миколаївна – кандидат географічних наук, старший науковий співробітник, кафедра інтелектуальних та інформаційних систем, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна; e-mail: n_pashynska@ukr.net.

Nataliia Pashynska – PhD, Senior Researcher, Department of intellectual and information systems, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine; e-mail: n_pashynska@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Путренко, В. В. Застосування інструментарію геоінформаційного моделювання для інтелектуального аналізу даних пожежної небезпеки / **В. В. Путренко, Н. М. Пашинська** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – 7 (1229). – С. 156-163. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.22.

Please cite this article as:

Putrenko, V., Pashynska, N. Applying tools of geoinformation modeling for fire hazard data mining. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 156-163, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.22.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Путренко В. В. Использование инструментария геоинформационного моделирования для интеллектуального анализа данных пожарной опасности / **В. В. Путренко, Н. Н. Пашинская** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 156-163. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.22.

АННОТАЦИЯ *Рассмотрены методологические подходы к использованию индексных показателей состояния вегетации на основе данных дистанционного зондирования программы Copernicus в качестве основы для формирования индекса пожарной опасности на территории Украины. Разработана модель обработки данных глобальных земельных сервисов Copernicus с целью получения значений индекса пожарной опасности. Полученные результаты моделирования были верифицированы с помощью данных о природных пожарах с использованием методов расчета географически взвешенной регрессии и корреляции между геопространственными данными.*

Ключевые слова: *факторы пожарной опасности; дистанционное зондирование Земли; программа Copernicus; геоинформационная модель; стандартное расстояние; пространственная регрессия*

Надійшла(received) 10.03.2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

УДК 681.883:656:551 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.23

ВПЛИВ АНОМАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ НА ГІДРОАКУСТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

І.І. ГЛАДКИХ[1], Б.Б. КАПОЧКІН[2], Н.В. КУЧЕРЕНКО[2]*, М.Б. КАПОЧКІНА[2]

[1]ОНМА, м. Одеса, УКРАЇНА
[2]Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», м. Одеса, Україна
**e-mail: tsb1@ukr.net*

АНОТАЦІЯ *Виконані дослідження впливу аномальних властивостей морської води на особливості поширення звуку в ній і, навпаки, акустичних хвиль різного частотного діапазону - на фізичні властивості води, що формують феномен наддалекого поширення звуку.*
Ключові слова: *аномальні властивості води; структура води; гідроакустика; підводний звуковий канал; позитивний зворотний зв'язок*

ANOMALOUS PROPERTIES OF WATER AND THEIR INFLUENCE ON HYDROACOUSTIC TECHNOLOGIES

I. GLADKYKH[1], B. KAPOCHKIN[2], N. KUCHERENKO[2]*, M. KAPOCHKINA[2]

[1]ONMA, Odessa, UKRAINE
[2]Research Center of the Armed Forces of Ukraine " State Oceanarium ", Odessa, UKRAINE

ABSTRACT *Was investigate the effect anomalous properties of seawater on the characteristics of sound in it. And conversely, acoustic waves of different frequency range -on the physical properties of water that forming, Very long phenomenon of sound in the ocean. Sonar technology used for navigation and for other tasks that require an understanding of the physical principles underlying the phenomena forming the main underwater sound channel and very long propagation in the marine environment. This was considered possible cause some anomalous properties of water, conducted a critical analysis of the characteristics of the marine environment, which affect the transfer of sound energy in it. It is shown that the temperature, salinity and pressure used in the calculation of the speed of sound in water by known formulas affect not directly but indirectly, through the formation of certain structures in the aquatic environment (mono-, nano- and supramolecular), which define those " abnormal "features of sound that recorded experimentally. Negative anomaly absorption of sound energy at low frequencies can be created on condition synchronization in space and time effects of changes in the structure of water while passing acoustic wave with the properties of the phenomenon itself (sound). The theory of Very long sound distribution should also take into account the effect of resonance, as a mechanism to reinforce a sound signal by coherent vibration process in the marine environment. At first sight, this may be due to coincidence acoustic wave periods and the period of natural oscillations compressibility of sea water.*
Keywords*: anomalous properties of water; water structure; hydroacoustic; underwater sound channel positive feedback*

Вступ

Існуючі локаційні системи за фізичним принципом дії діляться на радіолокаційні та лазерні, тобто ті, що використовують електромагнітні хвилі і, наприклад, гідролокаційні, що використовують механічні хвилі. Якщо швидкість електромагнітних хвиль незмінна, то швидкість звуку в морській воді є змінною величиною, що створює проблему визначення дистанції методами гідролокації. У разі застосування радіолокації, фіксуючи кутові характеристики відбитого сигналу та затримку в часі, вдається надійно визначати місце розташування відбивача (цілі). Методи лазерної локації дозволяють отримувати 3D цифрові моделі сканованих об'єктів, що в принципі недосяжно при використанні акустичних технологій. Для механічних хвиль зміна фазової швидкості призводить до зміни усіх характеристик хвилі, за винятком частоти. Зміна фазової швидкості механічних хвиль в реальному об'ємі океану призводить до викривлення фронту хвилі - рефракції. У зв'язку з рефракцією, траєкторія поширення акустичного променя криволінійна [1]. Тому затримка у часі відбитого сигналу характеризує не відстань до об'єкту локації, а довжину шляху, яку пройшов акустичний сигнал. Практично завжди, довжина шляху перевищує дистанцію до об'єкту, іноді у декілька разів. У зв'язку з цим, кутові характеристики сигналу від об'єкту локації можуть бути використані для виявлення об'єкту тільки у разі володіння інформацією про тривимірний розподіл швидкості звуку в морському середовищі.

На рис. 1 схематично показані помилки ехолотування (глибини і місця відображення сигналу) в умовах позитивної рефракції спільно з: вертикальним розподілом швидкості звуку, очікуваною, реальною (нелінійною) траєкторією акустичного променя.

© І.І. ГЛАДКИХ, Б.Б. КАПОЧКІН, Н.В. КУЧЕРЕНКО*, М.Б. КАПОЧКІНА, 2017

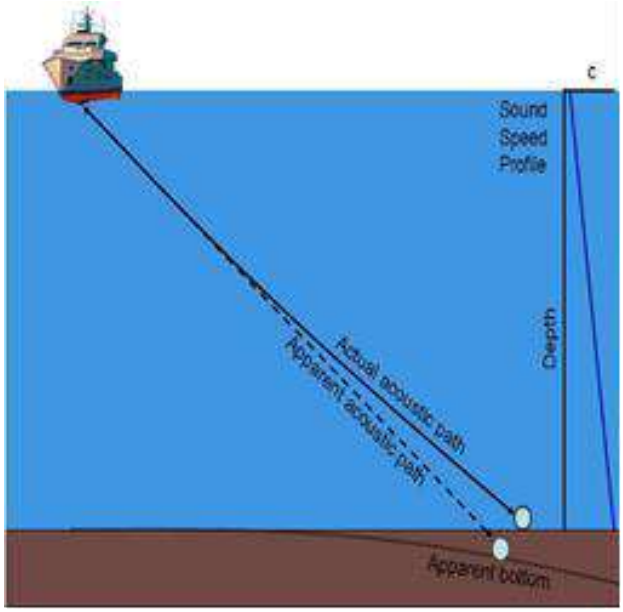


Рис. 1 - Помилки ехолотування в умовах позитивної рефракції [2]

Ефект рефракції особливо помітний при багатопроменевому ехолотуванні. З цієї ж причини фактична дальність дії гідроакустичних систем (ГАС) істотно менша за теоретичну [3]. Так як швидкість поширення звуку уздовж нелінійного акустичного променя є змінною величиною, то для визначення просторового положення об'єкту локації необхідно знати, окрім затримки у часі сигналу, траєкторію поширення звукового променя та функцію зміни фазової швидкості хвилі уздовж нього.

Результатом рефракції є також ймовірність формування між джерелом звуку та відбивачем (ціллю) зон акустичної тіні, що є дуже важливою проблемою для вирішення задач гідроакустичних технологій.

Іншою важливою проблемою є невизначеність наукового обґрунтування природного явища наддалекого поширення звуку в океані. Це явище використовується в інформаційній гідроакустиці для передачі інформації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Перспективи розвитку гідроакустичних технологій, в умовах існуючої невизначеності просторово-часових змін швидкості звуку, повинно враховувати можливість відновлення тривимірного поля швидкості звуку за результатами визначення помилок реєстрації невідповідностей виміру та розрахунку дистанцій стаціонарними гідроакустичними антенами від джерел звуку з фіксованими координатами [4]. Врахування негативного ефекту рефракції для визначення цілей в морському середовищі пропонується реалізовувати за допомогою мережі розподілених у водній товщі вимірювачів швидкості звуку [5]. Важливо також враховувати значну часову мінливість вертикального розподілу швидкості звуку, яка має не тільки сезонний, але й добовий часовий масштаб, та характеризується дрібномасштабними просторово-часовими аномаліями вертикального розподілу швидкості звуку, що впливають на ефективність використання гідроакустичних методів.

Обмежені можливості застосування технологій, що використовують гідроакустичні методи, загальновідомі [6-11]. На поширення акустичних хвиль найбільший вплив мають процеси поглинання та розсіяння акустичної енергії від схвильованої поверхні моря та від донних відкладень. Після першого відбиття акустичної хвилі від морської поверхні та морського дна може фіксуватися дуже значне пониження інтенсивності звуку (рис.2).

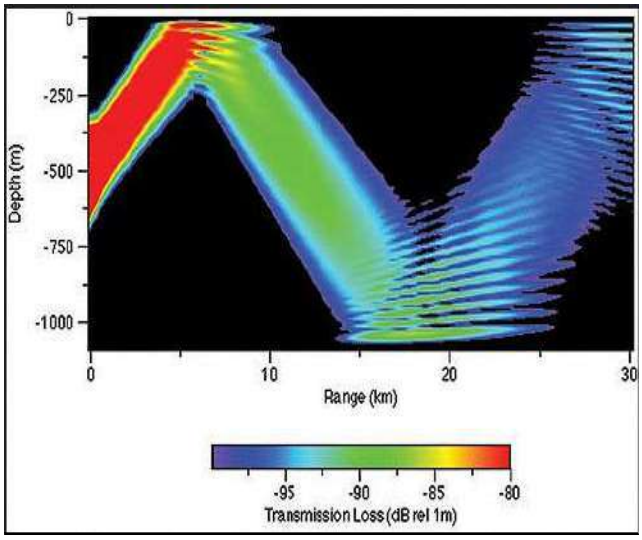


Рис. 2 - Приклад зміни інтенсивності звуку при поширенні акустичної хвилі (пониження інтенсивності від першого відображення від морської поверхні на 10 дБ та від дна - на 5 дБ) [12]

Різні типи ґрунтів по-різному послаблюють звук. У таблиці 1 приведені значення коефіцієнту відбиття та характеристики поглинання звуку в донних відкладеннях. Залежно від гранулометричного складу ґрунтів, коефіцієнт поглинання звукової енергії може відрізнятися на два порядки. Коефіцієнт відбиття акустичного сигналу збільшується при збільшенні щільності ґрунту. Наприклад у газонасичених мулах, відображення акустичної хвилі взагалі не відбувається.

Важливо відмітити, що при поширенні звуку у водній товщі, без відбиття від морської поверхні та від морського дна, втрати на поглинання та розсіяння будуть мінімальними, як наприклад, показано на рис. 3.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Таблиця 1 - Акустичні характеристики донних відкладень [13]

Тип грунту	Коефіцієнт відбиття	Густина (г/см^3)	Швидкість звуку (км/с)	Затухання (дБ/м кГц)
Мул газонасичений	- 0,3 – 0,5	1,1 – 1,4	0,5 – 1,4	0.8 – 0.9
Мул рідкий	<0,15	1,45– 1,5	1,1 – 1,2	0,04
Мул глинистий	0,15 – 0,2	1,45-1,46	1,4 - 1,5	0,08 - 0,1
Мул з алевритом та піском	0,2 – 0,27	1,41-1,48	1,6-1,7	0,2-0,3
Піски тонко та мілкозернисті	0,27-0,30	1,55-1,6	1,95-2,03	0,4-0,5
Піски крупнозернисті з гравієм	0,3-0,35	1,52-1.56	1,86-2,11	0,7
Гравій	0,35-0,4	1,55-1,65	2,05-2,3	0,9
Глини мілкопластичні	0,25-0,3	1,4-1,6	1,5-1,88	0,2-0,4
Глини щільні	0,3-0,42	1,52-1,59	1,82-1,98	0,48-0,61
Виходи корінних порід, скельні кристалічні, скельні осад. та літосф. походження	0,4-0,62	>6,6 3,6-6,6 3,1-4,0	>2,9 2,35-2,9 2,4-2,7	0,05-0,4

У роботі [14] показано, що використання формули обчислення швидкості звуку за показниками щільності та стисливості, на відміну від інших речовин, для води не є коректним.

Емпіричні формули розрахунку швидкості звуку в морській воді (Вільсона, Дель-Гроссо, Лероя) не мають необхідної точності [15, 16, 17, 18, 19, 20]. З нашої точки зору, це пов’язано з тим, що у якості аргументу, використовуються такі параметри як температура, солоність і глибина, що впливають на швидкість звуку не прямо, а опосередковано через густину та стисливість. Наприклад, збільшення температури показує на зміну густини води через збільшення відстані між молекулами та через руйнування структурних утворень. Одночасно збільшення відстаней між молекулами, при

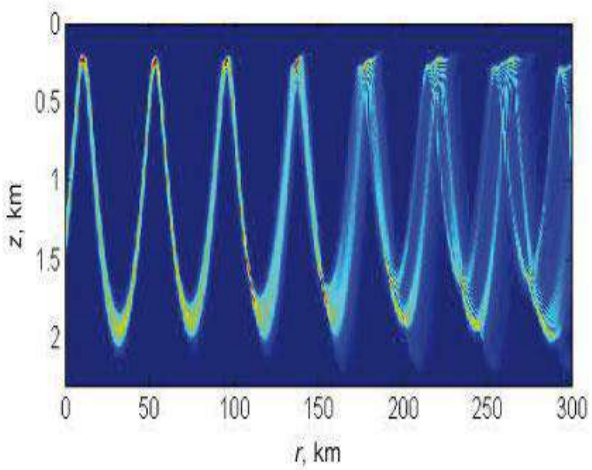


Рис. 3 - Поширення звуку у водній товщі без відбиття від морської поверхні та дна [12]

збільшенні температури, супроводжується збільшенням стисливості. При зміні солоності змінюється величина середньої молекулярної ваги суміші; також можна чекати зміну відстаней між молекулами суміші та виникнення/руйнування структурних утворень у воді. Зі збільшенням глибини, за умов зростання тиску, відбувається руйнування у воді структурних утворень. Причому, це руйнування, вірніше, зміна структури морської води, відбувається, з нашої точки зору, стрибкоподібно, при досягненні деякої критичної глибини (тиску), а не поступово у міру зростання тиску з глибиною. Цікаво, що зворотний процес - зміна структури води при зменшенні статичного тиску - відбувається з деякою затримкою. Щоб визначити порядок часової затримки, можна звернутися до досліджень періоду релаксації екстремально крайніх станів води, наприклад талої води, в рівноважний стан [21, 22]. І теоретично, і в результаті лабораторних досліджень цей час обчислюється 10 - 17 годинами. Таким чином, нестійкі метастабільні стани води зберігають свої властивості в звичайних умовах (при атмосферному тиску) досить тривалий час.

У зв'язку з цим, нами в роботі [14] зроблена спроба пояснити нетривалі горизонтальні градієнти швидкості звуку до 7 м/с на 1-2 км вертикальними переміщеннями водних мас, амплітудою 40 - 60 м. Було висловлено припущення про те, що при інтенсивному підйомі глибинних водних мас, які характеризуються високою швидкістю звуку, характеристика швидкості звуку в умовах падіння тиску, за рахунок інерції, на деякий час збережеться. За рахунок цього динамічного чинника при безперервному підйомі вод (наприклад, в зонах апвелінгу чи циклонічних вихорах) безперервно формуватиметься зона позитивної аномалії швидкості звуку. Таким чином, була сформульована теза про те, що вплив тиску на зміну структури води характеризується деякою інерційністю, що

підтвердилося теоретичними та лабораторними дослідженнями [22].

У зв'язку з існуванням відмінностей між розрахунковими та фактичними значеннями швидкості звуку, сформувалися різні уявлення про міру впливу просторової мінливості швидкості звуку на рефракцію акустичних хвиль. Наприклад, прямими вимірами швидкості звуку в центрі вихрового утворення, де безперервно відбувається пересування по вертикалі вод з відмінними показниками швидкості звуку, встановлено, що при перетинанні вихору, зміни швидкості звуку в горизонтальній площині можуть на порядок перевищувати розрахункові значення, досягаючи 22-30 м/с [23]. Ці відмінності здатні формувати такі умови рефракції за вихровим утворення, що геометрія та розміри отриманого відображення будуть істотно спотворені.

У роботі [14] було показано, що як і раніше, актуальними завданнями сучасної гідроакустики є можливість врахування властивостей водного середовища змінювати 3D форму фронту подовжньої акустичної хвилі, і зворотна задача - оцінювати дію енергії стискання-розрідження подовжньої акустичної хвилі на зміну фізичних властивостей морської води.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми

Відомо, що швидкість звуку у будь-якому середовищі обернено пропорційна до міри стисливості речовини, а також її молекулярної ваги, як показника міри інерції молекул, які рухаються за рахунок акустичної енергії. Прийнято вважати, що зворотна залежність швидкості звуку від густини речовин реалізується тільки у разі, якщо густина змінюється за умови незмінної маси молекул в речовині [24]. У роботі [14] досліджено факт того, що на відміну від переважної більшості речовин, вода в температурному інтервалі від 0ºС до 3,98ºС має негативний коефіцієнт теплового розширення і при збільшенні густини на 0,00157 кг/м^3 замість очікуваного зниження швидкості звуку, спостерігається збільшення швидкості звуку на 19,2 м/с. Тобто, виникає парадокс збільшення швидкості звуку при збільшенні густини. У гідроакустиці була введена науково необґрунтована теза про те, що швидкість звуку у воді, нібито, залежить тільки від температури. Мабуть, це було зроблено для того, щоб «обійти» зазначений парадокс. Проте і термічна залежність швидкості звуку у воді виявилася неоднозначною.

Багатьма дослідниками позитивна аномалія густини при температурі 3,98ºС пояснювалася структурними перебудовами водневих зв'язків на нанорівні [25]. У джерелі [26] цю аномалію у бідистильованій воді пояснюють максимальною активністю утворення надмолекулярних комплексів; а автори роботи [21] порівнюють воду, що має надмолекулярні комплекси, з емульсією. Реальність існування «емульгованого» стану води вони підтверджують методом термічного аналізу води. У джерелі [27] також вказується на можливість існування "особливої фази води", що виникає при температурі 50ºС. Це припущення базується на факті різкої зміни поверхневого натягу та коефіцієнта заломлення води.

Тому, можна припустити, що найбільш важливою характеристикою, що впливає на формування поля швидкості звуку в морській воді, є її структурованість (зміна мас осередків молекул, які рухаються за рахунок енергії акустичної хвилі). Вплив структурованості води на швидкість звуку в деякій мірі оцінений і в роботі [26]. Можна допустити, що найбільш значимі структурні перебудови у воді відповідають 36ºС - температурі мінімальної теплоємності. Якщо врахувати важливу невідповідність, що температура 63ºС відповідає мінімальній стисливості води (очікується максимальна швидкість звуку), а температура 75ºС - максимальній швидкості звуку у воді, то можна припустити також, що руйнування так званих "емульгованих" структур не відповідає умовам мінімальної стисливості.

Крім цього, дотепер нема пояснення щодо розташування головного підводного звукового каналу (ПЗК) на глибинах 800 - 1000 м без фіксованих різких змін температури, солоності та тиску, та без фізичного обґрунтування причини наддалекого розповсюдження звуку у воді.

Виклад основного матеріалу

Як вказано в роботі [22], можливість генерації акустичних коливань при будь-яких хімічних реакціях і фізико-хімічних процесах витікає з об'єднаного рівняння першого і другого законів термодинаміки:

$$dG = pdV - TdS + \sum \mu dn_i + \boldsymbol{\varphi} dq + \sigma\, ds + ...,$$

де G - енергія Гібса ; S - ентропія; T - температура; V - об'єм; p - тиск; σ - поверхневий натяг; s - площа поверхні; μ_i - хімічний потенціал компонента; n - кількість молів компонента; **φ** - електричний потенціал; q - електричний заряд. Таким чином, разом з широко відомими процесами прямого перетворення хімічної енергії в електричну (**φ**dq), теплову (TdS) і електромагнітну, повинне відбуватися безпосереднє перетворення її і в механічну енергію (pdV). Який процес переважатиме, визначається умовами. Якщо переважно змінюватиметься ентропія S, то це приведе до того, що велика частина енергії, що вивільняється, трансформується в тепло; якщо переважно змінюватиметься об'єм V - то це викличе перетворення істотної частини хімічної енергії на механічну роботу, що індукує акустичні коливання. Крім того схоже, що і ентропія (моментальна міра впорядкованості) при її зміні змінює об'єм, тобто може бути також джерелом акустичних коливань при

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

швидких змінах ентропії. У гомогенному рідкому середовищі перетворення хімічної енергії на механічну роботу, у тому випадку, коли взаємодія відбувається у вигляді окремого молекулярного акту, дає одиничний акустичний імпульс з настільки малою енергією, що внаслідок процесів дисипації в середовищі він швидко затухає. Але у тому випадку, коли перетворення хімічної енергії відбувається одночасно у вигляді сотень тисяч окремих молекулярних актів у нано- чи великих надмолекулярних утвореннях, то енергії, що виділяється, може виявитися досить для реєстрації акустичних коливань. Відомо, що акустична емісія (АЕ) легко реєструється при розчиненні у воді різних солей, змішуванні гомогенних рідин, плавленні льоду, хімічних реакціях та в інших аналогічних процесах. Тому автори [22] скористалися цим методом для доказу існування структурних утворень у воді та дослідження динаміки їх перетворень, наприклад, за кількістю імпульсів, активністю АЕ, тривалістю та часом наростання амплітуди сигналу.

На нашу думку, за рахунок моно-, нано- та надмолекулярних комплексів вода одночасно має різні оцінки «маси» асоціацій. Хвилі стискання - розрідження в такому середовищі поширюватимуться зі швидкістю, залежною від міри асоційованості молекул морської води. Одночасно руйнування нано- та надмолекулярних комплексів у воді відбувається під дією тиску, що швидко змінюється при проходженні акустичної хвилі, і температури, що є мірою впорядкованості. На фронті акустичної хвилі спостерігається позитивна аномалія тиску. В області стискання на фронті акустичної хвилі, де швидкість звуку (під впливом тиску і підвищення температури) вища, фазова швидкість переміщення фронту хвилі отримає прискорення.

Енергія на фронті стискання акустичної хвилі може витрачатися на руйнування асоційованих систем міжмолекулярних зв'язків у воді, а не тільки на перехід в кінетичну енергію молекул - підвищення температури. Відповідно до [28], при відновленні одного розірваного міжмолекулярного зв'язку на кожні 10 молекул води, екзотермічний процес досягає рівня 400 кілоджоулів/кг. Можна припустити, що це і є енергія підкачування акустичної хвилі (на стадії розрідження) – одна з головних причин наддалекого поширення звуку у воді. Таким чином, акустична хвиля, як хвиля стискання - розрідження, поширюючись в абсолютно аномальній речовині - воді, формує процеси, що сприяють збільшенню швидкості звуку: зростання температури, зменшення молекулярної маси (фаза стискання), виділення енергії при відновленні міжмолекулярних зв'язків (фаза розрідження). Таким чином середовище, перетворюючись в процесі дії на нього зовнішньої сили, створює сприятливі умови (виділяє енергію, зменшує масу асоційованих молекул) для поширення в ній ефекту, що створюється цією силою, - звукової хвилі. Цей причинно-наслідковий зв'язок називається позитивним зворотним зв'язком, який дуже рідко зустрічається в природних (небіологічних) явищах, зазвичай спрямованих на збільшення ентропії (розсіяння енергії) та приведення системи в рівноважний стан. Проте оскільки природне водне середовище ніколи не буває однорідним, без домішок і розчинених в ній речовин, то, безумовно, в ньому відбуваються і втрати акустичної енергії за рахунок відбиття, розсіяння та поглинання. Тому, процес не переходить в саморуйнівний, а швидше нагадує високопродуктивний цикл, що дуже повільно затухає.

Розглянемо, як проявляються ці процеси для акустичних хвиль в широкому спектральному діапазоні частот. Встановлено, що при випромінюванні акустичної енергії на ультразвукових частотах (УЗ, в міліметровому діапазоні довжин хвиль), в морському середовищі реєструються об'ємні теплові молекулярні акустичні шуми. Для цих довжин хвиль практично повне поглинання звуку відбувається на відстані до 200 м. Також встановлено, що на верхній межі інфразвуку теплових шумів практично немає [24]. Тобто, на УЗ частотах процес формування ідеальних умов у морській воді для поширення акустичних хвиль, описаних вище, не встигає сформуватися протягом часу, що дорівнює періоду хвилі. Тому певна доля акустичної енергії витрачається на релаксаційні процеси, які не беруть участі в процесі поширення акустичних хвиль, як частини процесу позитивного зворотного зв'язку, що описаний вище. При поширенні довгих акустичних хвиль ці процеси синхронізовані в часі (що можна було б в першому наближенні назвати резонансом). Тому при взаємодії акустичної хвилі верхньої межі інфразвуку з водним середовищем, дисипація акустичної енергії у вигляді теплових шумів не фіксується.

Таким чином, процес передачі звуку в морському середовищі можна назвати адіабатичним відповідно до припущення Ньютона (тобто без обміну енергією з тією частиною середовища, де звукова хвиля в даний момент не поширюється) тільки на низьких частотах.

При збільшенні довжини хвилі збільшується ширина та об'єм фронтальної області з аномально високими характеристиками тиску і, відповідно, збільшується тривалість існування умов стискання середовища. На частоті 20 Гц довжина хвилі досягає 72,5 м, тобто ширина фронтальної області інтенсивного стискання морського середовища перевищує 20 м, а сам процес стискання триває до 0,1 сек. На підтвердження цього в таблиці 2 показано залежність дальності дії гідроакустичних систем від випромінюваної довжини акустичної хвилі.

На частотах до 100 кГц поглинання звуку пропорційне частоті в ступені приблизно 3/2 [29]. Нами в більш широкій смузі частот отримана експоненційна залежність поглинання звуку залежно від частоти:

$$L = e(- 0.18011 \cdot \upsilon + 4.8632),$$

де L -дальність розповсюдження звуку в км, υ -частота в кГц.

Таблиця 2 – Дальність дії гідроакустичних систем залежно від довжини хвилі [29]

Частота акустичного сигналу	Довжина хвилі акустичного сигналу	Дальність дії
100 Гц	15 м	1000 км і більше
1 кГц	1,5 м	100 км і більше
10 кГц	15 см	10 км
25 кГц	6 см	3 км
50 кГц	3 см	1 км
100 кГц	1,5 см	600 м
500 кГц	3 мм	150 м
1000кГц	1,5 мм	50 м

Виявлена на низьких частотах негативна аномалія поглинання звукової енергії в морській воді лежить в основі відкриття природного явища «наддалекого поширення звуку» [30]. В роботі [31] приведена інформація про результати виміру дальності поширення звуку в підводному звуковому каналі від вибуху тротилового заряду вагою 2,7 кг: вибух був зафіксований на відстані 5750 км з часовою затримкою більше години, а тривалість прийнятого сигналу вибуху досягала 1 хвилини. Важливо ще раз підкреслити, що експериментально зафіксована аномалія наддалекого поширення звуку в океані до теперішнього часу не мала чіткого теоретичного пояснення. Вірніше, питання формування ПЗК на глибині мінімуму швидкості звуку логічно пояснюється через ефект рефракції, а ось саме виникнення різкої зміни негативного вертикального градієнта швидкості звуку на позитивний не має фізичного обгрунтування.

Нами були проведені розрахунки та порівняльний аналіз вертикального розподілу густини морської води та швидкості звуку на стандартних горизонтах за даними, отриманими в різних районах Світового океану в різні сезони (Тихий океан, Атлантичний, Північний Льодовитий океан, [32]). Було проаналізовано також розподіл температури та солоності більше, ніж на 100 гідрологічних станціях. За різними рівняннями стану (емпіричні формули Кнудсена та К^{o}, П.С. Лінєйкіна, О.І. Мамаєва, формулою спеціалістів Морського гідрофізичного інституту АН України) на кожній станції за даними температури, солоності та тиску була розрахована густина морської води на стандартних горизонтах та швидкість звуку за формулами Дель- Гросо та Вільсона [33]. Порівняльний аналіз отриманих результатів розрахунків показав, що:

ні одна формула для визначення густини морської води не дозволяє отримати розрахунок фактичної різкої зміну тенденції зменшення швидкості звуку на зростання на певних глибинах, (звичайно це 800 – 1000 м);

ні температура, ні солоність не є причиною зміни тенденції зменшення швидкості звуку на зростання, тобто на формування головного ПЗК на вище зазначених глибинах (температура і солоність на зазначених глибинах практично не змінюються).

У світлі приведених вище досліджень цей результат не є неочікуваним. Адже у формулах розрахунку густини морської води не враховується такий важливий фактор як структура води, яка суттєво впливає на її щільність. Наприклад, за температури 0ºС, коли прісна вода знаходиться одночасно у двох станах, рідкому та твердому, тільки за рахунок різної структури води густина її відрізняється практично на 10%. Таким чином, один з головних чинників, який впливає практично на всі властивості морської води, не враховується при визначенні не тільки густини, а й усіх інших базових характеристик морської води, до яких відноситься і швидкість звуку. І саме структура води, а скоріше, її різка зміна при досягненні певного критичного тиску (глибини) є причиною різкого переходу зменшення швидкості звуку на зростання з формуванням на цій глибині мінімуму швидкості звуку (осі головного підводного звукового каналу).

Висновки

Вода – найпоширеніший на поверхні Землі мінерал, який має абсолютно аномальні властивості, якщо використати стандартне порівняння з властивостями з'єднань водню з елементами VI групи Таблиці елементів Д.І.Менделєєва (найлегших з'єднань підгрупи кисню). Завдяки дипольному моменту та можливості виникнення водневого зв'язку та формуванню, завдяки йому, асоціацій молекул води на нано- та надмолекулярному рівні, вода стає унікальним середовищем, в якому можливі такі явища як наддалеке розповсюдження звуку. Негативна аномалія поглинання звукової енергії на низьких частотах завдячує позитивній синхронізації в просторі та часі ефектів зміни стану морського середовища, при проходженні акустичної хвилі, з властивостями самого явища (звуком).

Ефект наддалекого поширення звуку, поряд з задачами інформаційної гідроакустики, може бути використаний в гідроакустичній пеленгації підводних човнів. В [34, 35] передбачається можливість виявлення низькочастотних сигналів, що створюються в полі тиску за рахунок рухів корпусу та рулів підводних човнів. Зі збільшенням довжини хвилі, починаючи з метрового діапазону, посилюється явище дифракції, внаслідок чого акустична хвиля огинає перешкоди і не формує відбитий сигнал. Однак, низькочастотні акустичні хвилі викликають

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

вібрацію великих об'єктів унаслідок збігу їх частот та виникненню явища резонансу.

На нашу думку, теорія наддалекого поширення звуку повинна враховувати також і ефект резонансу, як механізму підживлення акустичного сигналу енергією когерентного коливального процесу в морському середовищі. У першому наближенні це може бути також пов'язано зі збігом періодів акустичної хвилі та періоду власних коливань стисливості морської води.

Список літератури

1. **Roux, P.** Analyzing sound speed fluctuations in shallow water from group-velocity versus phase-velocity data representation / **P. Roux, W. A. Kuperman, B. D. Cornuelle, at. all.** // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 2013. – 133:1945-1952. – doi: 10.1121/ 1.4792354.
2. Режим доступу: Refraction Correction https://confluence. qps.nl/display/KBE/Refraction+Correction.
3. Режим доступу: http://www.akvilona.ru/news/dsit-pointshield.htm.
4. **Гладких, І. І.** Современный уровень технологий, использующих гидроакустические методы для обеспечения навигации и морских поисково-спасательных работ / **І. І. Гладких, М. Б. Капочкіна, В. Ю. Зорін**// *Первый независимый научный вестник «технические науки»*. – 2015. – №1. – Т. 2000. – с. 47-54.
5. Режим доступу: Moving Vessel Profiler http://www.brooke-ocean.com/mvp_main.html.
6. Режим доступу: http://www.omg.unb.ca/~jhc/ coverage_paper. html#cov_306.
7. **Clarke, J. E. H.** The Challenge of Technology: Improving Sea-Floor Mapping Methodologies part of : Visualizing the Sea Floor : Mapping Submarine Landscapes / **John E. Hughes Clarke** // *Symposium on: Visualizing and Looking Beyond Earth American Association for the Advancement of Science* – Canada – February 18th, 2002. – Abstract ID-AAAS-57844.
8. **Wong, G. S.** Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature and pressure / **G. S. Wong, S. Zhu** // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1995. – 97(3). – pp. 1732-1736 – doi: h10.1121/ 1.413048.
9. Режим доступу: http://www.omg.unb.ca/AAAS/UNB _Seafloor_Mapping.html.
10. Режим доступу: The COMET Programhttp:// www.meted.ucar. edu/oceans/hydrography/print.htm.
11. **Medwin, H.** Fundamentals of Acoustical Oceanography / **H. Medwin & C. S. Clay** Academic, Boston. – 1998. – 283 p.
12. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Underwater_ acoustics.
13. Режим доступу: http://www.imtp.febras.ru/images/stories /konf/tpomo-5-30-sentjabrja4oktjabrja2013/pdf/sekcija2.pdf.
14. **Гладких, І. І.** Перспективы технологий, использующих гидроакустические методы, для обеспечения навигации и морских поисково-спасательных работ / **І. І. Гладких, Н. В. Кучеренко, М. Б. Капочкіна, В. Ю. Зорін**// *Первый независимый научный вестник: технические науки*. – 2015. – №2, Т. 2000. - с. 60 -66.
15. **Kenneth, V.**. Discussion of sea-water sound-speed determinations / **V. Kenneth, I. Mackenzie** // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1981. – 70 (3): 801–806. – doi:10.1121/1.386919.
16. **Wong, G.S.** Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature, and pressure / **G. S. Wong**, **S. K. George; Zhu, Shi-ming** // *Journal of the Acoustical Society of America* – 1995. – 97 (3): 1732. – doi:10.1121/1.413048.
17. **Speisberger**, **J.L.** Is Del Grosso's sound-speed algorithm correct ? / **J.L. Speisberger** //– *Journal of the Acoustical Society of America*.– 1993. – 93(4). – pp. 2235-2237 – doi:10.1121/ 1.406686.
18. **Belogol'skii, V. A.** Pressure dependence of the sound velocity in distilled water / **V. A. Belogol'skii, S. S. Sekoyan, L. M. Samorukova, S. R. Stefanov, and V. I. Levtsov** // *Meas. Tech*. – 1999. – 42. – pp. 406–413 – doi:10.1007 / BF02504405.
19. **Leroy, C. C.** Depth-pressure relationships in the oceans and seas / **C. C. Leroy** // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 2007. – 121, 2447 E. – doi:10.1121/1.2988296.
20. **Dushaw, Brian D.** On Equations for the Speed of Sound in Seawater / **Brian D. Dushaw, P. F. Worcester, B. D. Cornuelle, B. M**. **Howe** // *Journal of the Acoustical Society of America*.– 1993. – 93 (1): 255–275. – doi:10.1121/1.405660.
21. **Смирнов, А. Н.** Супранадмолекулярные колмплексы воды / **А. Н. Смирнов, А. В. Сыроежкин** // *Российский химический журнал*. – 2004. – №2. – т. XLVIII [режим доступу: www.chem.msu.su/rus/jvho/2004-2/125.pdf].
22. **Смирнов, А. Н.** Надмолекулярные комплексы воды: «эмулоны» / **А. Н. Смирнов** // *Физика живого* – 2010. – №2 – Т. 18 – С.23-33. [режим доступу: www.pa.sciece-center.net]
23. **Богданов, К. Т.** Условия формирования трехмерного звукового канала и гидролого-акустические характеристики вихрей Камчатского течения / **К. Т. Богданов, Ф. Ф. Храпченков** // *Изв. РАН, ФАО*. – 1994. – Т.30, – № 1. – С. 100-106.
24. **Бабий, В.И.** Влияние звукового поля на параметры термодинамического состояния воды. Роль нелинейных эффектов / **В.И. Бабий** // *Тематический выпуск: Екологія. Море и человек*.— 2013. — №9 (146). — С. 35-39.
25. **Chen, B.** Hydrogen Bonding in Water / **B. Chen, I. Ivanov, M.I. Klein, M. Parrinello** // *Phys.Rev. Lett*. – 2003. – 91 (21), 21/55503). – doi:10.1103/PhysRev Lett. 91.215503.
26. Режим доступу: http://www.dpva.info/Guide/ GuidePhysics/ Sound/SoundSpeedTable1/.
27. Режим доступу: http://oko-planet.su/science/scienceday/ 350888-uchenye-obnaruzhili-novoe-udivitelnoe-svoystvo-vody.html.
28. Режим доступу: //www.bibliotekar.ru/2vodaKak.htm.
29. Режим доступу: http://www.akin.ru/spravka/s_ocean.htm.
30. Режим доступу: http://slovar.cc/enc/bse/2039285.html.
31. Режим доступу: http://mash-xxl.info/info/363227.
32. Режим доступу: Speed of Sound in Sea-Water, NPL, UK. Available at http://www.npl.co.uk/acoustics/techguides /soundseawater. Google Scholar.
33. **Del Grosso, V. A.** New equation for speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations) / **V. A. Del Grosso**// *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1974 – 56 (4) – pp. 1084–1091. – doi:10.1121/1.1903388.
34. Режим доступу: http://vpk.name/news/ 109649_est_li_v_rossii_ sovremennoe_gidroakusticheskoe_ vooruzhenie_chast_3.html.
35. **Bouyoucos, J. V.** Hydroacoustic low frequency transducers / **J. V. Bouyoucos and R. L. Selsam**// *The Journal of the Acoustical Society of America Volume*. – 2005. – 65 (1). – P.

127. Issue S1 10.1121/1.2017029. – doi:http://dx.doi.org/10.1121/ 1.2017029.

Bibliography (transliterated)

1. **Roux, P., Kuperman, W. A., Cornuelle, B. D., Aulanier, F. at all.** Analyzing sound speed fluctuations in shallow water from group-velocity versus phase-velocity data representation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 133, 1945-1952, doi: 10.1121/1.4792354.
2. Rezhym dostupu: Refraction Correction https://confluence.qps.nl/display/KBE/Refraction+ Correction.
3. Rezhym dostupu: http://www.akvilona.ru/news/dsit-pointshield.htm.
4. **Gladkih, I. I., Kapochkina, M. B., Zorin**, **V. Yu.** Sovremennyiy uroven tehnologiy, ispolzuyuschih gidroakusticheskie metodyi dlya obespecheniya navigatsii i morskih poiskovo-spasatelnyih rabot, [The present level of technology, using the hydroacoustic methods for navigation and maritime search and rescue] *Pervyiy nezavisimyiy nauchnyiy vestnik «tehnicheskie nauki» [First independent scientific bulletin: "Engineering sciences"].* Kiev, 2015, **1** (2000), 47-54.
5. Rezhym dostupu: Moving Vessel Profiler http://www.brooke-ocean.com/mvp_main.html.
6. Rezhym dostupu: http://www.omg.unb.ca/~jhc/ coverage_paper. html#cov_306.
7. **Hughes, Clarke, John E.** The Challenge of Technology: Improving Sea-Floor Mapping Methodologies part of: Visualizing the Sea Floor. *Mapping Submarine Landscapes Symposium on: Visualizing and Looking Beyond Earth American Association for the Advancement of Science , Canada, February 18th*, 2002, Abstract ID-AAAS-57844. doi: 10.1007/119149526.
8. **Wong, G. S.** Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature and pressure. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, **97**(3), 1732-1736, doi: 10.1121/ 1.413048.
9. Rezhym dostupu: http://www.omg.unb.ca/AAAS/UNB _Seafloor_Mapping.html.
10. Rezhym dostupu: The COMET Program http://www.meted.ucar.edu/oceans/hydrography/print.htm.
11. **Medwin, H. & Clay**, **C. S.** Fundamentals of Acoustical Oceanography. Academic, Boston, 1998, 283.
12. Rezhym dostupu: https://en.wikipedia.org/wiki/nderwater_ acoustics.
13. Rezhym dostupu: http://www.imtp.febras.ru/images/ stories/konf/tpomo-5-30-sentjabrja-4-oktjabrja-2013 /pdf/sekcija2.pdf.
14. **Gladkih, I. I., Kucherenko, N. V., KapochkIna, M. B., ZorIn**, **V. Yu.** Perspektivyi tehnologiy, ispolzuyuschih gidroakusticheskie metodyi, dlya obespecheniya navigatsii i morskih poiskovo-spasatelnyih rabot [Technology Perspectives, using hydroacoustic methods for navigation and maritime search and rescue operations]. *Pervyiy nezavisimyiy nauchnyiy vestnik (tehnicheskie nauki) [First independent scientific bulletin "Engineering sciences"]*. Kiev, 2015, **2** (2000), 60-66.
15. **Mackenzie, Kenneth V.**. Discussion of sea-water sound-speed determinations. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1981, **70** (3): 801–806, doi:10.1121/1.386919.
16. **Wong, G. S., George, S. K.**; **Shi-ming, Zhu**. Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature, and pressure. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, **97** (3): 1732. doi:10.1121/1.413048.
17. **Speisberger**, **J. L.** Is Del Grosso's sound-speed algorithm correct?. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, **93(**4), 2235-2237.
18. **Belogol'skii, V. A., Sekoyan, S. S., Samorukova, at all.** Pressure dependence of the sound velocity in distilled water. *Meas. Tech*., 1999, **42**, 406–413.
19. **Leroy**, **C. C.** Depth-pressure relationships in the oceans and seas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, **121**, 2447E.
20. **Dushaw, Brian D., Worcester, P. F., Cornuelle, B. D., Howe, B. M.** On Equations for the Speed of Sound in Seawater. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, **93** (1), 255–275. doi:10.1121/1.405660.
21. **Smirnov, A. N., Syiroezhkin, A. V.** Supranadmolekulyarnyie kolmpleksyi vodyi [Supramolecular water systems.], *Rossiyskiy himicheskiy zhurnal [Russian chemical journal]*, 2004, **2** (XLVIII), . [www.chem.msu.su/rus/jvho/2004-2/125.pdf]
22. **Smirnov, A. N.** Nadmolekulyarnyie kompleksyi vodyi: «emulonyi» [Supramolecular complexes of water, "emulony"] *Fizika zhivogo [Physics of the living*], 2010, **2** (18), 23-33.
23. **Bogdanov, K. T., Hrapchenkov, F. F.** Usloviya formirovaniya trehmernogo zvukovogo kanala i gidrologo-akusticheskie harakteristiki vihrey Kamchatskogo techeniya [Conditions of formation of three-dimensional of the sound channel; hydrological and acoustic characteristics of the vortices current Kamchatka]. *Izv. RAN, FAO [Proceedings of the Russian Academy of Sciences; Atmospheric and Oceanic Physics*]. 1994, 1(30), 100-106.
24. **Babiy, V. I.** Vliyanie zvukovogo polya na parametryi termodinamicheskogo sostoyaniya vodyi. Rol nelineynyih effektov [Influence of the sound field on the thermodynamic parameters of the water's state. The role of the nonlinear effects]. *Tematicheskiy vyipusk: Ekologiya. More i chelovek [The thematic issue: Ecology: Sea and the people*]. 2013, **9** (146), 35-39.
25. **Chen, B., Ivanov, I., Klein, M. I., Parrinello, M.** Hydrogen Bonding in Water. *Phys.Rev. Lett*, 2003, v. **91**(21), doi: 10.1103/PhysRev Lett. 91.215503.
26. Rezhym dostupu: http://www.dpva.info/Guide/ GuidePhysics/ Sound/SoundSpeedTable1/.
27. Rezhym dostupu: http://oko-planet.su/science/scienceday/ 350888-uchenye-obnaruzhili-novoe-udivitelnoe-svoystvo-vody.html.
28. Rezhym dostupu: //www.bibliotekar.ru/2vodaKak.htm.
29. Rezhym dostupu: http://www.akin.ru/spravka/s_ocean.htm.
30. Rezhym dostupu: http://slovar.cc/enc/bse/2039285.html.
31. Rezhym dostupu: http://mash-xxl.info/info/363227.
32. Rezhym dostupu: Speed of Sound in Sea-Water, NPL, UK. Available at http://www.npl.co.uk/acoustics/techguides/ soundseawater.Google Scholar.
33. **Del Grosso, V. A.** New equation for speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations). *Journal of the Acoustical Society of America*, 1974, **56** (4), 1084–1091. doi:10.1121/1.1903388**.**
34. Rezhym dostupu: http://vpk.name/news/109649_est _li_v_rossii _sovremennoe _gidroakusticheskoe_ vooruzhenie_chast_3.html.
35. **Bouyoucos, J. V., Selsam, R. L.,** Hydroacoustic low frequency transducers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, **65** (1), 127, doi:10.1121/ 1.2017029.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Відомості про авторів (About authors)

Гладких Ігор Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри гідрографії та морської геодезії, ОНМА, м. Одеса, Україна; e-mail:gladkykh958@gmail.com

Igor Gladkih – doctor of engineering sciences, professor, manager of department of hydrography and marine geodesy, ONMA, Odesa, Ukraine; e-mail:gladkykh958@gmail.com.

Капочкін Борис Борисович – кандидат геолого-мінералогічних наук, провідний науковий співробітник, Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», м. Одеса**,** Україна; e-mail: tsb1@ukr.net.

Boris Kapochkin - doctor of philosophy, Senior Researcher, Research Center of the Armed Forces of Ukraine " State Oceanarium " Odessa; Ukraine, e-mail: tsb1@ukr.net.

Кучеренко Наталія Василівна – кандидат географічних наук, доцент, провідний науковий співробітник, Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», м. Одеса**,** Україна; e-mail: tsb1@ukr.net.

Natalia Kucherenko - Candidate of Geographical Sciences, associate professor, Senior Researcher, Research Center of the Armed Forces of Ukraine " State Oceanarium " Odessa, Ukraine; e-mail**:** tsb1@ukr.net**.**

Капочкіна Маргарита Борисівна, молодший науковий співробітник, Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», м. Одеса**,** Україна; e-mail: tsb1@ukr.net.

Marharyta Kapochkina - junior scientist , Research Center of the Armed Forces of Ukraine " State Oceanarium " Odessa, Ukraine; e-mail: margo-92@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Гладких, І. І. Вплив аномальних властивостей води на гідроакустичні технології / **І. І. Гладких, Б. Б. Капочкін**, **Н. В. Кучеренко, М. Б. Капочкіна** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 164-172. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.23.

Please cite this article as:

Gladkykh, I., Kapochkin, B., Kucherenko, N., Kapochkina M. Anomalous properties of water and their influence on hydroacoustic technologies. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 164–172, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.23.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Гладких, И. И. Влияние аномальных свойств воды на гидроакустические технологии / **И. И. Гладких, Б. Б. Капочкин, Н. В. Кучеренко, М. Б. Капочкина** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 164-172. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.23.

АННОТАЦИЯ *Выполнены исследования влияния аномальных свойств морской воды на особенности распространения звука в ней и, наоборот, акустических волн разного частотного диапазона - на физические свойства воды, которые формируют феномен сверхдальнего распространения звука.*

Ключевые слова: *аномальные свойства воды; структура воды; гидроакустика; подводный звуковой канал; положительная обратная связь*

Надійшла (received) 18.02.2017

УДК 661.872+544.6+661.4 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.24

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРАТОВ(VI) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННЫХ SnO_2–ЭЛЕКТРОДОВ

***Д. А. ГОЛОВКО*[1*], *Д. В. ГИРЕНКО*[2], *И. Д. ГОЛОВКО*[3]**

[1] кафедра Технологии неорганических веществ и экологии, ГВУЗ "УГХТУ", Днепропетровск, УКРАИНА
[2] кафедра Физической химии, ГВУЗ "УГХТУ", Днепропетровск, УКРАИНА
[3] кафедра Аналитической химии и химической технологии пищевых добавок и косметических средств, ГВУЗ "УГХТУ", Днепропетровск, УКРАИНА
**e-mail: golovkod@mail.ru*

***АННОТАЦИЯ**. Изучены особенности образования ферратов(VI) из соединений Fe(III) в растворах с различным ионным составом на инертных SnO_2-электродах, легированных Ru, Pt, Pd и Sb. Установлено, что изменением природы и содержания легирующего металла можно целенаправленно регулировать электро-каталитические свойства анодов, в частности величину перенапряжения выделения O_2. Показана принципиальная возможность электрохимического окисления на поверхности электрода и химического окисления в объеме раствора частиц $Fe(OH)_3$ и $Fe(OH)_4^-$. Разработаны рекомендации для синтеза ферратов(VI) с использованием анодов, обеспечивающих длительный режим работы без ухудшения их эксплуатационных характеристик.*
***Ключевые слова:** технология; окисление Fe(III); феррат(VI); инертный электрод; кислород; гипохлорит*

NEW SOLUTIONS IN THE FERRATES(VI) PROCESS WITH THE USE OF SnO_2–MODIFIED ELECTRODES

***D. GOLOVKO*[1], *D. GIRENKO*[2], *I. GOLOVKO*[3],**

[1] Inorganic Substances Department, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnepropetrovsk, UKRAINE
[2] Department of Physical Chemistry, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnepropetrovsk, UKRAINE
[3] Department of Analytical Chemistry and Food Additives and Cosmetics, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnepropetrovsk, UKRAINE

***ABSTRACT** Disadvantages of traditional synthesis methods of ferrates (VI) - promising green oxidants - stimulate the search of new technological solutions which meet the requirements of modern production. The purpose of this work was to study the ferrates (VI) formation from Fe (III) compounds in solutions with different pH on inert SnO_2 electrodes doped with Pt, Ru, Pd, and Sb. The influence of the nature and the content of the alloying metal on the electrocatalytic properties of the electrode was studied by the stationary voltammetry method, as well as by determining the current yields of hypochlorite and sodium chlorate during the electrolysis of a slightly alkaline NaCl solution. Coatings based on SnO_2, doped with palladium and platinum, show maximal electrocatalytic activity according to ClO^- synthesis. It has been established that the oxygen evolution overvoltage on the electrodes with comparable dopant concentrations increases in the Ru-Pd-Pt-Sb series. It has been shown that for effective synthesis of ferrates (VI), flat Ti anodes of a large area with an electroactive layer based on SnO_2-Sb_2O_3 should be used. It is noted that electrochemical oxidation of Fe (III) in Fe (VI) is more energetically favorable on these electrodes than O_2 evolution, which opens up new possibilities for these processes in ferrate (VI) synthesis technology. We have shown the principal possibility of increasing the productivity of the Fe (VI) process due to the direct interaction of the $Fe(OH)_3$ and $Fe(OH)_4^-$ particles in the solution volume with ClO^- anions generated on an inert electrode when Cl^- anions are preliminarily added to the system. Technological solutions have been proposed to increase the life of inert electrodes when 5-10% TiO_2 is introduced into the SnO_2 matrix, providing a long-term operating mode without degradation of their performance characteristics.*
***Keywords**: technology; oxidation of Fe (III); ferrate (VI); inert electrode; oxygen; hypochlorite*

Введение

Соединения Fe(VI) (ферраты) – это новый класс сильных окислителей, применение которых не наносит ущерба окружающей среде. Благодаря их уникальным свойствам, ферраты являются перспективными реагентами для очистки воды и используются в качестве катодного материала супержелезных аккумуляторов [1-4].

Получают ферраты(VI) двумя наиболее распространенными способами – гипохлоритным (химическим) и электрохимическим с применением Fe-содержащих растворимых анодов [3,5].

Современные синтезы соединений Fe(VI) гипохлоритным способом основаны на окислении кристаллогидратов солей железа(III) (чаще всего нитратов) в щелочной среде [3]. Однако для этой технологии характерно использование весьма опасных веществ, в частности хлора для получения гипохлорита, а также большое количество отходов, из-за чего она подвергается обоснованной критике [3,6]. Напротив, электрохимическая технология считается экологически наиболее безопасной.

© Д. А. ГОЛОВКО, Д. В. ГИРЕНКО, И. Д. ГОЛОВКО, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Традиционно для получения ферратов этим способом используют т.н. жертвенные аноды, которые изготовлены из Fe-содержащих электропроводных материалов (чистое железо, чугуны, стали и др.). В результате процесса транспассивного анодного растворения в щелочной среде железо переходит в раствор в виде оксоаниона феррата FeO_4^{2-}:

$$Fe + 8OH^- - 6e^- \rightarrow FeO_4^{2-} + 4H_2O. \quad (1)$$

К недостаткам таких процессов, прежде всего, следует отнести большие энергозатраты, которые обусловлены как переносом 6 электронов для осуществления перехода $Fe^0 \rightarrow Fe(VI)$ при образовании целевого продукта, так и протеканием побочной реакции электрохимического выделения кислорода. Кроме того, образование анодного шлама в результате неравномерного растворения электродов и неизбежная глубокая их пассивация предопределяют периодичность процесса (1) при длительном электролизе [6].

Поэтому в последнее время значительно возрос интерес к другому типу анодов – инертным электродам (в зарубежной литературе их называют размерно-стабильным анодами DSA), применение которых считается перспективным для получения ферратов в водных растворах и расплавах гидроксидов щелочных металлов, а также в супержелезных аккумуляторах [7-10]. В качестве DSA предложены: платина [5], алмазный электрод допированный бором (BDD) [8-10] и модифицированный сурьмой диоксид олова [7].

Практический интерес к анодным материалам на основе SnO_2 обусловлен их высокой химической устойчивостью как в кислых, так и щелочных средах и ярко выраженной электрокаталитической активностью в реакциях окисления [11]. Для существенного увеличения электропроводности диоксида олова (чистый SnO_2 – полупроводник с шириной запрещенной зоны 3,6 эВ) и придания ему других свойств его допируют различными элементами (сурьмой, фтором и др.) [12]. Так например, атомы Sb(III) в условиях пиролитического нанесения покрытия замещают в кристаллической решетке атомы Sn(IV), создавая при этом достаточную концентрацию носителей электрического заряда [13].

Образование Fe(VI) на DSA, согласно [5], протекает по следующей схеме:

$$FeO_2^- + 4OH^- - 3e^- \rightarrow FeO_4^{2-} + 2H_2O \quad (2)$$

Такие процессы имеют ряд преимуществ. Для них характерно уменьшение энергозатрат в два раза на основную реакцию $Fe(III) \rightarrow Fe(VI)$ и отсутствие непроизводительных потерь железа. Кроме того, электроокисление Fe(III) на DSA может быть организовано в непрерывном режиме работы.

Вместе с тем, получение ферратов с использованием DSA имеет некоторые недостатки и нерешенные вопросы. В случае промышленной реализации процессов на основе DSA одним из главных факторов, определяющих себестоимость ферратов, будет цена анодов. Очевидно, что в этом случае применение BDD и Pt с экономической точки зрения нецелесообразно. Поэтому для практических нужд перспективным является SnO_2–Sb_2O_3/Ti электрод, рекомендованный в [7], главным достоинством которого является высокое перенапряжение выделения кислорода $\eta(O_2)$. В этой связи актуальным представляется проведение исследований, направленных на изучение возможности использования DSA на основе SnO_2/Ti с другими модифицирующими компонентами.

При этом необходимо обратить внимание, что работают DSA в весьма агрессивных условиях − они контактируют с концентрированными растворами и расплавами щелочей, содержащими оксоанионы FeO_4^{2-}. Исследования по повышению стабильности DSA в таких условиях ранее не проводились. Следовательно, необходимы дополнительные эксперименты, поскольку надежных данных и систематических исследований в области синтеза ферратов(VI) с использованием DSA явно недостаточно.

Цель работы и задачи исследования

Целью работы являлось изучить особенности образования соединений Fe(VI) в растворах с различным ионным составом на DSA, содержащих матрицу из SnO_2, модифицированную различными по свойствам металлами.

Для выполнения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Усовершенствовать пиролитическую технологию получения DSA с модифицированной матрицей из диоксида олова на титановой основе.
2. Исследовать закономерности выделения кислорода, образования гипохлорита, а также электрохимического и химического окисления Fe(III) на электродной поверхности и в объеме раствора.
3. Разработать практические рекомендации для технологии получения ферратов(VI) с использованием DSA на основе композита SnO_2-TiO_2.

Методика эксперимента

Каталитические покрытия наносили методом пиролиза на предварительно обезжиренную в 4 М NaOH и протравленную в 10% растворе щавелевой кислоты титановую (ВТ1-0) пластину площадью 5 см^2 в соответствии с рекомендациями [7]. Поверхность получаемых покрытий изучалась методом рентген-фотоэлектронной спектроскопии (РФС) на электронном спектрометре Quantera II, (Physical Electronics, USA) оснащенным AlKα источником

монохроматического рентгеновского излучения (1486,6 эВ, 15 кВ, 25 Вт).

Реактивы, применяемые для исследований имели квалификацию чистоты не ниже х.ч. Растворы готовили на бидистиллированной воде.

Поляризационные измерения проводили с помощью потенциостата ПИ-50-1 и программатора ПР8 в терхэлектродной термостатируемой ячейке. Все потенциалы в статье приведены относительно электрода сравнения Ag|AgCl в насыщенном KCl.

Ресурсные испытания анодов проводили в растворе 0,3 М NaCl при плотности тока 200 мА/см^2 в термостатированной ячейке при температуре 30^{0}С. Критерием разрушения анодов служил существенный рост потенциала электрода. Полученные покрытия испытывали также в щелочных растворах (1-14 М NaOH) в присутствии генерируемых анионов FeO_4^{2-}.

Сравнительную каталитическую активность полученных образцов анодов (5 см^2) по отношению к реакции синтеза гипохлорита натрия оценивали путем электролиза 0,3 М раствора NaCl объемом 300 мл в ячейке без диафрагмы. Время электролиза составляло 40 мин при температуре 20^{0}С. Перемешивание осуществлялось магнитной мешалкой.

Концентрацию ClO^- и ClO_3^- в получаемых растворах определяли методом йодометрического титрования [14]. Определение концентрации анионов FeO_4^{2-} проводили по методикам, приведенным в [15]. Измерения оптической плотности выполняли на спектрофотометре UV-5800PC.

Изложение основного материала

Получение покрытий. На первом этапе исследований пиролитическим путем на титановую подложку были нанесены многослойные SnO_2-покрытия, модифицированные различными элементами, выбранных таким образом, чтобы полученные электроды отвечали технологиям DSA.

Как показал опыт получения подобных покрытий, в процессе нанесения первых слоев происходит существенное окисление титановой подложки совместно с формированием покрытия. Особенно активно этот процесс протекает при температурах пиролиза выше 500^{0}С. При этом снижается адгезия покрытия и растет переходное сопротивление, обусловленное наличием оксидного слоя на поверхности титана. Для уменьшения этого негативного эффекта под основное покрытие наносился подслой (2 слоя) TiO_2-PtOx. Покровный раствор (БР1) для подслоя готовился путем смешивания 1 см^3 $TiCl_4$ и 4 см^3 *н*-C_4H_9OH. В полученный алкоголят вводили раствор 1,0 г $H_2PtCl_6{\cdot}6H_2O$ в 2 см^3 HCl (конц.). Термообработку первого слоя проводили в течении 3 мин, а второго в течении 5 минут при температуре 420^{0}С.

В качестве базового покровного раствора (БР2) использовался раствор $SnCl_4$ в *н*-C_4H_9OH, который получали путем растворения 5 см^3 $SnCl_4$ при охлаждении в 15 см^3 н-бутанола. Для улучшения адгезии и эксплуатационных свойств каталитического покрытия целесообразно в данный раствор вводить БР1 в соотношении 10:1. Для модифицирования покрытий в базовый раствор вводили расчетные количества добавок $RuCl_3$, $H_2PtCl_6{\cdot}6H_2O$, $PdCl_2$ или $SbCl_3$ в HCl (конц.).

Слои наносились кистью с последующей сушкой при температуре 80-90^{0}С в течение 10 минут. Далее следовала термическая обработка анода в муфельной печи 5 мин при температуре 450^{0}С. После нанесения 10 слоев проводили термообработку в течение 20 минут при 500^{0}С.

Для удаления из покрытия остатков покровного раствора электрод поляризовали в 0,3 М NaCl в течение 30 мин при i = 50 мА/см^2. Далее анод отмывался бидистиллированной водой, сушился при температуре 80-90^{0}С и подвергался финальной термообработке 20 мин при 500^{0}С.

Предложенная методика позволяет осаждать воспроизводимые, компактные, однородные, матовые покрытия с высокой адгезией к подложке. При легировании платиной покрытия имеют темно-серый, Ru и Pd – черный, а Sb – серо-голубой цвет.

Поверхность DSA образцов изучали методом рентген-фотоэлектронной спектроскопии и на рис. 1. представлены в качестве примера типичные РФС спектры для электрода SnO_2-TiO_2-PtO_x. Методом РФС было определено содержание (ат.%) легирующих элементов в поверхностном слое DSA, значения которых приведены в скобках в обозначениях покрытий.

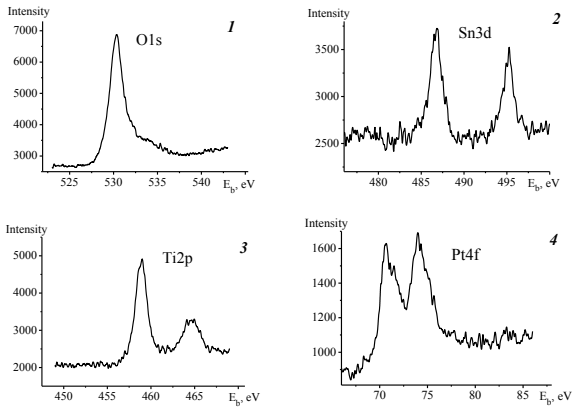


Рис. 1 – РФС спектры поверхности покрытия SnO_2-TiO_2-PtO_x: 1 – O1s; 2 – Sn3d; 3 – Ti2p; 4 – Pt4f

Исследование электрокаталитических свойств DSA. Изучение каталитической активности анодных материалов по отношению к различным процессам (реакций выделения кислорода (РВК), образования гипохлорит-аниона и аниона феррата FeO_4^{2-}) проводили в растворах с различным ионным составом в присутствии соединений Fe(III) ($[Fe(OH)_4]^-$ и $Fe(OH)_3$). Некоторые результаты этих исследований представлены на рис. 2 и 3.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

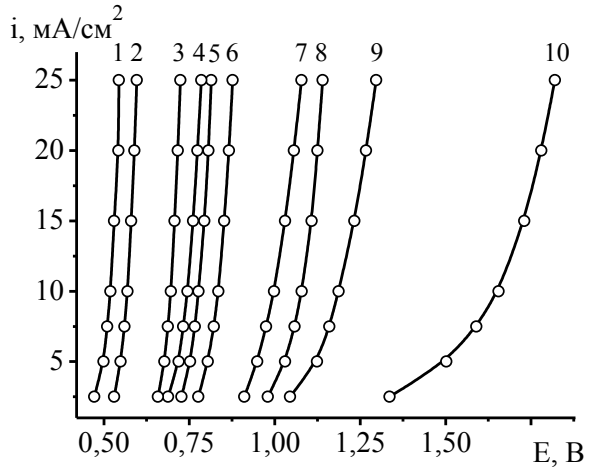


Рис. 2 − Стационарные поляризационные кривые в 1М NaOH на анодах: 1 – Ti/SnO_2-Ru(20); 2 – Ti/SnO_2-Pt(13)-Ru(14); 3 – Ti/ SnO_2-Pd(19); 4 – Ti/ SnO_2-Pt(8)-Pd(12); 5 – Ti/SnO_2-Pt(18); 6 – Ti/ SnO_2-Pt(3); 7 – Ti/ SnO_2-Sb(6)-Pt(5); 8 – Pt; 9 – Ti/ SnO_2-Sb(6); 10 – Ti/ SnO_2-Sb(2)

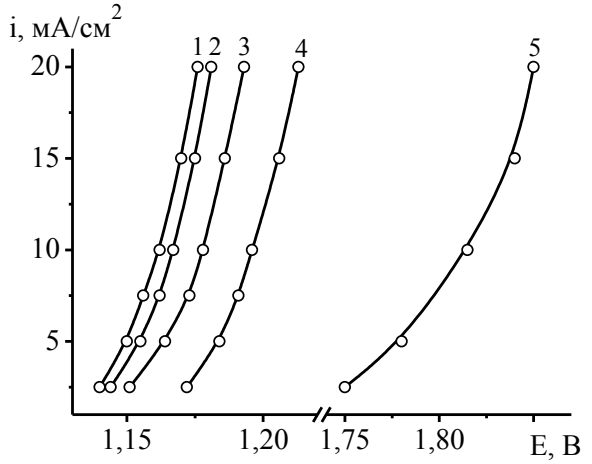


Рис. 3 − Стационарные поляризационные кривые в 0,3 М NaCl (pH=9,0) на анодах: 1 – Ti/SnO_2-Pd(19); 2 – Ti/SnO_2-Pt(8)-Pd(12); 3 – Ti/SnO_2-Pt(18); 4 – Ti/ SnO_2-Pt(3); 5 – Pt

Основным процессом, протекающем на поверхности DSA в щелочной среде при анодной поляризации, является электрохимическое выделение кислорода:

$$4OH^- - 4e^- \rightarrow 2H_2O + O_2\uparrow \quad (3)$$

При электролизе водных растворов NaCl протекает окисление хлорида до аниона гипохлорита:

$$Cl^- + 2OH^- - 2e^- \rightarrow ClO^- + H_2O \quad (4)$$

Для многих технологий более глубокое окисление является нежелательным процессом, поэтому должны приниматься меры по минимизации побочных процессов, в частности образования хлоратов. В табл. 1 показано влияние природы и содержания легирующей добавки в покрытии Ti/SnO_2 на выходы по току гипохлорита и хлората.

Таблица 1 – Выход по току NaClO и $NaClO_3$ при стационарном электролизе в 0,3 М NaCl (pH=9,0) на SnO_2-анодах. Плотность тока 40 мА/см^2.

Анод	ВТ(NaClO), %	ВТ($NaClO_3$), %
Ti/SnO_2-Pd(19)	95,2	1,0
Ti/SnO_2-Pt(8)-Pd(12)	93,1	1,1
Ti/SnO_2-Pt(18)	64,2	5,5
Ti/SnO_2-Pt(3)	56,3	6,6
Pt	35,3	10,6

Электроокисление Fe(III) в Fe(VI) на DSA. Изучение электрокаталитических свойств полученных покрытий по отношению к реакции образования соединений Fe(VI):

$$[Fe(OH)_4]^- + 4OH^- - 3e^- \rightarrow FeO_4^{2-} + 4H_2O \quad (5)$$

и доказательство осуществления прямого перехода Fe(III)→Fe(VI) на поверхности DSA в процессе анодной поляризации проводили в ходе регистрации инверсионных вольтамперных зависимостей i=*f*(E), что рекомендовано в [7]. Как следует из анализа потенциодинамических кривых, полученных на электродах с высоким $\eta(O_2)$ (рис. 4), на обратном ходе поляризационной кривой проявляется характерный катодный пик, который обычно и связывают с наличием в системе соединений Fe(VI) [7].

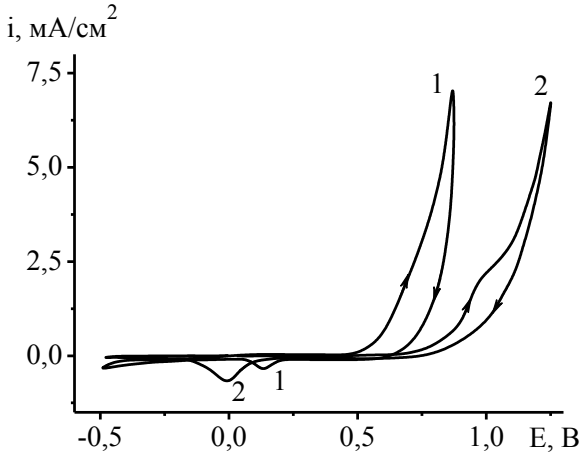


Рис. 4 − Инверсионные вольтамперограммы в 14 М NaOH, 1,7·10^{-4} М [$Fe(OH)_4^-$] на электродах: 1 − Pt, 2 – Ti/ SnO_2-Sb(2). dE/dτ=100 мВ/с.

О количественных показателях процесса (5) судили по данным стационарного электролиза. Интенсивное образование кислорода и весьма слабое

розовое окрашивание раствора, регистрируемое в приэлектродном пространстве, свидетельствует о низких значениях выхода по току Fe(VI), что и подтверждают данные, представленные в табл. 2.

Таблица 2 – Выход по току феррата(VI) при стационарном электролизе в 14 М NaOH, $1{,}7\cdot10^{-4}$ М Fe(III) на различных DSA. i=40 мА/см^2.

Анод	ВТ(FeO_4^{2-}), %
Pt	0,7
Ti/ SnO_2-Pt(3)	0,4
Ti/ SnO_2-Sb(6)-Pt(5)	0,5
Ti/ SnO_2-Sb(6)	1,1
Ti/ SnO_2-Sb(2)	1,9

Небольшие значения ВТ во многом обусловлены низкой концентрацией исходных железосодержащих частиц.

Химическое окисление Fe(III) в FeO_4^{2-}. Было обнаружено, что в процессе электролиза щелочных растворов $[Fe(OH)_4]^-$ после введения в систему хлорид ионов, электролит интенсивно окрашивается в характерный для соединений Fe(VI) пурпурный цвет. Причем в аналогичных условиях, но в отсутствии анионов Cl^-, как было описано выше, такие концентрации соединений Fe(VI) не достигаются. Для определения концентрации FeO_4^{2-} и степени превращения (α) Fe(III) в Fe(VI) в щелочных растворах, содержащих NaCl, был использован спектрофотометрический метод анализа. Электронные спектры поглощения растворов при различной длительности электролиза на электроде с лучшими значениями ВТ(ClO^-) представлены на рис. 5б.

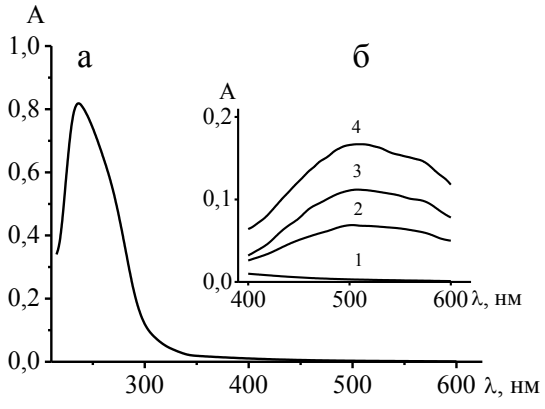


Рис.5 – Электронные спектры поглощения растворов 8 М NaOH: а – $1{,}7\cdot10^{-4}$ М $[Fe(OH)_4]^-$; б – 0,3 М NaCl, $1{,}7\cdot10^{-4}$ М $[Fe(OH)_4]^-$. I = 40 мА/см^2. Время электролиза, мин.: 1- 0; 2-10; 3-15;4-20. Анод Ti/SnO_2-Pd(19)

Как следует из рис. 5б, увеличение времени анодной поляризации электродов постоянным током приводит к росту оптической плотности (А) раствора. Поскольку поглощение гидроксокомплексов Fe(III) при λ > 350 нм практически отсутствует (рис. 5а), то увеличение А в видимой области спектра (рис. 5б) в ходе электролиза обусловлено только повышением концентрации FeO_4^{2-} (табл.3), которая рассчитывалась по известному значению молярного коэффициента светопоглощения ε = 1070 $М^{-1}см^{-1}$ при λ=505 нм.

Таблица 3 – Зависимость концентрации FeO_4^{2-} и степени превращения (α) от продолжительности электролиза в 8 М NaOH; C^0_{NaCl}=0,3 М; $C^0_{Fe(III)}$ = $1{,}7\cdot10^{-4}$ М на Ti/SnO_2-Pd(19). i=40 мА/см^2.

Время, мин	0	10	15	20
$C(Fe^{VI})\cdot10^4$, М	0	0,64	1,05	1,56
α, %	0	37,6	61,8	92,0

Для уменьшения переходного сопротивления и улучшение адгезии покрытия к поверхности титана наносили подслой TiO_2-Pt(10). Формирование на поверхности Ti подобного подслоя позволило улучшить как ресурс анодов, так и воспроизводимость состава и свойств получаемых покрытий.

Введение в состав БР1 $TiCl_4$ позволило улучшить эксплуатационные характеристики малоизнашиваемых анодов (Ti/ SnO_2-Sb(2) и Ti/SnO_2-Pd(19)). После 200 часов эксплуатации не обнаружено растрескивания, вздутия, отслаивания покрытий и изменения их электрокаталитических свойств. Присутствие в покрытии TiO_2 положительно влияет на стабильность потенциала в процессе анодной поляризации.

Обсуждение результатов

В отличие от микроанода (1 мм^2), описанного в [7], и пригодного только в лабораторных целях, нами разработана оригинальная методика нанесения электроактивных слоев на большие плоские подложки, которая может быть применима для получения электродов в промышленных масштабах.

Как следует из анализа вольтамперных кривых в 1 М NaOH, модифицирование SnO_2-покрытий позволило существенно изменить его электрокаталитическую активность по отношению к реакции (3). В порядке увеличения $\eta(O_2)$ покрытия можно расположить в следующий ряд: SnO_2-Ru; SnO_2-Pd; SnO_2-Pt; SnO_2-Sb (Рис. 1). Поэтому в качестве перспективного электродного материала для прямого электросинтеза ферратов (реакция 5) был выбран анод Ti/SnO_2-Sb(2), для которого было установлено максимальное $\eta(O_2)$. Важно также отметить, что это покрытие не содержит в своем составе дорогостоящих компонентов. Как видно из рис. 4, высота пика, фиксируемого на катодных сканах, больше на модифицированном сурьмой SnO_2-электроде (кривая 2) по сравнению с Pt (кривая 1), что обусловлено образованием большего количества соединений Fe(VI). Следовательно, преимущества такого анода в большей степени могут быть

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

реализованы при проведении электролиза в потенциостатических условиях, т.е. при E = Const. При гальваностатическом электролизе небольшие значения ВТ(Fe(VI)) (табл. 2) обусловлены низкой растворимостью соединений Fe(III) в электролите, поэтому недостатком процесса при i = Const является не только выделение кислорода, но и значительный массоперенос $[Fe(OH)_4]^-$, быстро приводящий к явлению концентрационной поляризации. Одним из решений данной проблемы может быть увеличение концентрации соединений Fe(III) в системе, например при переходе от истинных растворов к суспензии $Fe(OH)_3$. Результаты исследований в этом направлении будут представлены в дальнейшем.

Также весьма плодотворным может быть новый подход, предполагающий химическое окисление соединений Fe(III) электрохимически генерированными in situ на DSA анионами ClO^-:

$$2[Fe(OH)_4]^- + 3ClO^- + 2OH^- \rightarrow 2FeO_4^{2-} + 3Cl^- + 5H_2O \quad (6)$$

В свою очередь, образование ClO^-, протекающее в соответствии с реакцией (4), не должно осложняться образованием O_2 по реакции (5) и побочных продуктов типа ClO_3^-, оказывающего негативное влияние на стабильность соединений Fe(VI). Очевидно, что в этом случае требовалась разработка покрытий, обеспечивающих наибольший ВТ по гипохлориту.

Для синтеза NaClO были испытаны аноды SnO_2, легированные платиной и палладием. В растворе 0,3 М NaCl (pH 9,0) на покрытии SnO_2-Pd(19) наблюдается при i = const наименьшая поляризация (рис. 3). Введение Pt в данное покрытие приводит к незначительному росту поляризации электрода. Данные рис.3 указывают на существенный рост электрокаталитической активности SnO_2 при модифицировании металлами платиновой группы. Природа легирующего элемента в большей степени влияет на селективность катализатора по отношению к реакции синтеза гипохлорит иона (реакция 4) . Так, стационарный электролиз раствора 0,3 М NaCl показал, что максимальный выход по току ClO^- и минимальный ВТ(ClO_3^-) наблюдается на покрытиях SnO_2, легированных Pd (табл. 1). Введение в покрытие Pt уменьшает ВТ(ClO^-) и увеличивает ВТ(ClO_3^-). Для синтеза ферратов был выбран анод Ti/SnO_2-Pd(19), не содержащий в своем составе более дорогой Pt и обеспечивающий ВТ(ClO^-) = 95,3 %. Данные рис. 5 подтвердили правильность выбранного подхода – окисление гидроксоферратов(III) (реакция 6) протекало быстро и достаточно полно (табл. 3). Как было установлено в ходе дополнительных экспериментов анионы ClO^- можно использовать в качестве эффективного окислителя когда соединения Fe(III) содержатся в растворе не только в истинной форме, но и в виде суспензии гидроксида железа(III).

Следует добавить, что поиску эффективных окислителей для синтеза соединений Fe(VI) уделяется повышенное внимание, так, в частности, для окисления гидроксокомплексов [16] и суспензии гидроксида железа(III) [17] рекомендуется использовать озон, что обусловлено его высокой реакционной способностью и большим значением редокс-потенциала $E(O_3/O_2)$=1,24 В. Кроме того, при синтезе с участием O_3 не происходит накопления посторонних анионов, например хлоридов, как в случаях использования Cl_2 или ClO^-. Однако низкая растворимость и высокая скорость разложения озона в концентрированных щелочных растворах существенно ограничивают выход целевого продукта. Так, за 30 минут непрерывного барботирования озона достигнута ~70% степень превращения $[Fe(OH)_4]^-$ [16], а выход Fe(VI) по данным [17] колеблется в пределах от 8 до 18% в зависимости от времени барботажа O_3 в суспензию $Fe(OH)_3$ (от 30 до 120 мин).

Существенным преимуществом предложенного технологического решения, основанного на применении в качестве окислителя для Fe(III) электрохимически генерированных анионов гипохлорита, является простота управления процессом синтеза ферратов, а также возможность варьирования в широких пределах скоростью и количеством образующихся ClO^- и FeO_4^{2-}.

Кроме того окислительно-восстановительный потенциал для реакции

$$ClO^- + H_2O + 2e^- \rightarrow Cl^- + 2OH^- \quad (7)$$

также высок и составляет 0,89 В, а стабильность ClO^- при переходе из кислой в щелочную среду даже возрастает без существенного снижения его реакционной активности. Одним из главных достоинств применения таких процессов является экономическая составляющая – к настоящему времени гипохлорит является самым доступным и дешевым окислителем. Поэтому использование анионов ClO^-, электрохимически генерированных на DSA для получения ферратов(VI) путем окисления соединений Fe(III), является более целесообразным по сравнению с другими окислителями, применяемыми в традиционных синтезах соединений Fe(VI).

Выводы

1. Усовершенствована технология получения DSA на основе диоксидов олова, легированных оксидами рутения, платины, палладия и сурьмы. Введение в покрытие дополнительно TiO_2 положительно влияет на стабильность характеристик анода в условиях синтеза ферратов(VI).

2. Изучено выделение кислорода на полученных анодах в растворах NaOH. Показано, что перенапряжение выделения кислорода, при сопоставимых концентрациях легирующей добавки в покрытии, увеличивается в ряду Ru-Pd-Pt-Sb.

Следовательно, изменением природы и содержания легирующего металла можно целенаправленно регулировать электрокаталитические свойства DSA.

3. Изучены закономерности окисления Cl^- на модифицированных SnO_2-покрытиях. Показано, что легирование палладием позволяет проводить синтез NaClO в растворе 0,3 М NaCl с выходом по току более 90%.

5. Продемонстрирована принципиальная возможность электрохимического окисления на поверхности DSA и химического окисления в объеме раствора частиц Fe(III) различной природы. Разработаны практические рекомендации для синтеза ферратов(VI) с использованием DSA, обеспечивающих длительный режим работы без ухудшения их эксплуатационных характеристик.

Список литературы

1. **Yates, B.** Engineering aspects of ferrate in water and wastewater treatment – a review / **B. J. Yates, R. Zboril, V. K. Sharma** // *Journal of Environmental Science and Health, Part A.* – 2014. – Vol. 49, № 14. – P. 1603-1614. – – doi: 10.1080/10934529.2014.950924.
2. **Yang, X.** Effect of pH on the formation of disinfection byproducts in ferrate(VI) pre-oxidation and subsequent chlorination / **X. Yang, W. Gan, X. Zhang [**et al.] // *Separ. Purif. Tech.* – 2015. – vol.156, part 3. – P. 980-986. – doi: 10.1016/j.seppur.2015.09.057.
3. **Sharma, V. K.** Ferrates: Synthesis, Properties, and Applications in Water and Wastewater Treatment / **V.K. Sharma** // ACS Symposium Series, 2008. − 524 p. – doi: 10.1021/bk-2008-0985.
4. **Farmand, M.** Super-iron nanoparticles with facile cathodic charge transfer / **M. Farmand, D. Jiang, B. Wang [**et al.] // *Electrochem. Comm.* – 2011. – vol.13, №9. – P. 909-912. – doi:10.1016/j.elecom.2011.03.039.
5. **Macova, Z.** Research progress in the electrochemical synthesis of ferrate(VI) / **Z. Macova, K. Bouzek, J. Hives** [et al.] // *Electrochimica acta*. – 2009. – vol. 54. – P. 2673-2683. – doi:10.1016/j.electacta.2008.11.034.
6. **Головко, Д. А.** Усовершенствование технологии получения ферратов щелочных металлов / **Д. А. Головко, Е. А. Беляновская, И. Д. Головко** // *Наукові праці ОНАХТ.* – 2012. – вип. 41, Т.2. – С.211-215.
7. **Zhang, C.-Zh.** Electrochemical generation of ferrate on SnO_2–Sb_2O_3/Ti electrodes in strong concentration basic condition / **C.-Zh. Zhang, Z. Liu, F. Wu** [et al.] // *Electrochem. Comm.* – 2004. – Vol. 6, № 11. – P. 1104-1109. – doi:10.1016/j.elecom.2004.08.011.
8. **Lee, J.** Electrochemical generation of ferrate in acidic media at boron doped diamond electrodes / **J. Lee, D. Truk, A. Fujishima [**et al.] // *Chem. Commun.* – 2002. – №5. – P.486-487. – doi:10.1039/B111317H.
9. **Sánchez-Carretero, A.** Improvements in the electrochemical production of ferrate with conductive diamond anodes using goethite as raw material and ultrasound / **A. Sánchez-Carretero, C. Sáez, P. Cañizares** [et al.] // *Industrial and engineering chemistry research.* – 2011. – vol.50. – P. 7073-7076. – doi:10.1021/ie101438e.
10. **Čekerevac, M.** Ferrate(VI) synthesis at boron-doped diamond anode / **M. Čekerevac, L. Nikolić-Bujanović, A. Jokić** [et al.] // *J. Serb. Chem. Soc.* – 2013. – vol. 78. №2. – P. 265-279. – doi:10.2298/JSC120309108C.
11. **Yao, P.** Active Ti/SnO_2 anodes for pollutants oxidation prepared using chemical vapor deposition / **P. Yao, X. Chen, H. Wu, D. Wang** // *Surf. Coat. Tech.* – 2008. – vol. 202. – № 16. – P. 3850-3855. – doi:10.1016/ j.surfcoat.2008.01.02.
12. **Adams, B.** Design and electrochemical study of SnO_2-based mixed oxide electrodes / **B. Adams, M. Tian, A. Chen** // *Electrochim. Acta*. – 2009. – vol. 54. – P. 1491-1498. – doi:10.1016/j.electacta.2008.09.034.
13. **Batzill, M.** The surface and materials science of tin oxide / **M. Batzill, U. Diebold** // *Prog. Surf. Sci*. – 2005. – vol. 79. – P. 47-154. – doi:10.1016/j.progsurf.2005.09.002.
14. **Гиренко, Д. В.** Определение микроколичеств хлоратов в растворах гипохлорита натрия медицинского назначения / **Д. В. Гиренко, Е. Ю. Вашкевич, Н. В. Николенко //** *Вопр. химии и хим. технологии*. – 2016. – № 2. – С.14-18.
15. **Golovko, D.** Determination of submillimolar concentration of ferrate(VI) in alkaline solutions by amperometric titration / **D. Golovko, V. K. Sharma, O. Pavlova [**et al.]. // *Centr. Europ. J. Chem.* − 2011. − vol. 9, №5. − P.808-812. – doi: 10.2478/s11532-011-0069-8.
16. **Perfiliev, Yu. D.** Formation of iron(VI) in ozonalysis of iron(III) in alkaline / **Yu. D. Perfiliev, E. M. Benko, D. A. Pankratov** [et al.] // *Inorg. Chim. Acta*. – 2007. – Vol. 360. – P. 2789-2791. – doi:10.1016/j.ica.2006.11.019.
17. **Shilov, V. P.** Oxidation of Fe(III) to Fe(VI) by ozone in alkaline solutions / **V. P. Shilov, A. V. Gogolev** // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2010. – Vol.80, № 5. – P. 725-728. – doi:10.1134/S107036321005004X.

Bibliography (transliterated)

1. **Yates, B., Zboril, R., Sharma, V. K.** Engineering aspects of ferrate in water and wastewater treatment – a review. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2014, **49**, (14), 1603–1614, doi:10.1080/10934529.2014.950924.
2. **Yang, X., Gan, W., Zhang, X. [**et al.] Effect of pH on the formation of disinfection byproducts in ferrate(VI) pre-oxidation and subsequent chlorination. *Separ. Purif. Tech.*, 2015, **156**(3), 980-986, doi:10.1016/j.seppur.2015.09.057.
3. **Sharma, V. K.** Ferrates: Synthesis, Properties, and Applications in Water and Wastewater Treatment ACS Symposium Series, 2008, 524 p., doi:10.1021/bk-2008-0985.
4. **Farmand, M., Jiang, D., Wang, B. [**et al.] Super-iron nanoparticles with facile cathodic charge transfer. *Electrochem. Comm.*, 2011, **13**(9), 909-912, doi:10.1016/j.elecom.2011.03.039.
5. **Macova, Z., Bouzek, K., Hives, J.** [et al.] Research progress in the electrochemical synthesis of ferrate(VI) *Electrochimica acta*, 2009, **54**, 2673–2683, doi:10.1016/j.electacta.2008.11.034.
6. **Golovko, D., Belyanovskaya, E., Golovko, I**. Usovershenstvovanie tekhnologii polucheniya ferratov schelochnykh metallov [Improvement of technology for the production of alkali metal ferrates], *Naukovi pratci ONAKhT [Scientific works of ONAHT]*, 2012, **41**(2), 211-215.
7. **Zhang, C.-Zh. Liu, Z., Wu, F.** [et al.] Electrochemical generation of ferrate on SnO_2–Sb_2O_3/Ti electrodes in strong concentration basic condition. *Electrochem. Comm.*, 2004, **6**(11), 1104 – 1109, doi:10.1016/j.elecom.2004.08.011.
8. **Lee, J., Truk, D., Fujishima, A. [**et al.] Electrochemical generation of ferrate in acidic media at boron doped diamond electrodes. *Chemm. Commun.* 2002, **5**, 486-487, doi:10.1039/B111317H.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

9. **Sánchez-Carretero, A., Sáez, C., Cañizares, P., Cotillas S.** [et al.] Improvements in the electrochemical production of ferrate with conductive diamond anodes using goethite as raw material and ultrasound. *Industrial and engineering chemistry research*, 2011, **50**, 7073-7076, doi:10.1021/ie101438e.
10. **Čekerevac, M., Nikolić-Bujanović, L., Jokić, A.** [et al.] Ferrate(VI) synthesis at boron-doped diamond anode. *J. Serb. Chem. Soc.*, 2013, **78**(2), 265-279, doi:10.2298/JSC120309108C.
11. **Yao, P., Chen, X., Wu, H., Wang, D.** Active Ti/SnO_2 anodes for pollutants oxidation prepared using chemical vapor deposition. *Surf. Coat. Tech., 2008*, **202**(16), 3850-3855, doi:10.1016/j.surfcoat.2008.01.02.
12. **Adams, B., Tian, M., Chen, A.** Design and electrochemical study of SnO_2-based mixed oxide electrodes. *Electrochim. Acta*, 2009, **54**, 1491-1498, doi: 10.1016/j.electacta.2008.09.034.
13. **Batzill, M., Diebold, U.** The surface and materials science of tin oxide // *Prog. Surf. Sci.*, 2005, **79**, 47-154, doi:10.1016/j.progsurf.2005.09.002.
14. **Girenko D., Vashkevich H., Nikolenko N.**, Opredeleniye mikrokolichestv khloratov v rastvorakh gipokhlorita natriya meditsinskogo naznacheniya [Determination of chlorate trace amounts in sodium hypochlorite solutions for medical purposes] // *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii [Questions of chemistry and chemical technology]*, 2016, **2**, 14-18.
15. **Golovko, D., Sharma, V. K., Pavlova, O.** [et al.] Determination of submillimolar concentration of ferrate(VI) in alkaline solutions by amperometric titration. *Centr. Europ. J. Chem.*, 2011, **9**(5), 808-812, doi: 10.2478/s11532-011-0069-8.
16. **Perfiliev, Yu. D., Benko, E. M., Pankratov, D. A.** [et al.] Formation of iron(VI) in ozonalysis of iron(III) in alkaline. *Inorg. Chim. Acta*, 2007, **360**, 2789-2791, doi: 10.1016/j.ica.2006.11.019.
17. **Shilov, V. P., Gogolev, A. V.** Oxidation of Fe(III) to Fe(VI) by ozone in alkaline solutions. *Russian Journal of General Chemistry*, 2010, **80**(5), 895-898, doi: 10.1134/S107036321005004X.

Сведения об авторах (About authors)

Головко Дмитрий Аркадьевич – кандидат химических наук, доцент, Государственное высшее учебное заведение "Украинский государственный химико-технологический университет", доцент кафедры Технологии неорганических веществ, г. Днепропетровск, Украина; e-mail: golovkod@mail.ru.

Dmitriy Golovko – Ph. D., Associated Professor, Inorganic Substances Department, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnepropetrovsk, Ukraine; e-mail: golovkod@mail.ru.

Гиренко Дмитрий Вадимович − кандидат химических наук, доцент, Государственное высшее учебное заведение "Украинский государственный химико-технологический университет", доцент кафедры Физической химии, г. Днепропетровск, Украина; e-mail: dvgir@mail.ru.

Dmitriy Girenko – Ph. D., Associated Professor, Department of Physical Chemistry, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnepropetrovsk, Ukraine; e-mail: dvgir@mail.ru.

Головко Игорь Дмитриевич – Государственное высшее учебное заведение "Украинский государственный химико-технологический университет", ассистент кафедры Аналитической химии и химической технологии пищевых добавок и косметических средств, г. Днепропетровск, Украина; e-mail: e20@ua.fm.

Igor Golovko – assistant, Department of Analytical Chemistry and Food Additives and Cosmetics, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnepropetrovsk, Ukraine; e-mail: e20@ua.fm.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Головко, Д. А. Новые решения в технологии получения ферратов(VI) с использованием модифицированных SnO_2-электродов / **Д. А. Головко, Д. В. Гиренко, И. Д. Головко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 173-180. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.24.

Please cite this article as:

Golovko, D., Girenko, D., Golovko, I. New solutions in the ferrates(VI) process with the use of SnO_2-modified electrodes. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 173-180, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.24.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Головко, Д. А. Нові рішення у технології одержання ферат(VI) із використанням модифікованих SnO_2-електродів / **Д. А. Головко, Д. В. Гиренко, І. Д. Головко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 173-180. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.24.

АНОТАЦІЯ *Вивчено особливості утворення ферат(VI) зі сполук Fe(III) у розчинах із різним іонним складом на інертних SnO_2-електродах, легованих Ru, Pt, Pd и Sb. Встановлено, що зміною природи та вмісту легуючого металу можна цілеспрямовано регулювати електрокаталітичні властивості анодів, зокрема величину перенапруги виділення O_2. Показано принципову можливість електрохімічного окислення на поверхні електроду та хімічного окислення в об'ємі розчину часток $Fe(OH)_3$ та $Fe(OH)_4^-$. Розроблено рекомендації для синтезу ферат(VI) із використанням анодів, що забезпечують тривалий робочій режим без погіршення експлуатаційних характеристик.*

Ключові слова: *технологія; окислення Fe(III); ферат(VI); інертний електрод; кисень; гіпохлорит*

Поступила (received) 10.03.2017

УДК 664.663.4 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.25

ВИКОРИСТАННЯ БАРДИ У ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЖИТНЬО - ПШЕНИЧНОГО ХЛІБА

Н. Л. ЛОБАЧОВА[1*], С. М. САБАДАШ[2]

[1]кафедра технології харчування,Сумський національний аграрний університет, м.Суми, УКРАЇНА
[2]кафедра інженерних технологій харчових виробництв, Сумський національний аграрний університет, м.Суми, УКРАЇНА
[*]email: nadezh.da@ukr.net

АНОТАЦІЯ *У статті проаналізовано сучасний стан та перспективність переробки післяспиртової барди. – вторинного продукту при виробництві біоетанола з кукурудзи, обґрунтовано і досліджено шляхи її використання в хлібопекарській промисловості. Наведено харчовий потенціал продукту. Для проведення науково-дослідних робіт із сушіння післяспиртової барди було розроблено технологічний процес та технологію житньо - пшеничного хліба на заквасках. Досліджено склад мікрофлори житніх заквасок та їх роль у формуванні якості хліба.*
Ключові слова: *післяспиртова барда; кукурудза; біоетанол; білок; закваска; хліб*

BARDS USE IN PRODUCTION TECHNOLOGIES RYE-WHEAT BREAD

N. L. LOBACHEVA[1], S. M. SABADASH[2]

[1]Department of Food Technology, Sumy National Agrarian University, Sumy, UKRAINE
[2]Department of engineering technology of food production, Sumy National Agrarian University, Sumy, UKRAINE

ABSTRACT *A secondary product of the production of bioethanol is pislyaspyrtova dry bard, which is a raw material that incorporates contains proteins, fats, carbohydrates, and essential amino acids. Hence the search for ways to use it as an alternative raw material in technology baking industry since bread - this is the daily hand food among the population. The article analyzes the current state and prospects of processing pislyaspyrtovoyi bards - a secondary product in the production of bioethanol from corn, reasonably and explored ways to use baking industry. An edible product potential. For the research work of drying pislyaspyrtovoyi bards was developed manufacturing process technology and rye - wheat bread yeast. Studied the composition of microflora of sourdough rye and their role in shaping the quality of bread. On this basis, the author PSBC reasonably possible use in a biologically valuable raw materials in the production of bakery industry. Based on research organoleptic, physical, chemical and microbiological parameters PSBC reasonable prospects of using technology in rye-wheat bread. Past studies prove the effectiveness of the use of technology PSBC preparation rye sourdough in the production of rye-wheat bread, produces high quality products that meet the requirements of regulatory documents. To conduct research projects on drying of PSBC was developed process technology and rye - wheat bread to leaven. The composition of the microflora of sourdough rye and their role in shaping the quality of bread.*
Keywords: *pislyaspyrtova bard; corn; bioethanol; white; sourdough bread*

Вступ

В останні десятиліття в світі все більше уваги приділяється збільшенню ресурсів харчового білка, удосконалення техніки і технології переробки традиційних і нетрадиційних сировинних ресурсів у галузях харчової промисловості, розширення асортименту повноцінних продуктів харчування.

Останнім часом в Україні використання вторинної сировини від підприємств харчової промисловості набуває все більшої актуальності. У зв'язку із значними об'ємами промислової переробки різноманітної сировини рослинного походження на харчові цілі утворюють значний потенціал для промисловості агропромислового комплексу. В Україні вже розроблена технологія отримання біоетанола із кукурудзи – перспективної сільськогосподарської культури з біологічно цінним хімічним складом [6].

Вторинним продуктом при виробництві біоетанола є післяспиртова суха барда [1], яка являє собою сировину, що у своєму складі містить білки, жири, вуглеводи, а також незамінні амінокислоти. Звідси і виникає пошук шляхів її використання в якості альтернативної сировини в технології хлібопекарської промисловості, оскільки хліб – це найбільш повсякденно вживаний продукт харчування серед населення.

Вирішення проблеми, яка є нагальною – це консервування нативної післяспиртової барди для подальшого її використання в харчових продуктах. При цьому переваги сушеної післяспиртової барди перед нативною є такими:
- можливість транспортування на великі відстані;
- тривалий термін зберігання сушеної післяспиртової барди;
- використання в технології виробництва хліба;
- використання як білкової добавки.

© Н. Л. ЛОБАЧОВА, С. М. САБАДАШ, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Крім того, утилізуючи барду не тільки забруднюється навколишнє середовище, а й разом нераціонально використовуються харчові ресурси такого цінного продукту.

Мета роботи

Метою роботи є розробка технології житньо – пшеничного хліба з використанням порошкоподібної кукурудзяної барди.

Для досягнення мети поставлено та вирішено наступні задачі:

- визначення органолептичних, хімічних та мікробіологічних показників післяспиртової барди кукурудзяної (ПСБК) для обґрунтування її використання в технології хліба;
- визначення впливу ПСБК, яка використовується в якості рецептурного компоненту тіста, на якість житньо-пшеничного хліба;
- розробка технології біологічних житніх заквасок з використанням ПСБК в якості джерела молочнокислих бактерій та біостимулятора життєдіяльності мікрофлори заквасок.

Викладення основного матеріалу

На сьогодні як у Сумському регіоні, так і загалом в Україні для підприємств спиртової промисловості залишається не вирішеним питання переробки відходів спиртового виробництва. У процесі одержання спирту утворюється значна кількість відходів виробництва – післяспиртова барда, яка, потрапляючи в навколишнє середовище, спричиняє його забруднення. Разом із тим барда має достатньо високу харчову цінність, оскільки в її складі міститься білок зерна. У сільському господарстві багатьох країн широко застосовують продукти переробки барди, тоді як в Україні її використовують частково або взагалі зливають на поля фільтрації. Це недоцільно і незручно, оскільки післяспиртова барда починає псуватися вже через декілька годин після її виробництва. Разом із тим сушена післяспиртова барда з вологістю 10–11% може зберігатися кілька років. Крім того, післяспиртову барду використовують у виробництві хліба та як харчову добавку з біологічно активними речовинами [2–4].

Післяспиртової барди являє собою сировину, що містить білки, жири, вуглеводи (рис. 1) та незамінні амінокислоти. Отже, у наслідок утилізації після спиртової барди не тільки забруднюється довкілля, а й нераціонально використовуються харчові ресурси такого цінного продукту.

Промислове виробництво етилового спирту побудовано на принципах відхідної технології, що негативно впливає на стан навколишнього середовища.

У наш час одним із резервів зростання ефективності харчових виробництв є підвищення стабільності виробництва і, як наслідок, зменшення втрат сировини і готової продукції [12,]за умови забезпечення стабільної якості протягом усього технологічного циклу. В основу дослідження цього напряму покладено теорію технологічного потоку [10,11], яка дозволяє створити стійкі, точно функціонуючі технологічні системи [6].

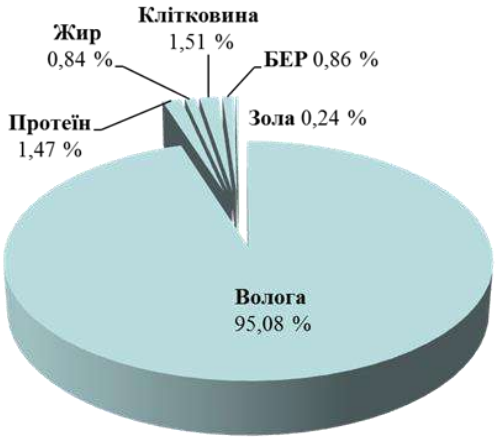


Рис. 1 – Харчовий потенціал післяспиртової барди

Значно підвищити ефективність, рентабельність роботи конкретного виробництва на підприємстві можна не тільки завдяки технічному переоснащенню, а й унаслідок більш чіткої організації - як системи взаємозв'язку режимів функціонування обладнання і технології [12-14].

Сьогодні у світі розповсюджені різноманітні лінії для виробництва із післяспиртової барди сушеної білкової добавки з вологістю 10%. Однак головним недоліком цих ліній є складність і металоємкість виробництва через використання сушарок переважно роторно-барабанних, що обумовлює високі експлуатаційні витрати. Отже, виникає необхідність в організації переробки післяспиртової барди із застосуванням технологічної лінії зі стійким потоком із меншими витратами.

Працями вчених О.В. Афанасьєва, Л.Н. Казанська, Е.І. Кваснікова, М.І. Княгиніна, Л.І. Кузнецова, Л.Н. Пащенко, М.Н. Тульчинський, G. Spicher, H. Stephan та ін. показано домінуючий вплив складу мікрофлори та поживного середовища на колоїдні, біохімічні та мікробіологічні процеси в житніх напівфабрикатах, які обумовлюють вплив на реологічні властивості, характерний смак, запах, властивості м'якушки хліба.

Аналіз тенденції розвитку виробництва хліба з житнього борошна та суміш його з пшеничним говорить про те, що в сучасних умовах дискретного режиму роботи підприємства актуальним є застосування прогресивних маловідходних і ресурсозберігаючих технологій, в тому числі, порошкоподібних, в розробку яких великий внесок

зробили Р.Д. Поландова, Л.І. Пучкова, Л.П. Пащенко та Т.Б. Циганова [7].

Таким чином, виходячи із результатів аналізу інформаційних джерел, підтверджується пошук технологічних рішень в напрямку використання барди після спиртової кукурудзяної у технології хлібобулочних виробів. На основі вищесказаного можна відмітити доцільність інновації в технології хліба з житньо-пшеничного борошна з використанням ПСБК.

Таблиця 1 - Органолептичні показники ПСБК

Назва показника	Значення
Зовнішній вигляд	Однорідний розсипний продукт із невеликою кількістю комочків;
Колір	Від яскраво – жовтого до коричневого, рівномірний по всій масі;
Запах	Хлібно - дріжджовий, властивий сировині, із якої виробляють барду суху, без затхлого, пліснявого та інших сторонніх запахів

Обговорення результатів

На сьогоднішній день, кожна розробка нової технології повинна мати в основі чітко прописаний план її створення: суть інновації, характер розробленої технології та характер ринку.

Для прогнозування використання ПСБК в технології хлібобулочних виробах досліджували її органолептичні, фізико-хімічні та мікробіологічні показники (табл. 1, 2, 3) [5].

Визначення зовнішнього вигляду, кольору, запаху проводили згідно з ГОСТ 13496.13. Зовнішній вигляд, колір барди сухої визначали органолептично: 100 г випробувального продукту розміщували на гладку чисту поверхню аркуша білого паперу і, перемішуючи, розглядали при природному світлі. Визначення масової частки вологи згідно з ДСТУ ISO 6496; визначення масової частки сирого протеїну згідно з ДСТУ ISO 5983; масову частку сирого жиру визначають згідно з ГОСТ 13496.15; визначення масової частки клітковини згідно з ДСТУ ISO 6865; визначення масової частки сирої золи згідно з ДСТУ ISO 5984; визначення крупності згідно з ГОСТ 13496.8.

Пробні лабораторні дослідження проводили в лабораторії технології харчування університету.

Замішування тіста здійснювали прискореним способом. В якості кислотовмісного компоненту рецептури використовували післяспиртову барду кукурудзи (ПСБК), в кількості 2,5, 5,0, 7,5, 10,0 та 12,5% від загальної маси борошна за рецептурою. Аналіз хліба проводили через 16-18 год після випікання за органолептичними і фізико-хімічними показниками.

Таблиця 2 - Фізико - хімічні показники

Найменування показника	Значення
Масова частка вологи, %	10
Масова частка сирого протеїну %,	24
Масова частка сирого жиру %,	6,69
Масова частка сирої клітковини %,	12,14
Масова частка сирої золи %,	3,43
БЕР*, %	43,74
Крупність: для розсипного продукту залишок на ситі із отвором діаметром 5 мм	Не допускається
Розміри гранул, мм	0,5
Залишок на ситі з отвором 2 мм, %	5,0
Кислотність, град. Н	4,2

Таблиця 3 - Мікробіологічні показники

Назва показника	Значення
Загальна бактеріальна забрудненість	500 тис. мікробних клітин у 1 г барди сухої
Вміст патогенної мікрофлори:	
сальмонели у 25 г барди сухої	Не допускається
ентеропатогенні штами кишкової палички (E.Coli) у 1 г барди сухої	Не допускається
токсиноутворюючі анаероби у 1 г барди сухої	Не допускається

Отримані результати показали недоцільність використання ПСБК в якості рецептурного компонента тіста з прискореною технологією хліба, оскільки використання 2,5-12,5% ПСБК хоча і забезпечує високі фізико-хімічні показники якості хліба (питомий об’єм, формостійкість та структурно-механічні властивості м’якушки), але за органолептичними показниками хліб житньо-пшеничний не відповідає вимогам згідно ДСТУ4583:2006. При додаванні 2,5% ПСБК смак хліба був прісним, м’якушка крихкою, при додаванні 5,0-7,5% - покращувався смак і запах хліба, але м’якушка була дуже крихкою, 10,0-12,5% дозволяло надати м’якушці хліба меншої крихкості, проте смак виробів був кислуватий.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

За рахунок того, що у виробництві хліба із суміші житнього та пшеничного борошна необхідно використовувати напівфабрикат – біологічно житніх заквасок або харчових добавок – підкислювачів, які включають кислотовмісну сировину, подальші дослідження проводилися в напрямку розробки технологій житніх заквасок[8].

Таким чином, враховуючи низьку собівартість ПСБК, дослідження були зорієнтовані на розробку житніх напівфабрикатів, які не вимагають тривалого безперервного культивування, що є перспективою для хлібопекарських підприємств малої потужності.

Технологію житніх заквасок розробляли в наступному порядку: підбирали умови культивування МКБ ПСБК на поживному середовищі з житнім борошном без додавання хлібопекарських дріжджів та без їх введення, в результаті були розроблені технології житніх заквасок однофазного приготування [9], визначали властивості густої житньої закваски з ПСБК, яка готується за схемою, що передбачає накопичення маси закваски в розводному циклі та її введення у виробничий цикл.

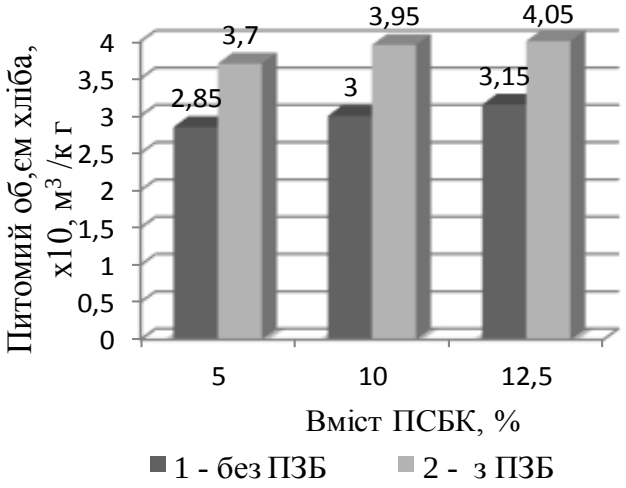


Рис. 2 – Вплив добавки на питомий об'єм хліба

Зразки хліба характеризуються гарним смаком і запахом, розвиненою пористістю, що є властивим житньо-пшеничному хлібу. Вироби не мали сторонніх присмаків та запахів, м'якушка – не гливка, не волога, еластична.

Висновки

На основі проведених досліджень зроблені певні висновки

Теоретично обґрунтовано можливості використання ПСБК, в якості біологічно цінної сировини у виробництві хлібопекарської промисловості. На основі досліджень органолептичних, фізико-хімічних та мікробіологічних показників ПСБК обґрунтовано перспективність її використання в технології житньо-пшеничного хліба.

Встановлено вплив ПСБК в якості рецептурного компонента тіста. Доведено, що використання ПСБК в кількості більше 10% від маси борошна - хліб набуває дріжджового запаху, який притаманний барді, при введені в кількості менше 10% - запах барди відсутній, але хліб має крихкий м'якуш. Отримані дані свідчать за недоцільність використання ПСБКв якості рецептурного компонента тіста із житньо-пшеничного борошна.

Встановлено, що використання ПСБК в технології приготування житніх заквасок, у виробництві житньо-пшеничного хліба, забезпечує виробництво продукції високої якості, яка відповідає вимогам нормативної документації.

Реалізація даної технології дозволить здешевити продукт, збагатити його високоцінним білковим та вітамінним комплексом, не погіршуючи смакових та реологічних властивостей, а це великі перспективи розвитку хлібопекарської галузі.

Список літератури

1. **Sazhin, B. S.** Scientific Principles of Drying Technology / **B. S. Sazhin, V. B. Sazhin** – New York, 2007.
2. **Пат. на изобретение RUS 2472356**. Пищевой продукт и способ обработки сухой зерновой барды, используемой для получения пищевого продукта / **Березин А. О., Сырчина Н. В., Одинцов Н. И.** – Заявл. 18.10.2011; опубл. 20.01.2013.
3. **Пат. на изобретение RUS 2533155**. Пищевой продукт с пищевой добавкой и способ ее получения / **Одинцов Н. И., Кулемин Л. М., Бойко Е. Р.** – Заявл. 08.02.2013; опубл. 20.11.2014.
4. **Пат. на изобретение RUS 2410874**. Способ приготовления закваски для производства хлеба / **Аширова Ю. А., Циганова Т. Б.** – Заявл. 11.08.2009; опубл. 10.02.2011.
5. **Сабадаш, С. М.** Розробка процесу сушіння післяспиртової барди на інертних тілах і вивід критеріальної залежності / **С. М. Сабадаш, О. Р. Якуба, Д. Д. Казаков** // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2015. – № 1. – С. 65-70.– doi:10.15587/1729-4061.2015.38056.
6. **Togrul, H**. Suitable Drying Model for Infrared Dryingof Carrot / **H. Togrul** // *Journal of Food Engineering*. – 2006. – Vol. 77, issue 3. – P. 610–619.
7. **Аширова, Ю. А.** Использование послеспиртовой барды из топинамбура в технологии хлеба / **Ю. А. Аширова** // *Хлебопродукты*. – 2009, №10 – с. 46-47.
8. **Цыганова, Т. Б.** Разработка технологии сухого кислотосодержащего продукта на основе ржаной закваски с послеспиртовой барды из топинамбура / **Т. Б. Цыганова, Ю. А. Аширова** // Инновации направления в пищевых технологиях / *Материалы III международной научно-практической конференции* / Пятигорск, РИА-КМВ, 2009 – с. 273-276.
9. **Цыганова, Т. Б.** Альтернативное сырье в технологи ржаных полуфабрикатов / **Т. Б. Цыганова, Ю. А. Аширова** // Сборник научных статей / *Международный научно - образовательный форум «Формирование отраслевой инновационной среды на основе развития*

профессиональных сообществ и саморегулируемых организаций АПК, пищевой промышленности и индустрипитания» / М.: МГУТУ, 2009. – с. 202-205.
10. **Doymaz, J.** Convective Air Drying Characteristic of Thin Layer Carrots [Text] / **J. Doymaz** // *Journal of Food Engineering*. – 2004. – Vol. 61, Issue 3. – P. 359. – doi: 10.1016/s0260-8774(03)00142-0.
11. **Cherevko, A.** Modelling of thermal flow distribution in the infrared dryer / **A. Cherevko, L. Kiptelaya, A. Zagorulko** // *The Advanced Science Journal*. – 2014. – Issue 9. – P. 183−186.
12. **Hatamipour, M. S.** Shrinkage of Carrots during Drying in an Inert Medium Fluidized Bed [Text] / **M. S. Hatamipour, D. Mowla** // *Journal of Food Engineering*. – 2003. – Vol. 55, Issue 3. – P. 247–252. – doi: 10.1016/s0260-8774(02)00082-1.
13. **Togrul, H.** Suitable Drying Model for Infrared Drying of Carrot [Text] / **H. Togrul** // *Journal of Food Engineering*. – 2006. – Vol. 77, Issue 3. – P. 610–619. – doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.07.020.
14. **Abe, T.** Thin Layer Infrared Radiation Drying of Rough Rice [Text] / **T. Abe, T. M. Afzal** // *Journal of Agricultural Engineering Research*. – 1997. – Vol. 67, Issue 4. – P. 289–297. – doi: 10.1006/jaer.1997.0170.

Bibliography (transliterated)

1. **Sazhin, B. S., Sazhin, V. B.** Scientific Principles of Drying Technology , New York, 2007.
2. **Pat. aninvention RUS 2472356**. Food product and a method of treating dry grain stillage used for food / **Berezin A. O, Syrchina N. V, Odintsov N. I** - Stated. 18.10.2011; publ. 20.01.2013.
3. **Pat. aninvention RUS 2533155**. Food product with a food additive and a method for obtaining / **Odintsov N. I, Kulemin L. M, Boiko E. R** - Zayavl. 08.02.2013; publ. 20/11/2014.
4. **Pat. aninvention RUS 2410874**. A method for preparingth eleaven for bread **/ Ashirova Y. A, Tsiganova T. B** - Stated. 11.08.2009; publ. 10.02.2011.
5. **Sabadash, S. M.** Development of the drying process of DDGS on inert bodies and withdrawal criteria dependence / **S. M. Sabadash**, **A. R. Jacoba**, **D. D. Kazakov** // East European journal of advanced technologies , 2015, № **1**, P. 65-70. – doi:10.15587/1729-4061.2015.38056.
6. **Togrul, H**. Suitable Drying Model for Infrared Drying of Carrot // *Journal of Food Engineering*, 2006 , Vol. **77**, issue 3 , P. 610–619.
7. **Ashirova, Y. A.** The use of DDGS from Jerusalem artichoke in bread technology // *Bakery*. 2009, **№10,** p.46-47.
8. **Tsyganov, T. B., Ashirova, Y.A.** Development of the technology of dryan acid-based product ryesour dough with DDGS from artichoke // Innovation trendsin food technologies / *Materials of III international scientific-practical conference* / Pyatigorsk, RIA-CMS, 2009, p. 273-276.
9. **Tsyganova, T. B., Ashirova, J. A.** Alternative raw materials in the technology of rye prepared // Collection of scientific articles / *International scientific - educational forum "Formation of innovation environment on the basis of the development of professional communities and self-regulatory agribusiness organizations, food industry and industrietore"* / M: MGUTU, 2009 , pp. 202-205.10.
10. **Doymaz, J.** Convective Air Drying Characteristic of Thin Layer Carrots [Text] // *Journal of Food Engineering* , 2004 , Vol. **61**, Issue 3, P. 359. – doi: 10.1016/s0260-8774(03)00142-0.
11. **Cherevko, A., Kiptelaya, L., Zagorulko, A.** Modelling of thermal flow distribution in the infrared dryer // *The Advanced Science Journal*, 2014, Issue **9**, P. 183−186.
12. **Hatamipour, M. S., Mowla D.** Shrinkage of Carrots during Drying in an Inert Medium Fluidized Bed [Text] // *Journal of Food Engineering* , 2003 , Vol. **55**, Issue 3 , P. 247–252. – doi: 10.1016/s0260-8774(02)00082-1.
13. **Togrul, H.** Suitable Drying Model for Infrared Drying of Carrot [Text] // *Journal of Food Engineering*, 2006, Vol. **77**, Issue 3, P. 610–619. – doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.07.020.
14. **Abe, T**., **Afzal, T. M.** Thin Layer Infrared Radiation Drying of Rough Rice [Text] // *Journal of Agricultural Engineering Research* , 1997 , Vol. **67**, Issue 4 , P. 289–297. – doi: 10.1006/jaer.1997.0170.

Відомості про авторів (About authors)

Лобачова Надія Леонідівна - кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет, доцент кафедри технології харчування, м. Суми, Україна; email: nadezh.da@ukr.net.

Nadiia Lobachova – Ph.D.**,** Docent, Sumy National Agrarian University, Docent Department of Food Technology, Sumy, Ukraine, nadezh.da@ukr.net.

Сабадаш Сергій Михайлович - кандидат технічних наук, старший викладач, Сумський національний аграрний університет, старший викладач кафедри інженерних технологій харчових виробництв, м. Суми, Україна; email: s.v.sabadash@ukr.net.

Sergiy Sabadash - Ph.D., senior lecturer, Sumy National Agrarian University, senior lecturerof Department of engineering technology of food production,Sumy, Ukraine, s.v.sabadash@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лобачова, Н. Л. Використання барди у технології виробництва житньо-пшеничного хліба / **Н. Л. Лобачова, С. М. Сабадаш** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229) . – С. 181-186. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.25.

Please cite this article as:

Lobachova, N., Sabadash, S. Bards use in production technologies rye-wheat bread. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 181–186, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.25.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Лобачева, Н. Л. Использование барды в технологии производства ржано-пшеничного хлеба / **Н. Л. Лобачева, С. М. Сабадаш** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ» .– 2017. – № 7 (1229) . – С. 181-186. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.25.

АННОТАЦИЯ *Вторичным продуктом при производстве биоэтанола является послеспиртовая сухая барда, которая представляет собой сырье, в своём составе содержит белки, жиры, углеводы, а также незаменимые аминокислоты. Отсюда и возникает поиск путей ее использования в качестве альтернативного сырья в технологии хлебопекарной промышленности, поскольку хлеб – это наиболее повседневноиспользуемый продукт питания среди населения.*

В статье проанализировано современное состояние и перспективность переработки послеспиртовой барды – вторичного продукта при производстве биоэтанола из кукурузы, обоснованно и исследованы пути ее использования в хлебопекарной промышленности. Приведен пищевой потенциал продукта. Для проведения научно-исследовательских работ по сушке послеспиртовой барды был разработан технологический процесс и технология ржано - пшеничного хлеба на заквасках. Исследован состав микрофлоры ржаных заквасок и их роль у формировании качества хлеба.

Ключевые слова*: послеспиртовая барда; кукуруза; биоэтанол; белок; закваска; хлеб*

Поступила(received) 05.03.2017

УДК 641.85:637.147 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.26

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІН ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІЛКОВО-ВУГЛЕВОДНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ ДЛЯ ЗБИТОЇ ДЕСЕРТНОЇ ПРОДУКЦІЇ ПРИ ЗБЕРІГАННІ

Р. П. НИКИФОРОВ

Кафедра технології в ресторанному господарстві та готельної і ресторанної справи, Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг, УКРАЇНА
email: technol@donnuet.edu.ua

АНОТАЦІЯ *У статті наведено результати дослідження піноутворювальної здатності, стійкості піни, ефективної в'язкості та напруги зсуву в свіжовироблених білково-вуглеводних напівфабрикатах для збитої десертної продукції та при їх зберіганні впродовж трьох діб. Встановлено, що при зберіганні відбувається тиксотропне відновлення структури, зростання ефективної в'язкості зразків, яке призводить до зниження піноутворювальної здатності, стійкості піни та поступового укріплення структури напівфабрикатів.*
Ключові слова: *знежирене молоко; кизил; терн; піноутворювальна здатність; стійкість піни; напруга зсуву; ефективна в'язкість; білково-вуглеводний напівфабрикат; збита десертна продукція*

STUDY OF CHANGE OF FUNCTIONAL AND TECHNOLOGICAL, STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALBUMINOUS-CARBOHYDRATE SEMIFINISHED ITEM FOR THE WHIPPED DESSERT PRODUCTION AT STORAGE

RADION NYKYFOROV

Department of technology in the restaurant sector and the hotel and restaurant business, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Kryvyi Rih, UKRAINE

ABSTRACT *There are the results of the study of the dynamics of change in functional technological and structural and mechanical properties of protein-carbohydrate semis for whipped dessert products during storage in the article. Currently semis for whipped dessert products have high popularity among consumers. So today many types of this production are developed. The authors are developed albuminous-carbohydrate semifinished item based skim milk, cornelian cherry routine, sloe which does not contain food additives. For determination of its quality it is investigated form froth ability, stability of foam, shear stress, effective viscosity. Form froth ability, stability of foam are determined Lurie traditional method, shear stress, effective viscosity are defined on the device "Rheotest 2". Albuminous-carbohydrate semifinished item is higher values form froth ability, stability of foam than traditional mousse. It is established at storage at 4±2°C for 72 hours there is a growth of the effective viscosity which leads to decrease the form froth ability, stability of foam. It is established that during storage due albuminous-carbohydrate complex formation there is a gradual strengthening of the structure and growth of the initial tension of shift. The results of mathematical processing of experimental data built rheological curves, therefore it is determined that albuminous-carbohydrate semifinished item is nonideal solid plastic body with the maximum tension of shift and begin to flow almost immediately after application of tension. Also at storage there is thixotropic semi restoration of the structure that is confirmed by reduction of the hysteresis loop area.*
Keywords*: skim milk; cornelian cherry routine; sloe; form froth ability; stability of foam; shear stress; effective viscosity; albuminous-carbohydrate semifinished item; whipped dessert production*

Вступ

В умовах урбанізації з кожним роком все більшого прояву набуває загальносвітова тенденція зведення до мінімуму витрат людством часу на виготовлення їжі. Ця тенденція проявляється як у збільшенні мережі закладів ресторанного господарства, так і в зростанні попиту на продукти та вироби, які вимагають мінімального часу для приготування, в тому числі, на різноманітні напівфабрикати. Цей факт спричинив розвиток індустрії виробництва напівфабрикатів різного ступеня готовності [1].

Серед широкого асортименту харчової продукції особливим попитом у споживачів користується збита десертна продукція: муси, самбуки, збиті десерти тощо [2].

Розробка збитої продукції, що містить порожнечу у вигляді пухирців газу, на Заході сьогодні вважається найбільш актуальною через невичерпність і низьку вартість ресурсу «порожнечі» [3,4].

Стрімке зростання попиту на збиту десертну продукцію та напівфабрикати для її виготовлення визначає доцільність розробки нових видів напівфабрикатів з удосконаленими функціонально-технологічними властивостями та підвищеною харчовою цінністю.

Відмінною рисою цієї групи продукції є трудомісткість і багатостадійність технологічного процесу виробництва, необхідність використання

© Р. П. НИКИФОРОВ, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

харчових добавок [5, 6] та спеціального обладнання, що зумовлює неоднорідність якості та стримує розширення асортименту збитих десертів [6].

Ця проблема може бути вирішена за рахунок використання напівфабрикатів, що можна переробляти в збиту десертну продукцію без застосування спеціального обладнання та харчових добавок [2, 9].

Аналіз продовольчого ринку України показує, що сьогодні асортимент напівфабрикатів для збитої десертної продукції обмежений та представлений лише сухими концентратами іноземного виробництва або сумішами для фризерованої продукції. Поряд з цим, спостерігається стрімке зростання виробництва та споживання збитої продукції на молочній та рослинній основі, для утворення та стабілізації котрої використовуються як харчові добавки, так і рослинна сировина [2, 5...8].

Просування на український ринок даної продукції та виробництво нових видів напівфабрикатів стримується недостатнім рівнем фундаментальних та прикладних досліджень, пов'язаних, головним чином, із процесами утворення та стабілізації збитої структури білково-вуглеводних систем. Це викликає необхідність проведення наукових та прикладних досліджень, спрямованих на пошук шляхів реалізації функціонально-технологічних властивостей рецептурних компонентів, зокрема, білкових речовин знежиреного молока та пектинових речовин рослинної сировини, що дозволить отримати збиту десертну продукцію без значного застосування харчових добавок.

Попередніми дослідженнями [9, 10] було обгрунтовано та розроблено технологію напівфабрикату для збитої десертної продукції, що виготовляється на основі знежиреного молока (ЗМ) та ягідного пюре (кизилового або/та тернового).

Особливістю даного білково-вуглеводного напівфабрикату (БВН) є максимальна реалізація в межах технологічного процесу виробництва функціонально-технологічних властивостей (ФТВ) компонентів сировини, що дозволяє отримати збиту десертну продукцію без додаткового застосування піно- та структуроутворювальних добавок [11].

Сутність розробленої технології полягає в осаджені білкових речовин ЗМ за рахунок власних кислот ягідних пюре, переведені білкових речовин отриманого згустку в розчинний стан, переведені пектинових речовин ягідних пюре в розчинний стан та наступному змішування модифікованих продуктів-носіїв функціонально-технологічних речовин – згустку та пюре.

Технологічний процес виробництва БВН передбачає послідовне виконання таких операцій [12]:
- приймання та зберігання ЗМ та рослинної сировини;
- механічна кулінарна обробка рослинної сировини;
- ГТО ягід кизилу та терну при температурі 85…92°С впродовж 60…180 с;
- протирання ягід при температурі 80±2°С та охолодження пюре до температури застосування;
- термообробка пюре в присутності води при температурі 80…82°С впродовж (10…12)·60 с;
- термообробка пюре в присутності сироватки при температурі 80±2°С впродовж (30...35)·60 с;
- подрібнення пюре до розміру часток $(0,5…0,7)\cdot10^{-3}$ м;
- нагрівання ЗМ до температури 91…93°С впродовж 10·60 с та наступне його охолодження до 80…82°С;
- внесення 3,3% пюре кизилу або 3,8% пюре терну з температурою 80...82°С;
- коагуляція білкових речовин при температурі 91,2…92,1°С впродовж (12,8…15,2)·60 с;
- охолодження до температури 12…14°С;
- відфільтровування згустку та самопресування;
- термообробка білково-вуглеводного згустку при температурі 80±2ºС впродовж (10…12)·60 с з додаванням 0,9% розчину фосфату та 8,0% цукру;
- змішування білково-вуглеводного згустку та модифікованого ягідного пюре при температурі 60…70°С;
- охолодження до температури 4±2°С, фасування та упакування.

Отриманий БВН, що може зберігатися при температурі 4±2°С до 72 годин, за рахунок наявності поверхнево-активного казеїнату натрію та стабілізуючих властивостей пектину може бути використаний як напівфабрикат для отримання широкого асортименту збитої десертної продукції (ЗДП) – збиті десерти, муси, самбуки тощо, без додаткового застосування піно- та структуроутворювальних добавок.

Розуміючи, що при розробці технологій нової продукції велике значення має її якість, необхідним є проведення комплексного дослідження якості розроблених напівфабрикатів.

Мета роботи

Метою роботи є дослідження динаміки змін функціонально-технологічних та структурно-механічних властивостей білково-вуглеводних напівфабрикатів для збитої десертної продукції при зберіганні.

Виклад основного матеріалу

Показники функціонально-технологічних та структурно-механічних властивостей, поряд з показниками харчової, поживної і біологічної цінності, фізико-хімічних, органолептичних, санітарно-гігієнічних та інших властивостей напівфабрикатів, та ступень їх виразності, формують поняття якості продукції. Якість БВН за органолептичними та мікробіологічними показниками, а також їх хімічний склад та біологічну цінність, було досліджено попередньо [12].

Для визначення функціонально-технологічних та структурно-механічних властивостей БВН

використовували такі показники, як піноутворювальна здатність (ПУЗ), стійкість піни (СП), поверхневий натяг (σ), напруга зсуву (R) та ефективна в'язкість (η) [6, 7].

ПУЗ та СП зразків визначали традиційним методом Лур'є та розраховували, при визначені ПУЗ, як відношення об'ємів системи до та після збивання, та відношення початкової висоти піни до висоти піни після вистоювання – при визначені СП.

Дослідження реологічних параметрів зразків проводили на ротаційному віскозиметрі з коаксіальними гладкими циліндрами «РЕОТЕСТ 2». При дослідженнях використовували систему циліндрів S 2 з радіальним зазором $1{,}13 \cdot 10^{-3}$ м та співвідношенням радіусів 1,06. В зовнішній сталий циліндр радіусом $r_н$, який є вимірювальною ємністю, поміщали пробу об'ємом $(30 \pm 1{,}5) \cdot 10^{-3}$ дм^3. Внутрішній циліндр радіусом $r_в$ та висотою l, що обертається з постійною швидкістю ω, поєднано через вимірювальний вал з циліндричною пружиною, відхилення котрої є мірою обертаючого моменту M. Вимірювальну систему разом зі зразком термостатували впродовж 30·60 с та проводили вимірювання крутного моменту.

Обговорення результатів

Згідно до поставленої мети на першому етапі досліджували функціонально-технологічні властивості напівфабрикату в динаміці при зберіганні за такими показниками, як піноутворювальна здатність та стійкість піни. Для цього напівфабрикати нагрівали до температури 80…82°С, охолоджували та збивали. Отримані результати наведено на рис. 1.

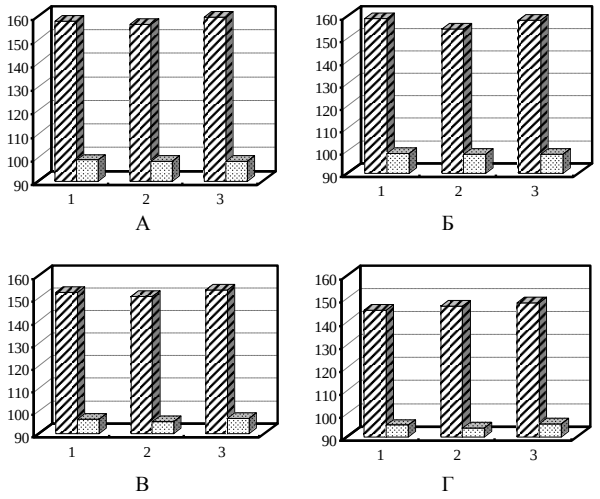


Рис. 1 – Дослідження ПУЗ та СП свіжовироблених зразків (А), після 24 годин зберігання (Б), після 48 годин зберігання (В), після 72 годин зберігання (Г) за температури 4±2°С:
▨, ▩ – відповідно ПУЗ та СП;
1 – кизиловий БВН, 2 – терновий БВН, 3 – кизилово-терновий БВН.

Динамічні дослідження ФТВ показали, що під час зберігання ПУЗ та СП напівфабрикатів зменшуються у незначному ступені. При цьому зменшення ПУЗ за 72 години зберігання склало 7,08…8,10%, а СП – 3,94…4,67%.

З метою порівняння ФТВ напівфабрикатів та традиційної ЗДП, визначали ПУЗ та СП мусу виготовленого за традиційною технологією (рецептура № 963), що склали: ПУЗ – 143,8%, СП – 55,5%.

Встановлено, що БВН мають вищі на 10,00…10,99% ПУЗ та на 77,66…78,38% СП, порівняно з мусом.

Не менш важливими показниками якості розроблених напівфабрикатів є їх структурно-механічні властивості. На рис. 2 представлено результати дослідження зміни ефективної в'язкості БВН в діапазоні швидкостей зсуву від 1,8 с$^{-1}$ до 243,0 с$^{-1}$ для свіжовироблених зразків та зразків, що зберігались за температури 4±2°С впродовж 24, 48 та 72 годин.

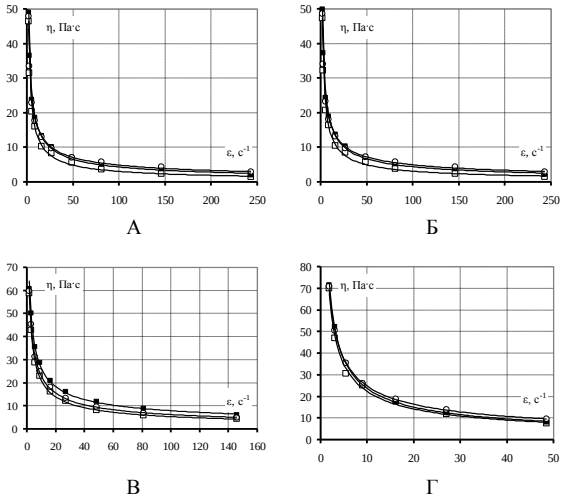
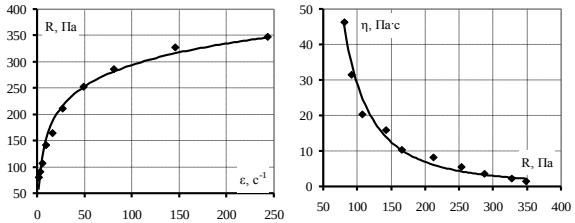


Рис. 2 – Залежність ефективної в'язкості (η) від швидкості зсуву (ε) свіжовироблених БВН (А), після 24 годин зберігання (Б), після 48 годин зберігання (В), після 72 годин зберігання (Г) за температури 4±2°С:
–□– – кизиловий БВН; –■– – терновий БВН;
–○– – кизилово-терновий БВН.

Результати досліджень зміни ефективної в'язкості БВН під час зберігання показують, що за час зберігання впродовж 72 годин в'язкість напівфабрикатів за швидкості зсуву 1,8 с$^{-1}$ збільшується на 45,92…50,59%. Це, на нашу думку, є причиною зменшення ПУЗ БВН при зберіганні. Враховуючи, що при зберіганні БВН були створені умови для запобігання випаровування вологи, підвищення в'язкості можна пояснити тим, що в БВН під час зберігання за рахунок молекулярних та міжмолекулярних зв'язків відбувається формування та поступове укріплення просторового каркасу.

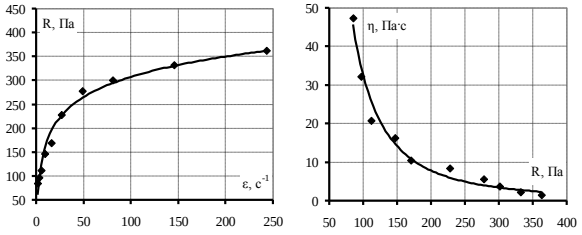
ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Враховуючи, що залежності ефективної в'язкості від ε для трьох видів БВН симбатні, надалі дослідження зміни структурно-механічних властивостей при зберіганні проводили тільки для кизилового БВН. За результатами математичної обробки експериментальних даних будували реологічні криві (рис. 3 – 6).



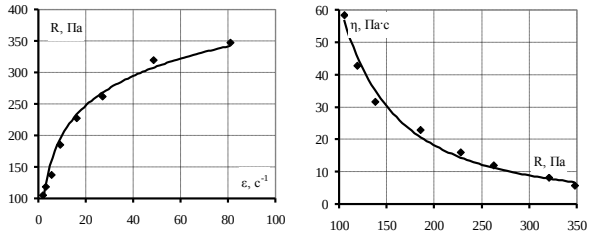
А Б

Рис. 3 – Реологічні криві свіжовиробленого кизилового БВН



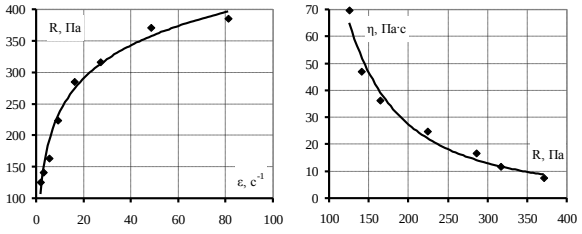
А Б

Рис. 4 – Реологічні криві кизилового БВН після 24 годин зберігання



А Б

Рис. 5 – Реологічні криві кизилового БВН після 48 годин зберігання



А Б

Рис. 6 – Реологічні криві кизилового БВН після 72 годин зберігання

З наведених реологічних кривих видно, що розроблені напівфабрикати належать до неідеально пластичних твердоподібних тіл, мають граничну напругу зсуву (ГНЗ), та починають текти не одразу після прикладання напруги.

За отриманими реологічними кривими для кожного зразка розраховували додаткові реологічні параметри (табл. 1).

Таблиця 1 – Зміна реологічних характеристик кизилового БВН при зберіганні

Зразок БВН	В'язкісні характеристики, Па·с			Міцнісні характеристики, Па	
	η_{max}	$\eta_{пл}$	$\eta_{пл}^*$	R_0	R_1
Свіжовироблений	46,35	0,02	5,59	240,7	75,5
Після 24 годин зберігання	47,30	0,02	5,96	248,3	79,7
Після 48 годин зберігання	58,55	0,09	8,15	252,9	85,2
Після 72 годин зберігання	69,80	0,14	13,50	260,6	98,7

З табл. 1 та рис. 3 – 6 видно, що для кизилового БВН за час зберігання впродовж 72 годин значення максимальної в'язкості η_{max}, що виміряна при мінімальній силі впливу на систему (ε=1,8 $с^{-1}$), збільшується на 50,59% з 46,35 Па·с до 69,80 Па·с.

Пластична в'язкість $\eta_{пл}$, що визначає в'язкість практично зруйнованої структури, за час зберігання БВН збільшується в 7,01 рази з 0,020 Па·с до 0,140 Па·с. Пластична в'язкість на ділянці повзучості $\eta_{пл}^*$ за час зберігання збільшується в 2,42 рази з 5,590 Па·с до 13,500 Па·с.

Поряд зі зростанням при зберіганні в'язкісних характеристик в зразках спостерігається підвищення міцності. Так, початкова напруга зсуву R_0, що визначає зусилля, за якого система гранично руйнується, при зберіганні БВН збільшується на 8,27%, а напруга зсуву на ділянці повзучості R_1, що визначає зусилля, за якого система починає руйнуватися, поступово зростає на 30,73%.

Таким чином, наведений аналіз реологічних параметрів та характер бінгамовської ділянки кривих ефективної в'язкості (рис. 3.Б – 6.Б) засвідчують, що при зберіганні відбувається не тільки зростання в'язкості, а й поступове укріплення структури, що може бути пояснено як за рахунок зміцнення просторового каркасу внаслідок білково-вуглеводного комплексоутворення, так і за рахунок перерозподілу вологи за формами зв'язку.

Для виявлення тиксотропних властивостей у зразків було проведено реологічні дослідження у свіжовиробленому кизиловому БВН (рис. 7) та після 72 годин зберігання за температури 4±2°С (рис. 8).

З цією метою спочатку отримували залежність $R=f(\varepsilon)$ при швидкості зсуву від мінімального значення до максимального за умови рівноважного зсуву, потім отримували відповідну залежність при зниженні зсувного зусилля від максимального до мінімального значення. Слід зазначити, що у зразків, які досліджувалися, через значне зростання в'язкісних та

міцнісних властивостей суттєво відрізняються виміряні діапазони швидкості зсуву. Так, для свіжовиробленого БВН швидкість зсуву, за котрої можна виміряти напругу зсуву, знаходиться в межах 1,8…243,0 $с^{-1}$. Для БВН після 72 годин зберігання діапазон швидкості був обмежений ε=81,0 $с^{-1}$, так як при переході на наступну ступінь швидкості стрілка індикатора приладу показувала значення, більші 100 одиниць. Тому, для оцінки тиксотропних властивостей БВН за співставлених параметрів враховували ділянку кривих зсуву в діапазоні швидкості зсуву 1,8...81 $с^{-1}$.

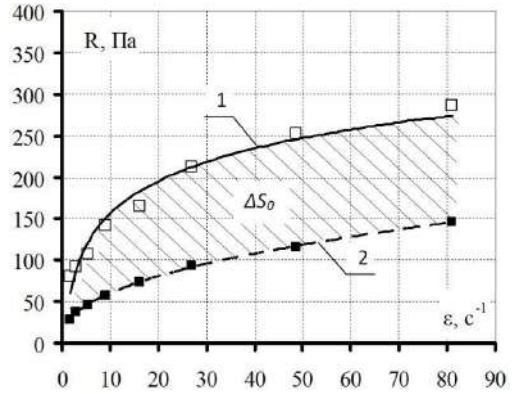


Рис. 7 – Гістерезис у свіжовиробленому кизиловому БВН:
–□– – крива руйнації структури (крива 1);
–■– – крива відновлення структури (крива 2).

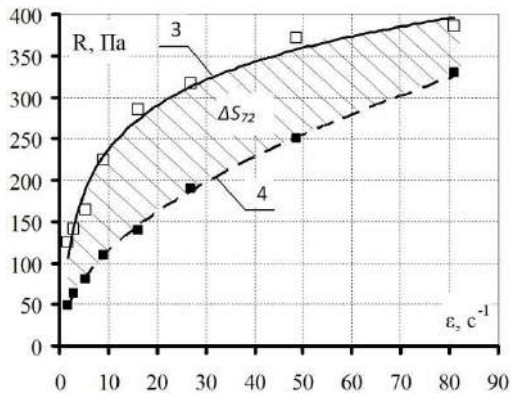


Рис. 8 – Гістерезис у кизиловому БВН після 72 годин зберігання:
–□– – крива руйнації структури (крива 3);
–■– – крива відновлення структури (крива 4).

Аналіз кривих зсуву показує, що за час зберігання ГНЗ зразків зростає. Так, значення ГНЗ для незруйнованої структури свіжовиробленого БВН знаходиться в межах 80,3 Па, а після 72 годин зберігання збільшується на 56,29% до 125,5 Па, що відповідає значенням ГНЗ для рідких паст.

Значення ГНЗ для відновленої структури свіжовиробленого БВН знаходиться в межах 29,1 Па, а після 72 годин зберігання збільшується до 49,0 Па, тобто на 68,38%, що відповідає значенням ГНЗ для структурованої рідини. Це можна пояснити тим, що при прикладанні до тіла деформації зусилля зсуву долає молекулярні та міжмолекулярні зв'язки між білками та вуглеводами БВН, які при знятті зусилля з часом відновлюються, але неповною мірою. Це вказує на наявність у зразків тиксотропних властивостей, що підтверджується наявністю у обох зразків петлі гістерезису.

Залежність напруги зсуву R від швидкості зсуву ε для обох зразків описується рівнянням зсуву псевдопластичної рідини. Для свіжовиробленого кизилового БВН рівняння зсуву незруйнованої структури (крива 1) має вигляд:

$$y_1 = -35{,}804 + 93{,}622 \cdot x^{0{,}285},\ R^2=0{,}993, \quad (1)$$

відновленої структури (крива 2):

$$y_2 = 1{,}355 + 21{,}795 \cdot x^{0{,}431},\ R^2=0{,}999. \quad (2)$$

Для кизилового БВН після 72 годин зберігання (крива 3) рівняння незруйнованої структури має вигляд:

$$y_3 = -1249{,}544 + 1320{,}599 \cdot x^{0{,}051},\ R^2=0{,}981, \quad (3)$$

а для відновленої структури (крива 4) рівняння приймає вид:

$$y_4 = 5{,}794 + 31{,}549 \cdot x^{0{,}530},\ R^2=0{,}999. \quad (4)$$

Для розрахунку площі петлі гістерезису проводили інтегрування виду $\int R\, d\varepsilon$ рівнянь 1–2 та 3–4. Площу петлі гістерезису свіжовиробленого кизилового БВН ΔS_0 розраховували як різницю між підінтегральними площами S_1 та S_2. Для БВН після 72 годин зберігання площа петлі гістерезису ΔS_{72} дорівнює різниці між підінтегральними площами S_3 та S_4. Результати розрахунку наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Розрахунок площі петлі гістерезису БВН при зберіганні

N	Рівняння зсуву ($y = R$, $x = \varepsilon$)	Результат розрахунку $\int R\, d\varepsilon$	Площа петлі гістерезису
1	$y_1 = -35{,}804 + 93{,}622 \cdot x^{0{,}285}$	S_1 = 17667,73	ΔS_0 = 9405,91
2	$y_2 = 1{,}355 + 21{,}795 \cdot x^{0{,}431}$	S_2 = 8261,82	
3	$y_3 = -1249{,}544 + 1320{,}599 \cdot x^{0{,}051}$	S_3 = 25893,04	ΔS_{72} = 8354,76
4	$y_4 = 5{,}794 + 31{,}549 \cdot x^{0{,}530}$	S_4 = 17538,28	

З наведених розрахунків видно, що площа петлі гістерезису для кизилового БВН після 72 годин зберігання зменшується на 11,18%, що вказує на зростання при зберіганні здатності до тиксотропного відновлення структури.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

На нашу думку, отримані залежності можна пояснити білково-вуглеводним комплексоутворенням.

Для тернового та кизилово-тернового БВН криві зсуву описуються аналогічними залежностями.

Висновки

Таким чином, дослідження параметрів функціонально-технологічних та реологічних властивостей білково-вуглеводних напівфабрикатів для збитої десертної продукції при зберіганні за температури 4±2°С впродовж 72 годин показали зростання ефективної в'язкості на 45,92…50,59%, що призводить до зниження ПУЗ на 7,08…8,10%, СП – на 3,94…4,67%. Встановлено, що при зберіганні за рахунок білково-вуглеводного комплексоутворення відбувається поступове укріплення структури, при цьому початкова напруга зсуву R_0 зростає на 8,27%, а напруга зсуву на ділянці повзучості R_1 – на 30,73%. Також відбувається тиксотропне відновлення структури напівфабрикатів, що підтверджується зменшенням на 11,18% площі петлі гістерезису.

Перспективами подальших досліджень у цьому напрямку є встановлення напрямків використання розроблених напівфабрикатів у виробництві кулінарної продукції та розробка широкого асортименту збитої десертної продукції на їх основі.

Список літератури

1 **Маюрникова, Л. А.** Создание молочных десертов профилактического назначения / **Л. А. Маюрникова, Н. Ю. Латков** // *Хранение и переработка сельхозсырья*. – 2004. – № 3. – С. 60–62.

2 **Горальчук, А. Б.** Наукове обґрунтування технологій напівфабрикатів збивних для кулінарної та кондитерської продукції з поліфазною структурою : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : 05.18.16 / **А. Б. Горальчук**. – Х., ХДУХТ, 2016. – 42 с.

3 **Kynin, A.** Creation of «emptiness» in materials [Електронний ресурс] / **A. Kynin**. – Режим доступу: http://www.metodolog.ru/00129/00129.html. – Заголовок з екрану.

4 **Wilde, P.** Proteins and emulsifiers at liquid interfaces / **P. Wilde, A. Mackie, F. Husband, P. Gunning, V. Morris** // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2004. – Vol. 108–109. – P. 63–71. – doi: 10.1016 / j.cis.2003.10.011.

5 **Denkov, N.** Mechanistic understanding of the modes of action of foam control agents / **N. D. Denkov, K. G. Marinova, S. S. Tcholakova** // *Adv Colloid Interface Sci*. – 2014. – Vol. 206. – P. 57-67. – doi: 10.1016/j.cis.2013.08.004.

6 **Dickinson, E.** Effect of sugars on the rheological properties of acid caseinate-stabilized emulsion gels / **E. Dickinson, L. M. Merino** // *Food Hydrocolloids*. – 2002. – Vol. 16, Issue 4. – P. 321–331. – doi: 10.1016/S0268-005X(01)00105-9.

7 **Kirsty, E. A.** Development of a model whipped cream: Effects of emulsion droplet liquid/solid character and added hydrocolloid / **E. A. Kirsty, B. S. Murray, E. Dickinson** // *Food Hydrocolloids*. – 2008. – Vol. 22, Issue 4. – P. 690–699. – doi: 10.1016/j.foodhyd.2007.01.017.

8 **Dickinson, E.** Interfacial Particles in Food Emulsions and Foams / **E. Dickinson** // *Cambridge University Press*. – 2006. –P. 298–327. – doi:10.1017/CBO9780511536670.009.

9 **Slashcheva, A.** Rationale for the use of protein-carbohydrate mix in the technology of disperse products / **A. Slashcheva, S. Popova, Yu. Korenets** // *EEJET. Technology and equipment of food production*. – 2016.- Vol. 2, – № 11(80). – P. 64-71. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.65789.

10 **Никифоров, Р.П.** Дослідження впливу білково-вуглеводного напівфабрикату на технологічні властивості дріжджового тіста, отриманого прискореним способом / **Р. П. Никифоров, С. Ю. Попова, А. В. Слащева, Ю. М. Коренець** // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016.* –№ 2/11 (80). – С. 24-32. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.64294.

11 Пат. 20069 Україна, МПК 2006 A23C 23/00, A23C 9/152. Спосіб одержання білково-рослинної основи для збитих солодких страв / **Р. П. Никифоров, В. А. Гніцевич, Г. Ф. Коршунова**. – № u200606861 ; заявл. 19.06.2006; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1. – 8 с.

12 **Никифоров, Р. П.** Дослідження якості нових видів напівфабрикатів для збитої десертної продукції / **Р. П. Никифоров** // *Обладнання та технології харчових виробництв* : Темат. зб. наук. праць / Гол. ред. О.О. Шубін. – Д.: ДонНУЕТ, 2011. – Випуск 26. – С. 218-223.

Bibliography (transliterated)

1 **Mayurnykova, L. A., Latkov, N. Yu.** Sozdanye molochnykh desertov profylaktycheskoho naznachenyya [Creation of milk desserts of preventive appointment]. *Khranenye y pererabotka sel'khozsyr'ya [Storage and processing of agricultural raw materials]*, 2004, **3**, 60–62.

2 **Horal'chuk, A. B.** Naukove obgruntuvannya tekhnolohiy napivfabrykativ zbyvnykh dlya kulinarnoyi ta kondyters'koyi produktsiyi z polifaznoyu strukturoyu *[Scientific justification of technologies of semi-finished products the zbivnykh for culinary and confectionery products with polyphase structure]* : avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya doktora tekhn. nauk : 05.18.16. – Kh., KhDUKhT, 2016, 42.

3 **Kynin, A.** Creation of «emptiness» in materials // [Web] http://www.metodolog.ru/00129/00129.html.

4 **Wilde, P., Mackie, A., Husband, F., Gunning, P., Morris, V.** Proteins and emulsifiers at liquid interfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2004, **108–109**, 63–71, doi: 10.1016 / j.cis.2003.10.011.

5 **Denkov, N.** Mechanistic understanding of the modes of action of foam control agents. *Adv Colloid Interface Sci*, 2014, **206**, 57-67, doi: 10.1016/j.cis.2013.08.004.

6 **Dickinson, E., Merino, L. M.** Effect of sugars on the rheological properties of acid caseinate-stabilized emulsion gels. *Food Hydrocolloids*, 2002, **16** (4), 321–331, doi: 10.1016/S0268-005X(01)00105-9.

7 **Kirsty, E. A., Murray, B. S., Dickinson, E.** Development of a model whipped cream: Effects of emulsion droplet liquid/solid character and added hydrocolloid. *Food Hydrocolloids*, 2008, **22** (4), 690–699, doi: 10.1016/j.foodhyd.2007.01.017.

8 **Dickinson, E.** Interfacial Particles in Food Emulsions and Foams. *Cambridge University Press*, 2006, 298–327, doi:10.1017/CBO9780511536670.009.

9 **Slashcheva, A., Popova, S., Korenets, Yu.** Rationale for the use of protein-carbohydrate mix in the technology of disperse products. *EEJET. Technology and equipment of*

food production, 2016, **2**, 11 (80), 64-71, doi: 10.15587/1729-4061.2016.65789.

10 **Nykyforov, R. P., Popova, S. Yu., Slashcheva, A. V., Korenets', Yu. M.** Doslidzhennya vplyvu bilkovo-vuhlevodnoho napivfabrykatu na tekhnolohichni vlastyvosti drizhdzhovoho tista, otrymanoho pryskorenym sposobom [Research of influence of a proteinaceous and carbohydrate semi-finished product on technological properties of the yeast dough received in the accelerated way]. *Vostochno-Evropeyskyy zhurnal peredovikh tekhnolohyy [East European magazine of advanced technologies]*, 2016, **2/11** (80), 24-32, doi: 10.15587/1729-4061.2016.64294.

11 **Nykyforov, R, Gnitsevich, V., Korshunova, G.** Pat. 20069 Ukraine, MPK 2006 A23C 23/00, A23C 9/152. Sposib oderzhannya bilkovo-roslynnoyi osnovy dlya zbytykh solodkykh strav [A way of receiving to a proteinaceous and vegetable basis for the shaken-up sweet dishes], 2006, **1**, 8.

12 **Nykyforov, R. P.** Doslidzhennya yakosti novykh vydiv napivfabrykativ dlya zbytoyi desertnoyi produktsiyi [Research of quality of new types of semi-finished products for the shaken-up dessert production]. *Obladnannya ta tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnytstv [Equipment and technologies of food productions]*, 2011, **26**, 218-223.

Відомості про авторів (About authors)

Никифоров Радіон Петрович – кандидат технічних наук, доцент, Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг, доцент кафедри технології в ресторанному господарстві та готельної і ресторанної справи; м. Кривий Ріг, Україна; e-mail: technol@donnuet.edu.ua.

Radion Nykyforov – Candidate of Technical Sciences, Docent, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Docent of the Department of technology in the restaurant sector and the hotel and restaurant bussiness, Kryvyi Rih, Ukraine; e-mail: technol@donnuet.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Никифоров, Р. П. Дослідження динаміки змін функціонально-технологічних та структурно-механічних властивостей білково-вуглеводних напівфабрикатів для збитої десертної продукції при зберіганні / **Р. П. Никифоров //** *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 187-193. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.26.

Please cite this article as:

Nykyforov, R. Study of change of functional and technological, structural and mechanical properties of albuminous-carbohydrate semifinished item for the whipped dessert production at storage. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 187–193, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.26.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Никифоров, Р. П. Исследование динамики изменений функционально-технологических и структурно-механических свойств белково-углеводных полуфабрикатов для взбитой десертной продукции при хранении / **Р. П. Никифоров //** *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 187-193. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.26.

АННОТАЦИЯ *В статье приведены результаты исследования пенообразующей способности, устойчивости пены, эффективной вязкости и напряжения сдвига в свжеприготовленных белково-углеводных полуфабрикатах для взбитой десертной продукции и при их хранении в течение трех суток. Установлено, что при хранении происходит тиксотропное восстановления структуры, рост эффективной вязкости образцов, что приводит к снижению пенообразующей способности и устойчивости пены с постепенным укреплением структуры полуфабрикатов.*

Ключевые слова*: обезжиренное молоко; кизил; терн; пенообразующая способность; устойчивость пены; напряжение сдвига; эффективная вязкость; белково-углеводный полуфабрикат; взбитая десертная продукция*

Надійшла (received) 28.02.2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

УДК 54-12 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.27

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРЧОВИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ПЕКТИНУ. КВАНТОВО-ХІМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИМЕРІВ ГАЛАКТУРОНОВОЇ КИСЛОТИ

***С. І. ОКОВИТИЙ*[1], *Є. П. ПИВОВАРОВ*[2], *Н. В. КОНДРАТЮК*[3], *Є. А. ПОЛИВАНОВ*[3*], *М. О. БЕЛІЧЕНКО*[1]**

[1] кафедра органічної хімії, Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, Дніпро, УКРАЇНА
[2] кафедра технології харчування, Харківський державний університет харчування та торгівлі, Харків, УКРАЇНА
[3] кафедра харчових технологій, Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, Дніпро, УКРАЇНА
[*]email: your@email.com

АНОТАЦІЯ *Проведений аналіз літературних джерел з питань можливих механізмів гелеутворення у системі пектину з іншими полісахаридами. Методом РМ3 досліджено конформаційні властивості димерів галактуронової кислоти, що знаходяться у системі низькоетерифікованого амідованого пектину; розраховано величини теплових ефектів реакцій утворення найбільш стійких конформерів. Наводяться принципи хімічної взаємодії, що складають основу процесу утворення м'яких, еластичних та пружних гелів на основі різних видів пектину.*
Ключові слова: *квантово-хімічне моделювання; галактуронова кислота; метод РМ3; пектин*

RESEARCH OF FOOD SYSTEMS BASED ON PECTIN. QUANTUM-CHEMICAL MODELING OF GALACTURONIC ACID DIMERS

***S. OKOVYTYY*[1], *E. PIVOVAROV*[2], *N. KONDRATJUK*[3], *E. POLIVANOV*[3], *M. BELICHENKO*[1]**

[1] Department of organic chemistry, Dnepropetrovsk National University named after Oles Gonchar, Dnipro, UKRAINE
[2] Department of Food Technology, Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Kharkiv, UKRAINE
[3] Department of Food Technology, Dnepropetrovsk National University named after Oles Gonchar, Dnipro, UKRAINE

ABSTRACT *The article is devoted to the study of the mechanisms of gelation in the pectin system. This article discusses the principles of chain high-esterified and low-esterified pectin in the system of hydrocolloid. This takes into account peculiarities of chemical structure of polymer molecules and reactivity of functional groups involved in the gel-formation with different rheological properties. By semiempirical quantum-chemical PM3 method simulation studied the geometry, electronic structure of the dimers molecule of α-1,4-galacturonic acid with different functional groups (carboxyl, ester and amide) in the software package Gaussian 09. Calculated thermal effects of reactions of formation of dimers, torsion angles (φ and ψ). From the resulting database was determined as the most stable state of the dimers, constructed their contour maps of potential energy. On the basis of quantum-chemical modeling was described by the points possible binding chains of pectin. The research objectives were defined an attempt to assess the degree of participation of dimers of α-1,4 -galacturonic acid containing various functional groups in the mechanism of gelation that occurs in food pectin systems with a view to the possible participation of other uronic acids types. The results will allow a more detailed description of the technological parameters in the production of dietary polysaccharides compositions in the form of films, gels, viscous fluids with the desired rheological characteristics.*
Keywords*: quantum-chemical modeling; galacturonic acid; method PM3; pectin*

Вступ

Пектинові речовини містяться в усіх вищих квіткових рослинах, вони мають велику гелеутворюючу здібність, відіграють важливу роль у харчуванні людини, як субстрат для усіх представників корисної мікрофлори кишківника, мають широкий спектр фізіологічної активності. Враховуючи те, що на структуру пектину впливають умови росту і розвитку рослини, їх видова розбіжність, пектинові полісахариди розглядають як один з найскладніших та динамічних за структурою класів біополімерів [1].

Окрім великої біологічної цінності пектинові речовини функціонують у природі і в організмі людини як природні йоннообмінні матеріали. Встановлено, що йонна селективність залежить від ступеню етерифікації пектину, а також від ступеню амідування. Низькометоксильований амідований пектин сорбує йони у ряду Cu > Zn > Cd [2]

На сьогодні, майже у кожній сучасній технології харчової індустрії та фармацевтичної промисловості використовують пектинові речовини [3].

Саме тому, вивчення просторового розташування атомів, функціональних груп, ланцюжків молекули пектину за допомогою квантово-хімічних методів є досить своєчасним і актуальним, оскільки це може дозволити чітко сформувати уяву про реакційну здатність пектину у цілому, і визначити комплекс його фізико-хімічних властивостей.

Викладення основного матеріалу

Теорія міжмолекулярних взаємодій, на сьогодні є галуззю науки, що широко розповсюджується на

© С. І. ОКОВИТИЙ, Є. П. ПИВОВАРОВ, Н. В. КОНДРАТЮК, Є. А. ПОЛИВАНОВ, М. О. БЕЛІЧЕНКО, 2017

різні сфери знань. Однак у харчових технологіях вивчення об'єктів шляхом квантово-хімічного моделювання майже не проводиться.

За результатами аналітичного огляду стало відомо, що міжмолекулярні взаємодії у системі пектину вивчалися за допомогою атомно-силової мікроскопії [1], реологічних методів дослідження [4], скануючої електронної мікроскопії [5].

Нами раніше вже було проведено квантово-хімічне моделювання системи Ca-Na-Alg [6-9], за результатами якого було розроблено технологію оболонок капсул із пробіотичними мікроорганізмами.

На сьогодні відомо, що розроблена методика проведення квантово-хімічних розрахунків, для системи альгінату може бути цілком адаптована і для пектинових речовин.

Метою даної роботи є виявлення особливостей та закономірностей будови важливих у теоретичному і практичному плані полісахаридних сполук, що складаються з залишків α-1,4-галактуронової кислоти. Порівняльний аналіз димерів, що різняться за складом функціональних груп, виконано засобами побудови квантово-хімічних моделей, які дозволяють встановити геометричну будову та визначити стійкі конформери для використання їх структурних параметрів при побудові електронних баз даних, розрахунку фізико-хімічних властивостей речовин і створенні теоретичних концепцій реакційної здатності даних сполук у системі пектину та у складі композицій з іншими поліуронідами.

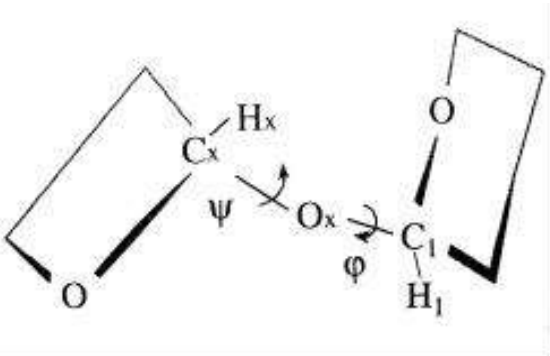


Рис. 1 – Кути φ та ψ за глікозидного зв'язку

Слід зазначити, що дослідження димерів α-1,4-галактуронової кислоти на атомно-молекулярному рівні з урахуванням усіх типів міжмолекулярних сил раніше не проводилось. Зважаючи на те, що структура пектину (наприклад, низькоетерифікованого амідованого) ускладнена наявністю різних функціональних груп (R_1 –COOH (карбоксильною); R_2 –$COOCH_3$ (складноетерною) та R_3 -$CONH_2$ (амідною), вирішення задачі стосовно побудови ланцюгу полімеру потребує застосування складних сучасних розрахункових методів і значних затрат розрахункового ресурсу. Тому, необхідним стало виявлення найменших за розміром структурних одиниць, яким притаманні таки ж самі технологічні та фізико-хімічні властивості, які проявляють і молекули полімеру.

У роботі розглядаються димери α-1,4-галактуронової кислоти (Gal), що мають у складі різні комбінації функціональних груп та здійснюється пошук стійких конформерів даних сполук за мінімумом енергії.

Обговорення результатів

З метою вивчення структури пектину для подальшого вивчення механізму гелеутворення нами було проведено конформаційний пошук та квантово-хімічне моделювання вищевказаних систем у програмі Gaussian 09 [10]. Сканування поверхонь потенційної енергії відносно торсійних кутів φ та ψ (рис. 1) проводились методом PM3 [11]. Структура та енергія конформацій, які водповідають мінімумам енергії уточнювались у шляхом повної оптимізації структур. При цьому розглядалися можливі шляхи зв'язування димерів у полімерні ланцюги «сендвічевого» типу для подальшої реалізації процесу іонотропного гелеутворення.

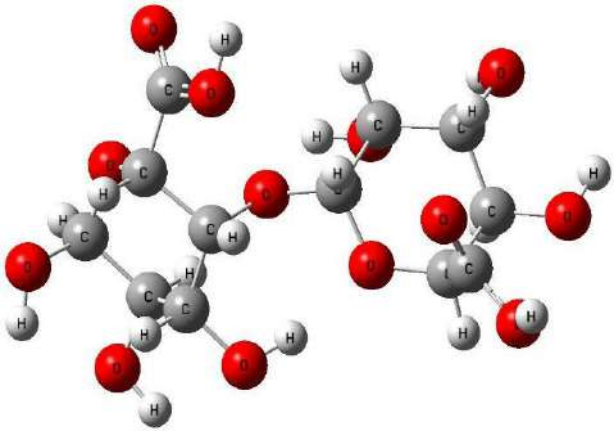


*Рис. 2 – Модель стійкого димеру **1***

Конформаційні переходи характеризуються невеликими значеннями активаційних бар'єрів, що вказує на вірогідність швидкого міжконформаційного переходу під впливом зовнішніх факторів, таких як розчинник, йони металів, тощо.

Конформаційний аналіз димерів (**1-4)** свідчить про наявність на поверхні потенційної енергії (ППЕ) трьох конформерів (рис. 3-6).

Згідно розрахунків, найбільш стабільним виявилися конформери 1B для димеру **1** та 1A для усіх інших димерів (Табл. 1).

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

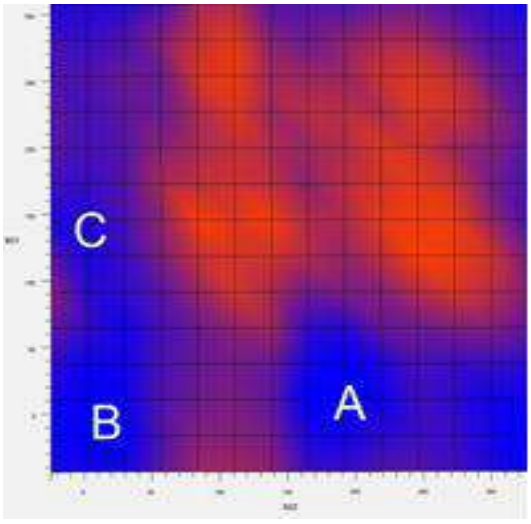


Рис. 3 – Контурна карта ППЕ для молекули димеру ***1***

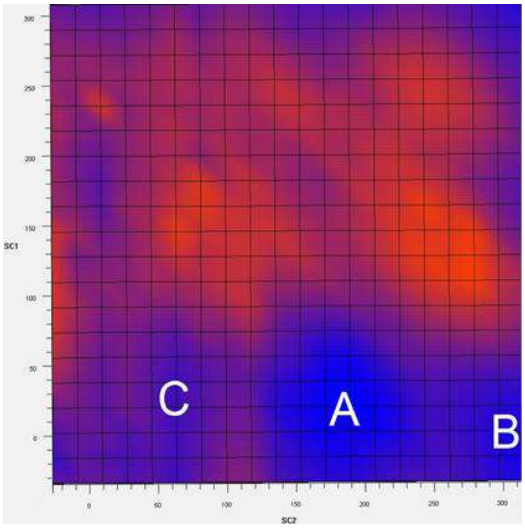


Рис. 4 – Контурна карта ППЕ для молекули димеру ***2***

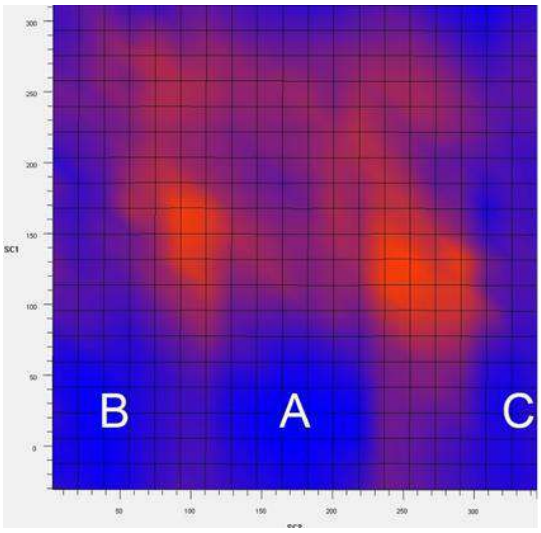


Рис. 5 – Контурна карта ППЕ для молекули димеру ***3***

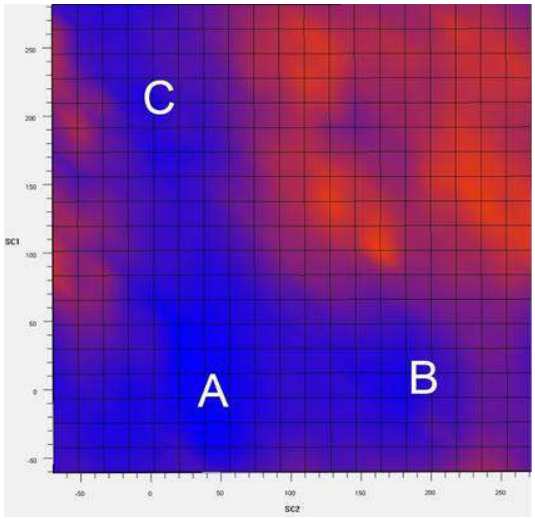


Рис. 6 – Контурна карта ППЕ для молекули димеру ***4***

Таблиця 1 – Величини торсійних кутів (град.) та теплот утворення (кДж/моль) найбільш стійких димерів α-1,4-галактуронової кислоти

Конформер	φ	ψ	ΔH
Димер 1			
1A	10,7063	-192,137	9,394038
1B	-16,2937	30,1374	0
1C	118,706	3,13737	9,331026
Димер 2			
1A	20,3774	171,63	0
1B	-15,6226	297,63	9,45705
1C	-33,6226	45,6305	30,87063
Димер 3			
1A	5,36335	164,405	0
1B	23,3633	38,4047	2,021635
1C	23,3633	326,405	7,760977
Димер 4			
1A	-24,9185	38,0361	0
1B	-6,9185	182,036	10,56239
1C	209,081	2,0361	10,95884

Наразі проводяться розрахунки димерів з участю у їх побудові інших варіацій функціональних груп.

Висновки

Квантово-хімічним напівемпіричним методом PM3 вивчено геометрію, електронну структуру димерів α-1,4-галактуронової кислоти з різним набором функціональних груп (R_1 –COOH (карбоксильною); R_2 –$COOCH_3$ (складноетерною) та R_3 -$CONH_2$ (амідною) у програмному пакеті Gaussian 09. Отримані моделі дозволять виявити особливості та закономірності будови пектинових сполук, що складаються з залишків α-1,4-галактуронової кислоти та є стратегічно важливими у теоретичному і практичному плані для розвитку харчових та

фармацевтичних технологій. Отримані моделі є основою для вивчення геометричної будови «зшитих» полімерних структур як у системі будь-якого виду пектину, так і у комбінованих системах за участю інших поліуронідів (наприклад, альгінату натрію). Отримані дані дозволять більш чітко визначити і навіть «запрограмувати» фізико-хімічні, реологічні та технологічні властивості в'язких рідин, гелів, харчових плівок та полімерних біологічнорозчинних упаковок для створення ресурсозберігаючих та екологічних технологій.

Список літератури

1. **Оводов, Ю.С.** Современные представления о пектиновых веществах / **Ю.С. Оводов** // *Биоорганическая химия*. – 2009. – Т. 35, № 3. – С. 293-310.
2. **Cataldo, S.** Kinettic and equilibrium study for cadmium and removal from agueous solutions by sorption onto mixed alginate/pectin gel beads / **S. Cataldo, G. Cavallaro, A. Gianguzza etc.** // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2013. – № 1. – P. 1252-1260. – doi:10.1016/j.jece.2013.09.012.
3. **Потрясов, Н. В.** Использование пектина в различных технологиях / **Н.В. Потрясов, К.В. Акопян, А.В. Пономаренко** // *Молодой ученый*. – 2014. – № 4. – С. 242-244.
4. **Мухамеджанова, М.Ю.** Процессы гелеобразования и реологические свойства умеренно-концентрированных водных растворов цитрусового пектина в присутствии ионов поливалентных металлов / **М. Ю. Мухамежданова, А. В. Филатова, Д. Джурабаев, А. С. Тураев** // *Химия растительного сырья*. – 2012. - №1. – С. 51-60.
5. **Galus, S.** Development and characterization of composite edible films based on sodium alginate and pectin // **S. Galus, A. Lenart** // *Journal of Food Engineering*. – 2013. – № 115. – P. 459-465. – doi:10.1016/j.jfoodeng.2012.03.006.
6. **Okovytyy, S. I.** A DFT Study of the Complexation of Alginic Acid with Ca^{2+} Ions / **S. I. Okovytyy, P. P. Pivovarov, E. P. Pivovarov, N.V. Kondratjuk et al.** // *10th Southern School on Material Science and Computational Chemistry, 23 April 2010 : materials*. - Jackson : Jackson State University, 2010. – P. 54.
7. **Пивоваров, П.П.** Прогнозування умов досягнення конформаційної рівноваги і термодинамічної стійкості в системах «AlgNa-Ca^{2+}» / **П.П. Пивоваров, С. І. Оковитий, Є. П. Пивоваров, Н. В. Кондратюк та ін**. // *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій : зб. наук. пр. Сер. Технічні науки* / ОНАХТ. – Одеса : ОНАХТ, 2010. – Вип. 38, т. 2. – С. 148–152.
8. **Пивоваров, Є. П.** Вивчення процесу гелеутворення в оболонках капсульованих продуктів з позиції квантово-хімічного моделювання / **Є.П. Пивоваров, Н. В. Кондратюк** // *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2014. – № 17 (1060). – С. 169-175.
9. **Оковитый, С. И.**Квантово-химическое моделирование димера гулуроновой кислоты / **С. И. Оковитый, П. П. Пивоваров, Е. П. Пивоваров, Н. В. Кондратюк и др.** // *Вісник Дніпропетровського університету*. – Сер. Хімія / Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара. – Дніпропетровськ : ДНУ ім. О. Гончара, 2010. – Вип. 16, т. 18. – С. 200–204.
10. **Gaussian 09**, Revision D.01, M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, G. E. Scuseria, et al. Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2013.
11. **Кобзев, Г. И.** Применение неэмпирических и полуэмпирических методов в квантово-химических расчетах : учеб. пособие / **Г. И. Кобзев.** – Оренбург : ГОУ ОГУ. - 2004. – 150 с.

Bibliography (transliterated)

1 **Ovodov, Yu. S.** Sovremennyye predstavleniya o pektinovykh veshchestvakh [Modern ideas about petin substances]. *Bioorganicheskaya khimiya [Bioorganics chemistry]*, 2009, **35**, **3**, 293-310.
2 **Cataldo, S., Cavallaro, G., Gianguzza, A. etc.** Kinettic and equilibrium study for cadmium and removal from agueous solutions by sorption onto mixed alginate/pectin gel beads. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2013, **1**, 1252-1260, doi:10.1016/j.jece.2013.09.012.
3 **Potryasov, N. V., Akopyan, K. V., Ponomarenko, A. V.** Ispolzovaniye pektina v razlichnykh tekhnologiyakh [Use pectin in the different technologies]. *Molodoy uchenyy [Young scientist]*, 2014, **4**, 242-244.
4 **Mukhamedzhanova, M. Y, Philatova, A. V., Jurbayev, D., Turayev, A. S.** Protsessy geleobrazovaniya i reologicheskiye svoystva umerenno-kontsentrirovannykh vodnykh rastvorov tsitrusovogo pektina v prisutstvii ionov polivalentnykh metallov [Gelling processes and rheological properties of moderately concentrated aqueous solutions of citrus pectin in the presence of polyvalent metal ions]. *Khimiya rastitelnogo syria [Chemistry of plant raw materials]*, 2012, **1**, 51-60.
5 **Galus, S., Lenart, A.** Development and characterization of composite edible films based on sodium alginate and pectin. *Journal of Food Engineering*, 2013, **115**, 459-465, doi:10.1016/j.jfoodeng.2012.03.006.
6 **Okovytyy, S. I., Pivovarov, P. P., Pivovarov E. P., Kondratjuk, N. V. et al.** A DFT Study of the Complexation of Alginic Acid with Ca^{2+} Ions. *10th Southern School on Material Science and Computational Chemistry, 23 April 2010 : materials*. Jackson: Jackson State University, 2010, 54.
7 **Pivovarov, P. P. Okovytyy, S. I., Pivovarov, Y. P., Kondratyuk, N. V.** Prognozuvannya umov dosyagnennya konformatsiynoї rivnovagi i termodinamichnoї stiykosti v sistemakh «AlgNa-Ca^{2+}» [Prediction of conditions for achieving conformational equilibrium and thermodynamic stability in systems «AlgNa-Ca^{2+}»]. *Naukovi pratsi Odeskoї natsionalnoї akademiї kharchovikh tekhnologiy : zb. nauk. pr. Ser. Tekhnichni nauki*. ONAKhT [*Scientific works of the Odessa National Academy of Food Technologies*]. Odesa : ONAKhT. 2010, **38**, **2**, 148–152.
8 **Pivovarov, Y. P., Kondratyuk, N. V.** Vivchennya protsesu geleutvorennya v obolonkakh kapsulovanikh produktiv z pozitsiї kvantovo-khimichnogo modelyuvannya [The study of the process of gelling in the shells of encapsulated products from the position of quantum-chemical modeling]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI" : zb. nauk. pr. Temat. vip. : Novi rishennya v suchasnikh tekhnologiyakh. – Kharkiv : NTU "KhPI"*, 2014, **17** (**1060**), 169-175.
9 **Okovityy, S. I., Pivovarov, Y. P., Kondratyuk, N. V.** Kvantovo-khimicheskoye modelirovaniye dimera guluronovoy kisloty [Quantum-chemical modeling of

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

hyaluronic acid dimer]. *Visnyk Dnipropetrovskogo universitetu. – Ser. Khimiya / Dnipropetrovskiy natsionalniy universitet im. O. Gonchara. – Dnipropetrovsk : DNU im. O. Gonchara*. 2010, **16, 18**, 200–204.

10 **Gaussian 09**, Revision D.01, M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, G. E. Scuseria, et al. Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2013.

11 **Kobzev, G. I.** Primeneniye neempiricheskykh I poluempiricheskykh metodov v kvantovo-khimicheskikh raschetakh [The use of non-empirical and semi-empirical methods in quantum chemical calculations]. Orienburg : OSU, 2004, 150.

Відомості про авторів (About authors)

Оковитий Сергій Іванович – доктор хімічних наук, професор, Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, завідувач кафедри органічної хімії; м. Дніпро, Україна; e-mail: sokovyty@icnanotox.org.

Sergiy Ivanovich Okovytyy – Professor, Department of organic chemistry, Dnepropetrovsk National University named after Oles Gonchar, Dnipro, Ukraine; e-mail: sokovyty@icnanotox.org.

Пивоваров Євген Павлович – доктор технічних наук, професор, Харківський державний університет харчування та торгівлі, професор кафедри технології харчування, м. Харків, Україна, e-mail: pcub@ukr.net

Yevgen Pavlovich Pivovarov – Professor, Department of Food Technology, Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Kharkiv, Ukraine; e-mail: pcub@ukr.net.

Кондратюк Наталія Вячеславівна – кандидат технічних наук, доцент, Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, доцент кафедри харчових технологій, м Дніпро. Україна, e-mail: kondratjuk_nata@mail.ru.

Nataliia Vyacheslavivna Kondratjuk – Docent, Department of Food Technology, Dnepropetrovsk National University named after Oles Gonchar, Dnipro, Ukraine; e-mail: kondratjuk_nata@mail.ru.

Поливанов Єгор Андрійович – студент кафедри харчових технологій, Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, м Дніпро. Україна, e-mail: mr.egor.pv@gmail.com.

Yehor Andriyovych Polyvanov – student, Department of Food Technology, Dnepropetrovsk National University named after Oles Gonchar, Dnipro, Ukraine; e-mail: mr.egor.pv@gmail.com.

Біліченко Мар`я Олександрівна – студентка кафедри органічної хімії, Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, м Дніпро. Україна, e-mail: marybelle10@mail.ru.

Maria Bilichenko – student, Department of organic chemistry, Dnepropetrovsk National University named after Oles Gonchar, Dnipro, Ukraine; e-mail: marybelle10@mail.ru.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Оковитий, С. І. Дослідження харчових систем на основі пектину. Квантово-хімічне моделювання димерів галактуронової кислоти / **С. І. Оковитий, Є. П. Пивоваров, Н. В. Кондратюк, Є. П. Поливанов, М. О. Біліченко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 194-198. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.27.

Please cite this article as:

Okovytyy, S. I., Pivovarov, Y. P., Kondratjuk, N. V., Polivanov, Y. A., Bilichenko, M. O. Research of food systems based on pectin. Quantum-chemical modeling of galacturonic acid dimers. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 194–198, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.27.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Оковитый, С. И. Исследование пищевых систем на основе пектина. Квантово-химическое моедлирование димеров галактуроновой кислоты / **С. И. Оковитый, Е. П. Пивоваров, Н. В. Кондратюк, Е. П. Поливанов, М. А. Биличенко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 194-198. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.27.

АННОТАЦИЯ *Статья посвящена изучению механизмов гелеобразования в системе пектина. В данной статье рассматриваются принципы построения цепочек высокоэтерифицированного и низкоэтерифицированного пектина в системе гидроколлоида. При этом учитываются особенности химического строения полимерных молекул и реакционная способность функциональных групп, принимающих участие в образовании гелей с различными реологическими свойствами. Полуэмпирическим методом квантово-химического моделирования PM3 изучены геометрия, электронная структура димеров молекулы α-1,4-галактуроновой кислоты с различными функциональными группами (карбоксильной, сложноэфирной и амидной) в программном пакете Gaussian 09. Были рассчитаны тепловые эффекты реакций образования димеров, торсионные углы (φ и ψ). Из полученной базы данных были определены наиболее устойчивые состояния димеров, построены их контурные карты потенциальной энергии. На основе проведенного квантово-химического моделирования были описаны центры возможного связывания цепочек пектина. В качестве исследовательской задачи была определена попытка оценить степень участия димеров α-1,4-галактуроновой кислоты, содержащих различные функциональные группы, в механизме гелеобразования, возникающем в пищевых системах на основе пектина с учетом возможного участия других типов уроновых кислот. Приведенные результаты позволят более подробно описать технологические свойства и параметры получения пищевых композиций на основе полисахаридов уронидного состава в виде пленок, гелей, вязких жидкостей с заданными реологическими характеристиками.*

Ключевые слова: *квантово-химическое моделирование; галактуроновая кислота; метод PM3; пектин*

Надійшла (received) 08.03.2017

УДК 628.337+621.355.8+661.873.23+66.087.7 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.28

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОКСИДА НИКЕЛЯ В СИСТЕМЕ $Ni(NO_3)_2$—NaOH

В. А. СОЛОВОВ[1*], Н. В. НИКОЛЕНКО[1], В. Л. КОВАЛЕНКО[1,4], В. А. КОТОК[2,4], Д. В. ГИРЕНКО[3]

[1]кафедра аналитической химии и химической технологии пищевых добавок и косметических средств, ГВУЗ УГХТУ, г. Днепр, УКРАИНА
[2]кафедра процессов и аппаратов и общей химической технологии, ГВУЗ УГХТУ, г. Днепр, УКРАИНА
[3]кафедра физической химии, ГВУЗ УГХТУ, г. Днепр, УКРАИНА
[4]кафедра технологии неорганических веществ и электрохимических производств, ФГБОУ ВО ВятГУ, г. Киров, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
[*]email: sva-92@mai.ru

АННОТАЦИЯ *Гидроксид никеля является активным веществом щелочных аккумуляторов и суперконденсаторов, которые широко используются в качестве источника питания различных электрических и электронных устройств. Для синтеза гидроксида никеля с высокими электрохимическими характеристиками необходимо изучить механизм его формирования. Проведен анализ процесса образования осадка в системе $Ni(NO_3)_2$—NaOH методом комбинированного кондуктометрического и потенциометрического титрования. Было установлено, что процесс формирования гидроксида никеля из раствора нитрата никеля происходит в две стадии: 1) осаждение основного нитрата никеля; 2) трансформация основного нитрата никеля в гидроксид. Определено, что состав первичного осада соответствует формуле $Ni(NO_3)_{0.13}(OH)_{1.87}$.*
Ключевые слова: *гидроксид никеля; комплексное кондуктометрическое и потенциометрическое титрование; механизм формирования; основной нитрат никеля*

FORMATION MECHANISM OF NICKEL HYDROXIDE IN SYSTEM $Ni(NO_3)_2$—NaOH

V. A. SOLOVOV[1], N. V. NIKOLENKO[1], V. L. KOVALENKO[1,4], V. A. KOTOK[2,4], D. V. GIRENKO[3]

[1]The Department of Analytical Chemistry and Food Additives and Cosmetics, SHEI USUCT, Dnipro city, UKRAINE
[2]The Department of Processes, Apparatus and General Chemical Technology SHEI USUCT Dnipro city, UKRAINE
[3]The Department of Physical Chemistry, SHEI USUCT Dnipro city, UKRAINE
[4]The Department of Technologies of Inorganic Substances and Electrochemical Manufacturing, FSBEI HE Vyatka State University, Kirov city, RUSSIAN FEDERATION

ABSTRACT *Nickel hydroxide is used an active substance for accumulators and supercapacitors, which are widely used as power sources for various electric devices and electronics. According to literature the formation of divalent metal hydroxides such as zinc and cadmium hydroxides($Zn(OH)_2$, $Cd(OH)_2$) occurs in two stage: 1) precipitation of metal hydroxyl salt; 2) reaction of hydroxyl salt with hydroxyl groups with formation of metal hydroxide. Though the nickel hydroxyl nitrate is known, the information regarding its formation mechanism and composition is limited. Aim of the work was to establish the formation mechanism of nickel hydroxide from nitrate precursor and to establish the composition of formed precipitate. In order to achieve the set aim, the analysis of $Ni(NO_3)_2$—NaOH system has been carried out using combined method of conductometric and potentiometric titration. It had been established that process of nickel hydroxide formation from nitrate solution occurs in two stages: 1) precipitation of basic nickel nitrate; 2) transformation of basic nickel nitrate into hydroxide. It had been established that composition of primary precipitate correspond to the formula $Ni(NO_3)_{0.13}(OH)_{1.87}$.*
Keywords: *nickel hydroxide; conducmetric and potentiometric complex titration; formation mechanism; base nickel nitrate*

Введение

Гидроксид никеля имеет широкий спектр применения, в частности как активное вещество в аккумуляторах, суперконденсторах, электрохромных устройствах и электрохимический сенсорах, а также используется в фото- и электрокатализе [1]. Щелочные никель-кадмиевые, никель-железные, никель-металлгидридные, никель-цинковые и никель-водородные аккумуляторы и гибридные суперконденсаторы с окисноникелевым фарадеевским электродом используются в качестве источника питания для запуска и работы различных электродвигателей, в том числе в горнодобывающем и шахтном оборудовании, в электромобилях, ручном электроинструменте, в источниках бесперебойного

© В. А. СОЛОВОВ, Н. В. НИКОЛЕНКО, В. Л. КОВАЛЕНКО, В. А. КОТОК, Д. В. ГИРЕНКО, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

питания компьютеров, медицинских приборов или целых зданий и помещений.

Требования к гидроксиду никеля, используемому в щелочных аккумуляторов различной конструкции (ламельных или намазных) и гибридных суперконденсаторов значительно различаются как по типу частиц и их размеру, так и по модификации и кристалличности. Все эти параметры в значительной степени определяются методом синтеза. В зависимости от назначения гидроксида никеля и требуемых его характеристик, используются различные методы синтеза, такие так гомогенное осаждение [2], осаждение щелочью [3] электрохимическое осаждение [4,5], золь-гель [6], высокотемпературный двухступенчатый синтез [7] и др. Наиболее распространенным является метод химического осаждения с использованием растворов щелочи [1].Исходя из химических свойств, можно предположить, что в ходе химического осаждения гидроксид никеля образуется по реакции:

$$Ni^{2+}+2OH^- \rightarrow Ni(OH)_2 \quad (1)$$

Однако, в литературе [8-10] указывается, что гидроксид никеля, полученный методом химического осаждения, не соответствует формуле $Ni(OH)_2$ и содержит в своем составе анионы соли прекурсора, что указывает на их участие в процессе формирования гидроксида никеля. Вассерман [11] показал, что осадки гидроксидов двухвалентных металлов образуются по двухступенчатому механизму: вначале образуются первичные аморфные частицы, которые потом кристаллизуются. При титровании сульфата цинка щелочью [11] выявлено, что при молярном соотношении $OH^-/Zn^{2+}=1,6$ образуется первичный осадок основного сульфата, который при дальнейшем введении щелочи переходит в гидроксид. Для гидроксида никеля такие данные отсутствуют. Это не позволяет как полноценно и целенаправленно выбрать метод синтеза, так и оптимизировать технологические параметры получения с формированием гидроксида никеля с требуемыми характеристиками

Цель работы

1) Изучить механизм формирования гидроксида никеля в системе $Ni(NO_3)_2$—NaOH.

2) Определить состав осадка, формирующегося в процессе осаждения.

Изложение основного материала
Методика исследований

В ходе исследования использовались реактивы $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ и NaOH квалификации «х.ч».

Механизм формирования изучался методом комбинированного кондуктометрического и потенциометрического титрования. В ходе титрования к раствору 0,3 М $Ni(NO_3)_2$ при постоянном перемешивании добавляли раствор 0,8 М NaOH. Объем одноразово вводимого титранта составлял 1 мл, значения pH и сопротивления раствора измеряли через 3 мин после добавления.

Потенциометрия проводилась при фиксации pH с помощью pH-метра pH-150МИ с универсальным электродом**,** который был предварительно откалиброван с использованием стандартных буферных растворов с pH 6.86 и 9.18.

Кондуктометрия проводилась при измерении сопротивления раствора при помощи моста переменного тока высокой частоты (10 кГц). Для измерения использовали два гладких платиновых электрода площадью по 2 $см^2$. Мостовую схему уравновешивали по показаниям осциллографа. Для предотвращения дополнительного влияния при измерении сопротивления магнитная мешалка отключалась.

Обсуждение результатов

На рис. 1 представлены зависимости pH и сопротивления реакционного раствора от молярного соотношения добавленной щелочи к начальному количеству Ni^{2+}.

На кривой pH наблюдается только один скачек титрования в интервале 8 – 12, характеризующий полное осаждение гидроксида никеля. Процесс промежуточного образования осадка основной соли на кривой потенциометрического титрования не зафиксирован, что соответствует литературным данным [11].

На кривой сопротивления можно выделить три участка, соответствующих следующему соотношению $NaOH/Ni^{2+}$: участок I – 0,3-0,88, участок II – 0,88-1,87 и участок III –1,87-2,2.

Перед рассмотрением кривой титрования необходимо отметить следующее. Если при титровании катион Ni^{2+} связывается с гидроксил-анионом с образованием $Ni(OH)_2$, то в растворе остается катион Na^+ из добавленной щелочи. При этом подвижность (эквивалентная электропроводность) обоих катионов одинакова [12], поэтому замена Ni^{2+} на Na^+ при образовании $Ni(OH)_2$ не приведет к изменению проводимости и, соответственно, сопротивления раствора.

На участке I (рис. 1) наблюдаются в общем случае снижение сопротивления. Изначально было высказано предположение, что это снижение сопротивления может объясняться образованием заряженных частиц малого размера, которые так же являются переносчиками тока. При проведении титрования было обнаружено, что на участке I в реакционном стакане частицы осадка визуально не наблюдались. Однако более существенным, вероятно, было влияние другого фактора – температуры, а точнее теплового эффекта реакции, происходящей

при титровании. для реакции 1 было посчитано стандартное изменение энтальпии, которое составило - 28,3285 кДж/моль. Сразу необходимо отметить, что реакция является экзотермической. Однако следует указать, что подобный расчет является очень грубым и приближенным, т.к. не известна точная формула вещества в образующемся осадке и его энтальпия образования. Для качественного определения знака теплового эффекта химической реакции был проведен эксперимент по взаимодействию растворов нитрата никеля и щелочи (в стехиометрическом соотношении) в калориметре. Было показано, что реакция действительно экзотермическая с существенным выделением тепла. Кроме того было выявлен экзотермический эффект при разбавлении раствора щелочи. Исходя из этого, можно сказать, что незначительное снижение сопротивления на участке Iобусловлено нагревом реакционной смеси за счет теплового эффекта реакции. Значительные колебания сопротивления наиболее вероятно указывают на нестабильность системы.

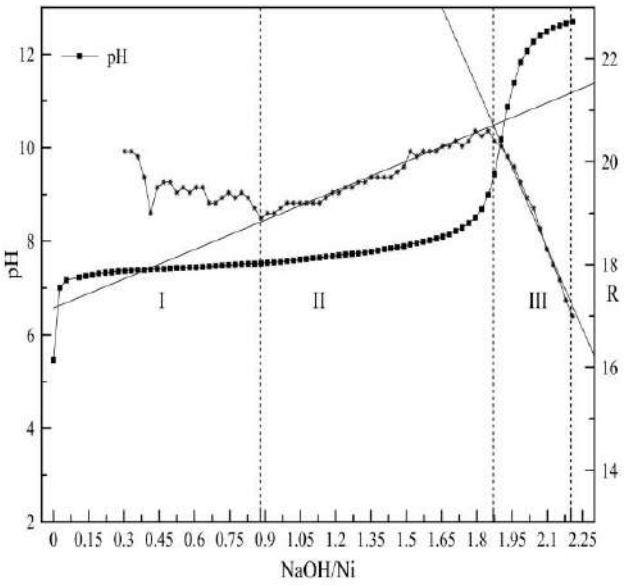


Рис. 1 – Зависимость pH и сопротивления раствора от соотношения NaOH/Ni^{2+}

На участке II0,88-1,87 наблюдается стабильный рост сопротивления раствора. Как указывалось выше, постепенное замещение катионов Ni^{2+} на Na^{+} в ходе титрования не должно влиять на сопротивление раствора. Наиболее вероятно, на участке II происходит коагуляция осадка. Заряженные частицы (вносящие вклад в электропроводность) превращаются в крупные незаряженные частицы, что увеличивает сопротивление. При этом из-за нахождения в растворе большого количества достаточно крупных непроводящих частиц увеличивается путь тока из-за отклонения от линейного, т..к. силовые линии электрического поля огибают изоляторы. Тем самым сопротивление раствора повышается. Колебания сопротивления раствора также могут возникать из-за неравномерной температуры раствора, обусловленной экзотермическим характером реакции осаждения и разбавления щелочи.

На границе участков II и III наблюдается излом кривой сопротивления при молярном соотношении NaOH/Ni^{2+}=1,87, после которого на участке IIIсопротивление раствора резко падает. Это указывает на появлении в растворе свободных гидроксил-анионов, имеющих значительно более высокую подвижность. Это четко указывает, что в точке молярного соотношения NaOH/Ni^{2+}=1,87 в растворе отсутствуют свободные ионы никеля и образование первичной формы осадка завершено. Однако, в этой точке щелочи явно недостаточно для формирования осадка состава $Ni(OH)_2$, что указывает на формирования осадка, содержащего в себе как гидроксильные так и нитратные группы. Так как кристаллические решетки основных солей и α-$Ni(OH)_2$ идентичны, первичный осадок можно считать основным нитратом никеля или гидроксидом с дефицитом OH^- групп [8], состав которого, согласно результатам титрования, соответствует формуле $Ni(OH)_{1.87}(NO_3)_{0,13}$. Однако, по нашему мнению, называть сформировавшийся осадок основным нитратом никеля является более корректным.

В точке кривой при молярном соотношении NaOH/Ni^{2+}=1,87 происходит переход от быстрой гомогенной реакции ионов Ni^{2+} и OH^- [11] (реакция 2) к значительно более медленной топохиической реакции осадка основного нитрата никеля с избыточным количеством гидроксил-анионов с переходом в гидроксид (реакция 3). Вероятно, полное время реагирования щелочи, содержащегося в 1 мл 0,8 М раствора NaOH, превышает 3 минуты, в результате в растворе на момент измерения сопротивления остается некоторое количество свободных гидроксил-ионов.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что в ходе титрования раствора нитрата никеля, процесс образования гидроксида никеля состоит из двух стадий: 1) осаждения основного нитрата никеля; 2) трансформация основного нитрата никеля в гидроксид путем топохимической реакции с избыточным количеством гидроксил-анионов. Суммарно, обе стадии можно записать в виде:

$$Ni^{2+} + 1{,}87OH^- + 0{,}13NO_3^- \rightarrow Ni(OH)_{1.87}(NO_3)_{0,13}\downarrow \quad (2)$$

$$Ni(OH)_{1.87}(NO_3)_{0,13}\downarrow + 0{,}13OH^- \rightarrow Ni(OH)_2\downarrow + 0{,}13NO_3^- \quad (3)$$

Скорость жидкофазной реакции (2) очень большая [11], что подтверждалось в практически мгновенном (5-7 секунд) изменении сопротивления раствора при добавлении проции титранта на

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

участкеII. Так как в ходе реакции 2в растворе происходит не только замещение Ni^{2+} на Na^{+}, но и удалениеNO_3^-из раствора, то можно сделать вывод, что рост сопротивления на участке IIсвязан не только коагуляцией частиц осадка основного нитрата никеля, но и уходом из раствора нитрат-анионов с образованием основного нитрата никеля.

Следует отметить, что реакция (3) является топохимической, и по сравнению с реакций (2) ее скорость мала, что позволило зафиксировать окончание осаждения никеля в виде основного нитрата, при помощи кондуктометрического титрования.

Выводы

1. Проведено изучение механизма осадка в системе$Ni(NO_3)_2$—NaOH при помощи метода комбинированного кондуктометрического и потенциометрического титрования.

2. Установлено, что при титровании раствора нитрата никеля, формирование гидроксида никеля происходит в две стадии: 1) осаждение первичного осадка основного нитрата никеля; 2) переход основного нитрата никеля в гидроксид никеля.

3. Установлено, что состав первичного осадка соответствует формуле $Ni(NO_3)_{0.13}(OH)_{1.87}$.

Список литературы

1. **Hall, D. S**. Nickel hydroxides and related materials: a review of their structures, synthesis and properties / **D. S. Hall, D. J. Lockwood, C. Bock, B. R. MacDougall** // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2014. – Vol. 471, No. 2174. – 65 P. – doi: 10.1098/rspa.2014.0792.
2. **Mavis, B.** Cyanate intercalation in nickel hydroxide / **B. Mavis, M. Akinc** // *Chemistry of Materials*. – 2006. – Vol. 18, No. 22. – P. 5317–5325. – doi: 10.1021/cm0528835.
3. **Carpenter, M. K.** The electrochromic properties of hydrous nickel oxide / **M. K. Carpenter, R. S. Conell, D. A. Corrigan** // *Solar energy materials*. – 1987. – Vol. 16, No. 4. – P. 333–346. – doi: 10.1016/0165-1633(87)90082-7.
4. **Kotok, V. A**. The stability of aluminium-substituted alpha-nickel hydroxide [Текст] / **V. A. Kotok, N. D. Koshel, V. L. Kovalenko, A. A. Grechanuk** // *First Regional Symposium on Electrochemistry of South-East Europe "RSE-SEE", Book of international conference*. Croatia Rovinj, – 2008. – P. 201 – 203.
5. **Kovalenko, V. L**. The synthesis of nickel hydroxide by electrolysis from nickel nitrate solution in the slit diaphragm electrolyzer. Electrochemical properties / **V. L. Kovalenko, V. A. Kotok** // *Collection of research papers of National mining university*. – 2015 – № 49 – P. 181–186.
6. **Tadanaga. K.** Preparation of Co-Al and Ni-Al layered double hydroxide thin films by a sol-gel process with hot water treatment / **K. Tadanaga, A. Miyata, D. Ando, N. Yamaguchi** // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. – 2012. – Vol. 62 – P. 111-116. – doi:10.1007/s10971-012-2692-z.
7. **Kovalenko, V. L**. Nickel hydroxide obtained by high-temperature two-step synthesis as an effective material for supercapacitor applications / **V. L. Kovalenko, V. A. Kotok, A. A. Sykchin, I.A. Mudryi, B.A. Ananchenko, A.A. Burkov, , V.A. Sololvov, S. Deabate, A. Mehdi, J.-L. Bantignies, F. Henn** // *Journal of Solid State Electrochemistry*. – 2017. – Vol. 21. – P. 683–691. – doi:10.1007/s10008-016-3405-2.
8. **Ramesh, T. N.** Synthesis of nickel hydroxide: effect of precipitation conditions on phase selectivity and structural disorder / **T. N. Ramesh, P. V. Kamath** // *Journal of Power Sources*. – 2006. – Vol. 156, No. 2. – P. 655–661. – doi:10.1016/j.jpowsour.2005.05.050.
9. **Song, Q**. Structural characteristics of nickel hydroxide synthesized by a chemical precipitation route under different ph values / **Q. Song, Z. Tang, H. Guo, S. L. Chan** // *Journal of Power Sources*. – 2002. – Vol. 112, No. 2. – P. 428–434. – doi: 10.1016/S0378-7753(02)00396-8.
10. **Wilbur, S. J. Jr.** A New Method of Studying Basic Metal Salts Applied to Certain Basic Salts of Nickel / **S. J. Jr. Wilbur, J. T. Carriel** // *Journal of American Chemical Society*. – 1953. – Vol. 75, No. 4 – P. 778-781. – doi**:** 10.1021/ja01100a005.
11. **Вассерман. И. М.** Химическое осаждение из растворов/ **И. М. Вассерман**. – Л. : Химия., 1980. – 208с.
12. **Лурье, Ю. Ю.** Справочник по аналитической химии / **Ю. Ю. Лурье**. – М. : Химия., 1971. – 456 с.

Bibliography (transliterated)

1. **Hall, D. S., Lockwood, D. J., Bock, C., MacDougall, B. R.**. Nickel hydroxides and related materials: a review of their structures, synthesis and properties. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2014, **2174 (**471), 65. doi: 10.1098/rspa.2014.0792.
2. **Mavis, B., Akinc, M.** Cyanate intercalation in nickel hydroxide *Chemistry of Materials*. 2006, **22**(18), 5317–5325. doi**:** 10.1021/cm0528835.
3. **Carpenter, M. K., Conel, R. S., Corrigan, D. A.** The electrochromic properties of hydrous nickel oxide. *Solar energy materials*, 1987, **4**(16), 333–346. doi: 10.1016/0165-1633(87)90082-7.
4. **Kotok, V. A., Koshel, N. D., Kovalenko, V. L., Grechanuk, A. A**. The stability of aluminium-substituted alpha-nickel hydroxide. *First Regional Symposium on Electrochemistry of South-East Europe "RSE-SEE", Book of international conference*. Croatia Rovinj, 2008, 201 – 203.
5. **Kovalenko, V. L., Kotok, V. A.** The synthesis of nickel hydroxide by electrolysis from nickel nitrate solution in the slit diaphragm electrolyzer. Electrochemical properties, *Collection of research papers of National mining university*, 2015, **49**, 181–186.
6. **Tadanaga, K., Miyata, A., Ando, D., Yamaguchi, N.** Preparation of Co-Al and Ni-Al layered double hydroxide thin films by a sol-gel process with hot water treatment. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2012, **62,** 111-116. doi: 10.1007/s10971-012-2692-z.
7. **Kovalenko, V. L, Kotok, V. A., Sykchin, A. A., Mudryi, I. A., Ananchenko, B. A., Burkov, A. A., Sololvov, V. A.,**

Deabate, S., Mehdi, A., Bantignies, J.-L., Henn, F. Nickel hydroxide obtained by high-temperature two-step synthesis as an effective material for supercapacitor applications, *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2017, **21**, 683–691. doi: 10.1007/s10008-016-3405-2.

8. **Ramesh, T. N., Kamath, P. V.** Synthesis of nickel hydroxide: effect of precipitation conditions on phase selectivity and structural disorder. *Journal of Power Sources*, 2006, **2**(156) P. 655–661. doi:10.1016/j.jpowsour.2005.05.050.
9. **Song, Q., Tang, Z., Guo, H., Chan, S. L.** Structural characteristics of nickel hydroxide synthesized by a chemical precipitation route under different ph values, *Journal of Power Sources*, 2002, **2**(112), 428–434. doi: 10.1016/S0378-7753(02)00396-8.
10. **Wilbur, S. J. Jr., Carriel, J. T.** A New Method of Studying Basic Metal Salts Applied to Certain Basic Salts of Nickel, *Journal of American Chemical Society*, 1953, **4** (75), 778-781. doi**:** 10.1021/ja01100a005.
11. **Vasserman, I. M.** Chemical precipitation from a solutions (Himicheskoye osazhdeniye iz rastvorov) – L. Himiya, 1980, 208.
12. **Lure, Yu. Yu. S**pravochnik po analiticheskoy himii. M. Himiya, 1971, 456.

Сведения об авторах (About authors)

Соловов Виталий Андреевич – магистр, аспирант, Государственное высшее учебное заведение «Украинский Государственный Химико-Технологический Университет»,», аспирант кафедры аналитической химии и химической технологии пищевых добавок и косметических средств, г. Днепр, Украина; e-mail: sva-92@mail.ru.

Vitalii Solovov – master, Ph. D. student, State higher education institution, "Ukrainian State University of Chemical Technology", Ph.D. student of Department of Analytical Chemistry and Food Additives and Cosmetics, Dnipro city, Ukraine; e-mail: sva-92@mail.ru.

Николенко Николай Васильевич – доктор химических наук, профессор, Государственное высшее учебное заведение «Украинский Государственный Химико-Технологический Университет»,», заведующий кафедры аналитической химии и химической технологии пищевых добавок и косметических средств, г. Днепр, Украина; e-mail: n_nikolenko@ukr.net.

Nikolai Nikolenko – Professor of Chemical Sciences (Ph. D)., professor, State higher education institution, "Ukrainian State University of Chemical Technology", head of Department of Analytical Chemistry and Food Additives and Cosmetics, Dnipro city, Ukraine; e-mail: n_nikolenko@ukr.net.

Коваленко Вадим Леонидович – кандидат технических наук, доцент, Государственное высшее учебное заведение «Украинский Государственный Химико-Технологический Университет», доцент кафедры аналитической химии и химической технологии пищевых добавок и косметических средств, г. Днепр. Украина.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский Государственный Университет», кафедры технологии неорганических веществ и электрохимических производств, г. Вятка, Российская федерация; e-mail: vadimchem@gmail.com.

Vadym Kovalenko – Candidate of Engineering Sciences (Ph. D)., Associate Professor, State higher education institution, "Ukrainian State University of Chemical Technology", Associate Professor of Department of Analytical Chemistry and Food Additives and Cosmetics, Dnipro city, Ukraine.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Vyatka State University», associate professor of Department of Technologies of Inorganic Substances and Electrochemical Manufacturing. Kirov city, Russian Federation; e-mail: vadimchem@gmail.com.

Коток Валерий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Государственное высшее учебное заведение «Украинский Государственный Химико-Технологический Университет», доцент кафедры процессов и аппаратов и общей химической технологии, г. Днепр. Украина.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский Государственный Университет», кафедры технологии неорганических веществ и электрохимических производств, г. Вятка, Российская федерация; e-mail: valeriykotok@gmail.com.

Valerii Kotok – Candidate of Engineering Sciences (Ph. D)., Associate Professor, State higher education institution, "Ukrainian State University of Chemical Technology", associate professor of department of Processes, Apparatus and General Chemical Technology, Dnipro city, Ukraine.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Vyatka State University», associate professor of Department of Technologies of Inorganic Substances and Electrochemical Manufacturing, Kirov city, Russian Federation; e-mail: valeriykotok@gmail.com.

Гиренко Дмитрий Вадимович– кандидат химических наук, доцент, Государственное высшее учебное заведение «Украинский Государственный Химико-Технологический Университет»,», доцент кафедры физической хмии, г. Днепр, Украина; e-mail: dvgir@mail.ru.

Dmitrii Girenko – Candidate of Chemical Sciences (Ph. D)., Associate Professor, State higher education institution, "Ukrainian State University of Chemical Technology", associate professor if Department of Physical Chemistry, Dnipro city, Ukraine; e-mail: dvgir@mail.ru.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Соловов, В. А. Механизм формирования гидроксида никеля в системе $Ni(NO_3)_2$—NaOH / **В. А. Соловов, Н. В. Николенко, В. Л. Коваленко, В. А. Коток, Д. В. Гиренко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 199-204. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.28.

Please cite this article as:

Solovov, V. A., Nikolenko, N. V., Kovalenko, V. L., Kotok, V.A., Girenko, D.V. Formation mechanism of nickel hydroxide in system $Ni(NO_3)_2$—NaOH. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 199–204, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.28.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Соловов, В. А. Механізм формування гідроксиду нікелю в системі $Ni(NO_3)_2$—NaOH / **В. А Соловов, М. В. Ніколенко, В. Л. Коваленко, Д. В. Гіренко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 199-204. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.28.

АНОТАЦІЯ *Гідроксид нікелю є активною речовиною лужних акумуляторів та суперконденсаторів, які широко використовуються в якості джерела живлення різних електричних та електронних пристроїв. Для синтезу гідроксиду нікелю з високими електрохімічними характеристиками необхідно вивчати механізм його утворення. Проведено аналіз процесу утворення осаду в системі $Ni(NO_3)_2$—NaOH, використовуючи метод комбінованого кондуктометричного та потенціометричного титрування. Було встановлено, що процес формування гідроксиду нікелю із розчину нітрату нікелю проходить у дві стадії: 1) осадження основного нітрату нікелю; 2) трансформація основного нітрату нікелю у гідроксид. Встановлено, що склад первинного осаду відповідає формулі $Ni(NO_3)_{0.13}(OH)_{1.87}$.*

Ключові слова: *гідроксид нікелю; комбіноване кондуктометричне та потенціометричне титрування; механізм формування; основний нітрат нікелю*

Поступила (received) 05.03.2017

УДК 628.316.12 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.29

ФОСФОРИЛИРОВАННЫЙ УГЛЕРОДНЫЙ СОРБЕНТ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

А. П. ХОХОТВА[1*], К. А. МАЛЫХИНА[1], П. В. ЛИШТВА[1], Я. А. ФЕДОРОК[2]

[1] кафедра экологии и технологи растительных полимеров, инженерно-химический факультет, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, УКРАИНА
[2] кафедра экобиотехнологии и биоэнергетики, факультет биотехнологии, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, УКРАИНА
[*]email: khokhotva@bigmir.net

АННОТАЦИЯ *Синтезирован фосфорсодержащий углеродный сорбент путем термической обработки (при 170°С) сосновых опилок, предварительно пропитанных растворами $(NH_4)_3PO_4$ различной концентрации. Исследовано влияние коэффициента пропитки и длительности карбонизации на эффективность извлечения Cu(II) из модельных растворов. По сорбции метиленового синего установлено, что отмывка сорбента после карбонизации кипячением заметно увеличивает удельную сорбционную площадь и способствует росту удельной емкости сорбента по меди. Процесс сорбции Cu(II) лимитируется диффузией металла в микропорах.*
Ключевые слова: *сосновые опилки; фосфорилирование; фосфат аммония; тяжелые металлы; адсорбция*

PHOSPHORYLATED CARBON SORBENT FOR THE REMOVAL OF HEAVY METALS FROM WATER

O. KHOKHOTVA[1], K. MALYKHINA[1], P. LYSHTVA[1], Y. FEDOROK[2]

[1] Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Faculty of Chemical Engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" , Kyiv, UKRAINE
[2] Department of environmental biotechnology and bioenergy, Faculty of Biotechnology and Biotechnics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" , Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT *Phosphorus-containing carbon sorbent was synthesized by heat treatment at 170 °C of pine sawdust, pre-impregnated with $(NH_4)_3PO_4$ solutions of various concentrations. The ammonium salt decomposed, releasing phosphoric acid, having dehydrating properties and capable of forming of acidic ethers of lignin and cellulose. This lead to introduction of P-atom into functional groups of the carbon sorbent, that in turn had positive impact on sorption properties of the material to heavy metals. The effect of the impregnation rate and duration of carbonization on the efficiency of Cu(II) extraction from model solutions was studied. The best results were obtained at impregnation rate 0,7-1,0 and carbonization time 1-2 hours. The extension of carbonization time to 5 hours significantly – at more than 3 times – worsened the sorption properties of obtained materials. As found by sorption of methylene blue, boiling of the sorbent after carbonization considerably increased the specific sorption area and contributed to the growth of specific sorbent capacity on copper due to better dissolving and washing out of tar and other products of carbonization of lignocellulosic material from pore volume. Predominant mechanism of copper sorption is chelation and only 8-11% of the metal was removed due to cation exchange. Kinetic studies revealed that concentration of Cu(II) dropped at two times during 30 min of sorption process. The most rapid decrease was observed during first 10 min that corresponded to the metal sorption in meso- and macropores. The process of Cu(II) sorption was limited by diffusion of metal in the micropores. Thus, phosphorus-containing carbon sorbent obtained by heat treatment of pine sawdust, soaked with $(NH_4)_3PO_4$, is a new material with largely improved sorption properties to heavy metals, compared to traditional carbon sorbents.*
Key words: *pine sawdust; phosphorylation; ammonium phosphate; heavy metals; adsorption*

Введение

Активированный уголь широко используется в практике очистки природных и сточных вод. Так, уголь марки БАУ применяют для удаления из воды ионов тяжелых металлов [1]. Традиционным способом получения углей является высокотемпературный – при температурах 800-1000 °С – пиролиз сырья, в частности, лигноцеллюлозных материалов.

Уголь, полученный карбонизацией углеводородного сырья без добавления веществ-активаторов, имеет сравнительно небольшую адсорбционную способность, поскольку его удельная поверхность небольшая, и поры заполнены преимущественно смолами и продуктами неполного сгорания, образующиеся при пиролизе. Активация угля заключается в термической обработке, в результате которой его удельная поверхность увеличивается. При этом продукты неполного сгорания частично сгорают и испаряются. Активированный уголь является неселективным адсорбентом, поэтому для повышения селективности

© А. П. ХОХОТВА, К. А. МАЛЫХИНА, П. В. ЛИШТВА, Я. А. ФЕДОРОК, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

используют различные способы модифицирования, что приводит к его удорожанию.

Для увеличения пористости, прочности, сорбционной способности, выхода активированного угля, снижения температуры карбонизации исходные материалы пропитывают пиролитическими добавками, наиболее часто из которых применяют фосфорную кислоту в концентрации 60-85% [2-5]. В результате карбонизации в присутствии активатора в структуру углеродной поверхности внедряется гетероатом фосфора, вследствие чего полученный уголь приобретает выраженные ионообменные свойства.

Применение фосфорной кислоты в качестве активатора имеет существенный недостаток – это агрессивная жидкость, требующая при обращении с ней повышенных мер безопасности. Указанного недостатка лишены аммонийные соли этой кислоты.

Цель работы

Актуальным является получение и модификация угля в одну стадию из отходов переработки сырья сельского хозяйства или деревообрабатывающей промышленности (лигнин). Данная работа посвящена исследованию сорбционных свойств углеродных сорбентов, полученных из лигноцеллюлозного сырья с применением $(NH_4)_3PO_4$ в качестве активатора карбонизации.

Методики проведения эксперимента

В экспериментах в качестве исходного сырья для получения углеродного сорбента использовали опилки сосны *Pinus sylvestris*. Навески опилок пропитывали растворами $(NH_4)_3PO_4$ (соотношение опилки: раствор = 1:6, коэффициент пропитки 0,1-1) в течение 24 часов, после чего образцы высушивали при 105 °С и подвергали термической обработке при 170 °С 1-5 часов. После охлаждения образцы отмывали дистиллированной водой до нейтральной pH и отсутствия фосфатов в промывных водах, высушивали при 105 °С и хранили в эксикаторе. Отмывку проводили: а) холодной (20 °С) водой; б) горячей (60-70 °С) водой; в) кипятили в дистиллированной воде 2 часа с последующей промывкой горячей водой.

Величину удельной сорбционной площади полученных образцов (преимущественно мезопор) углеродного сорбента рассчитывали из изотермы адсорбции метиленового синего (МС). Изотермы были построены в диапазоне концентраций МС 20 – 400 мг/л. Для этого образцы коры 1 г перемешивали в колбах с 100 мл раствора МС при pH 6,5-7,5 в течение 24 часов при постоянном перемешивании механической мешалкой. Остаточное содержание красителя в надосадочной жидкости определяли фотометрически при длине волны 660 нм. Удельная площадь поверхности S была рассчитана с помощью следующего уравнения:

$$S = N_A \cdot \frac{a}{M_r(MC)} \cdot A_m, \quad (1)$$

где $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ молекул/моль – число Авогадро; *a*, г/г – удельная адсорбционная емкость коры к МС; $M_r(MC) = 373{,}9$ г/моль – относительная молекулярная масса МС; $A_m = 1{,}3$ нм^2/на одну молекулу – площадь, занимаемая одной молекулой МС. Размеры молекулы МС 1,7 х 0,76 х 0,325 нм [6]. В случае горизонтальной ориентации молекула МС занимает площадь 1,35 нм^2, при вертикальной ориентации – 0,75 нм^2. Величина 1,3 нм^2 взята как наиболее часто встречающаяся в публикациях [7-9]

Для исследования сорбционных свойств полученный углеродных материалов к навескам углей по 1 г приливали модельные растворы Cu(II) объемом 100 мл с концентрацией 153-166 мг/л и перемешивали 2 ч, после чего растворы отфильтровывали и определяли остаточную концентрацию меди в фильтрате фотометрическим методом с диэтилдитиокарбаматом Na [10], а также измеряли pH. На основе полученных данных рассчитывали величину удельной сорбции (мг/г)..

Обсуждение результатов

В зависимости от концентрации фосфата аммония, полученные опилки имели черный цвет или вкрапления частиц черного цвета в результате обугливания древесины, поскольку высушивание пропитанной опилок сопровождалось термическим разложением аммонийных солей с образованием кислых солей (гидрофосфатов, дигидрофосфатов) и фосфорной кислоты, которая имеет водоотнимающие свойства. Указанные процессы описываются следующими реакциями:

$$(NH_4)_3PO_4 \rightarrow NH_3\uparrow + (NH_4)_2HPO_4 \quad (\text{до } 40\ ^oC)$$
$$(NH_4)_2HPO_4 \rightarrow NH_3\uparrow + NH_4H_2PO_4 \quad (\text{до } 70\ ^oC)$$
$$NH_4H_2PO_4 \rightarrow NH_3\uparrow + H_3PO_4 \quad (155\ ^oC)$$

Основное действие H_3PO_4 сводится к катализу реакции дегидратации, протекающей как по внутримолекулярному механизму, так и на межмолекулярном уровне. Кроме того, H_3PO_4 может вступать в реакцию этерификации с частью гидроксильных групп с образованием кислых эфиров [11]. Формированию пор, очевидно, способствует образование газообразных продуктов разложения $(NH_4)_3PO_4$.

Фосфорилирование лигноцеллюлозного материала приводит к образованию в его структуре одно-, двух- и трёхзамещённых фосфатных групп, вследствие чего полученный углеродный сорбент приобретает явно выраженные катионообменные свойства.

После термической обработки, синтезированный сорбент необходимо отмыть от непрореагированных остатков активатора. Температура промывной воды существенно влияет на развитие пористости углеродного сорбента. Это видно из изотермы сорбции красителя метиленового синего, имеющей вид ленгмюровской – мономолекулярной с насыщением сорбента в монослое (рис. 1). Так, для сорбента, полученного при коэффициенте пропитки 0,7 и времени карбонизации 2 часа удельная сорбция, а, следовательно, и удельная сорбционная площадь, возрастала с увеличением температуры воды при промывке (табл. 1). Кипячение не только повышало эффективность отмывки сорбента от фосфатов и позволяло уменьшить расход воды на промывку, но и облегчало вымывание из пористого пространства продуктов пиролиза древесины, что способствовало развитию пористой структуры фосфоросодержащего сорбента. В свою очередь, увеличение пористости и, как следствие, рост удельной поверхности сорбента приводили к снижению остаточной концентрации Cu(II) (росту удельной сорбции). Поэтому все полученные в данной работе сорбенты после карбонизации промывали по третьему способу.

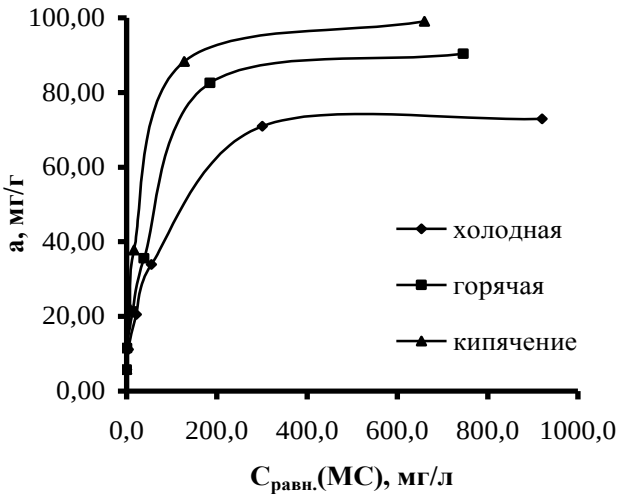


Рис. 1 – Изотермы сорбции метиленового синего (МС) фосфорилированным углеродным сорбентом при различных способах промывки

Таблица 1 – Влияние температуры промывной воды на свойства углеродного сорбента ($C(Cu(II))_{нач.}$ = 100 мг/л)

Промывка	Свойства углеродного сорбента			
	удельная сорбция метиленового синего, мг/г	удельная поверхность, $м^2/г$	остаточная концентрация Cu(II), мг/л	удельная сорбция Cu(II), мг/г
холодная	72,95	153	61,2	5,04
горячая	90,39	189	59,5	5,21
кипячение + горячая промывка	99,02	207	53,0	5,86

С увеличением коэффициента пропитки и при непродолжительной карбонизации сорбционные свойства фосфоросодержащего углеродного материала возрастают (рис. 2). Длительная карбонизация, даже без увеличения температуры выше 170 °С, по видимому, оказывает значительное деструктивное воздействие пористую структуру и состав функциональных групп, вследствие чего вне зависимости от коэффициента пропитки сорбционная емкость остается практически неизменной.

Для образцов с длительностью карбонизации 1 час pH растворов Cu(II) после сорбции снижается с 5,35 до 3,8-3,5 в зависимости от коэффициента пропитки. Поскольку в процессе извлечения ионов меди задействованы несколько механизмов, основными из которых являются ионный обмен и комплексообразование, по снижению pH в процессе сорбции можно определить, что при X = 0,14 на ионный обмен приходится 8% сорбированной меди и с увеличением X эта доля возрастает до 11,4 % при X = 1. При длительности пропитки 5 часов pH после сорбции практически не зависела от X и составляла 3,7-3,76. Принимая также во внимание достаточно низкую емкость сорбента, подвергшегося длительной карбонизации, можно сделать вывод, что медь удалялась на карбоксильных и фосфатных катионообменных группах, а доля комплексообразования в этом процессе была минимальна.

Изучение кинетики сорбционного извлечения меди показало, что концентрация меди в течение 30 мин уменьшается в два раза, после чего изменяется незначительно (рис. 3).

Из обработки результатов согласно диффузионной модели Вебера-Морриса, которая в линейной форме имеет вид

$$q_t = k_{id} t^{0,5} + c, \qquad (2)$$

где q_t – количество меди, адсорбированной в момент времени t, мг/г; k_{id} – коэффициент диффузии внутри зерен сорбента, мг/г мин; t – время сорбции; c – константа, связанная с толщиной диффузионного слоя, видно (рис. 4), что первые 10 мин, которым

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

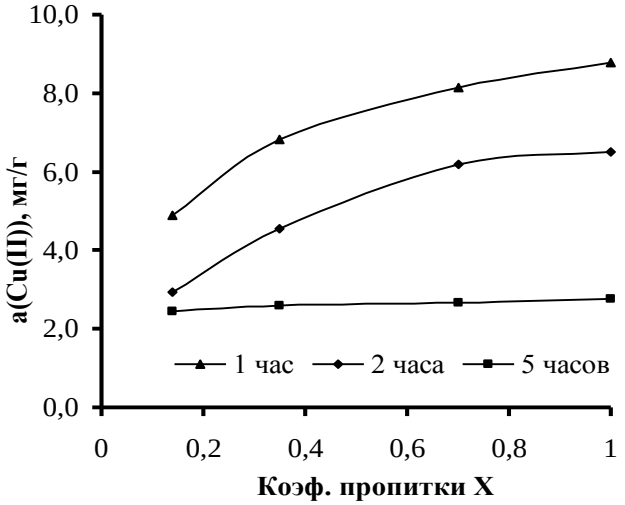


Рис. 2 – Зависимость удельной сорбции Cu(II) от коэффициента пропитки фосфоросодержащего углеродного материала

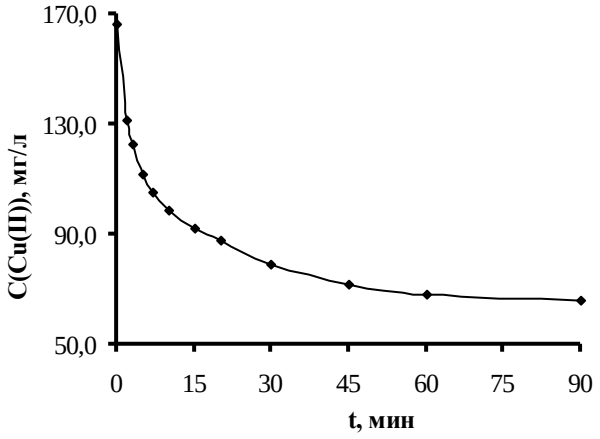


Рис. 3 – Изменение концентрации Cu(II) от времени сорбции.

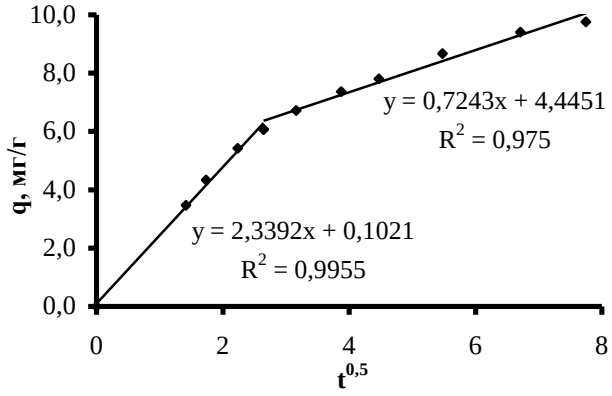


Рис. 4 – Модель Вебера-Морриса для сорбции Cu(II) фосфорилированным углеродным сорбентом

соответствует наиболее быстрое снижение концентрации Cu(II), сорбция протекает в мезо- и макропорах (начальный линейный участок с наибольшим углом наклона).

Далее происходит диффузия ионов металла вглубь микропор с последующим установлением в гетерофазной системе адсорбционного равновесия (небольшой угол наклона второго участка), коэффициент диффузии внутри зерен падает в 3,2 раза.

Выводы

Пропитка древесных опилок раствором фосфата аммония с их последующей температурной обработкой позволяет проводить процесс карбонизации при гораздо более низких температурах и получить сорбционный материал, обладающий повышенной емкостью к тяжелым металлам.

С увеличением коэффициента пропитки сырья раствором фосфата аммония при одной и той же длительности карбонизации сорбционная емкость увеличивалась. Увеличение времени карбонизации приводило к заметному ухудшению сорбционных свойств полученного материала. Преимущественным механизмом извлечения Cu(II) было комплексообразование с поверхностными функциональным группами; на ионный обмен, в зависимости от коэффициента пропитки, приходилось 8-11% удаляемого металла.

Извлечение ионов меди происходило преимущественно в мезо- и макропорах; сорбционный процесс лимитируется диффузией металла в микропорах.

Список литературы

1. **Гимаева, А. Р.** Сорбция ионов тяжелых металлов из воды активированными углеродными адсорбентами / **А. Р. Гимаева, Э. Р. Валинурова, Ф. Х. Кудашева, Д. К. Игдавлетова** // *Сорбционные и хроматографические процессы.* – 2011. – Т.П. – № 3. – С. 350 – 356.
2. **Toles, C. A.** Phosphoric Acid Activation of Nutshells for Metal and Organic Remediation: Process Optimization / **C. A. Toles, W. E. Marshall, M. M. Johns** // *Chem. Technol. Biotechnol.* – 1998. – № 72. – P. 255 – 263. – doi: 10.1002/(SICI)1097-4660(199807)72:3<255::AID-JCTB890>3.0.CO;2-P.
3. **Aggarwal, P.** The Production of Active Carbon from Corn Cob by Chemical Activation / **P. Aggarwal, D. Dollimore** // *Thermal Anal.* – 1997. – № 50. – P. 525 – 531. – doi: 10.1007/BF01979025.
4. **Abdel-Nasser, A.** Adsorption characteristics of activated carbons obtained from corncobs / **A. Abdel-Nasser, El.-Hendavy, S.E. Samra, B. S. Girgis** // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. and Eng. Aspects.* – 2001. – № 180. – P. 209 – 221. – doi: 10.1016/S0927-7757(00)00682-8.
5. **Puziy, A. M.** Surface chemistry of phosphorus-containing carbons of lignocellulosic origin / **A. M. Puziy, O. I. Poddubnaya, A. Martinez-Alonso, F. Suárez-García,**

Juan M. D. Tascón // *Carbon*. – 2005. – № 43 (14). – P. 2857 – 2868. – doi: 10.1016/j.carbon.2005.06.014.

6. **Yukselen, Y.** Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils / **Y. Yukselen, A. Kaya** // *Engineering Geology*. – 2008. – 102. – P. 38 – 45. – doi: 10.1016/j.enggeo.2008.07.002.
7. **Santamarina, J. C.** Specific surface*:* determination and relevance / **J. C. Santamarina, K. A. Klein, Y. H. Wang, E. Prencke**// *Canadian Geotechnical Journal*. – 2002. – 39, № 1. – P. 233 – 241. – doi: 10.1139/T01-077.
8. **Attia, A. A.** Capacity of activated carbon derived from pistachio shells by H_3PO_4 in the removal of dyes and phenol / **A. A. Attia, B. S. Girgis, S. A. Khedr** // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. – 2003. – 78, № 6. – P. 611 – 619. – doi: 10.1002/jctb.743.
9. **Aringhieri, R.** Testing a simple methylene blue method for surface area estimation in soils / **R. Aringhieri, G.Pardini, M.Gispert, A. Sole** // *Agrochimica*. – 1992, 36, № 3. – P. 224 – 232.
10. **Хохотва, О. П.** Видалення з води іонів міді модифікованим феритним сорбентом / **О. П. Хохотва, Ю. І. Аветісян** // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки.* – 2014, – № 23, – С. 133 – 136.
11. **Никитин, Н. И.** Химия древесины и целлюлозы / **Н. И. Никитин**, *М-Л: Изд-во академии НАУК СССР*, 1962, 711 с.

Bibliography (transliterated)

1. **Gimaeva, A. R., Valinurova, Je. R., Kudasheva, F. H., Igdavletova, D. K.** Sorbcija ionov tjazhelyh metallov iz vody aktivirovannymi uglerodnymi adsorbentami, *Sorbcionnye i hromatograficheskie processy*, 2011, T.P. № **3**, 350 - 356.
2. **Toles, C. A., Marshall, W. E., Johns, M. M.** Phosphoric Acid Activation of Nutshells for Metal and Organic Remediation: Process Optimization, *Chem. Technol. Biotechnol*, 1998, № **72**, 255 – 263, doi: 10.1002/(SICI)1097-4660(199807)72:3<255::AID-JCTB890>3.0.CO;2-P.
3. **Aggarwal, P., Dollimore, D.** The Production of Active Carbon from Corn Cob by Chemical Activation, *Thermal Anal*, 1997, № **50,** 525 - 531, doi: 10.1007/BF01979025.
4. **Abdel-Nasser, A., Hendavy, El., Samra, S.E., Girgis, B. S.** Adsorption characteristics of activated carbons obtained from corncobs, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. and Eng. Aspects*, 2001, № **180,** 209 - 221, doi: 10.1016/S0927-7757(00)00682-8.
5. **Puziy, A. M., Poddubnaya, O. I., Martinez-Alonso, A., Suárez-García, F., Juan, M. D. Tascón** Surface chemistry of phosphorus-containing carbons of lignocellulosic origin, *Carbon*, 2005, № **43** (14), 2857 - 2868, doi: 10.1016/j.carbon.2005.06.014.
6. **Yukselen, Y., Kaya, A.** Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils, *Engineering Geology*, 2008, **102,** 38 - 45, doi: 10.1016/j.enggeo.2008.07.002.
7. **Santamarina, J. C., Klein, K. A., Wang, Y. H., Prencke, E.** Specific surface*:* determination and relevance/ *// Canadian Geotechnical Journal*, 2002, **39**, № 1, 233 - 241, doi: 10.1139/T01-077.
8. **Attia, A. A., Girgis, B. S., Khedr, S. A.** Capacity of activated carbon derived from pistachio shells by H_3PO_4 in the removal of dyes and phenol, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2003, **78**, № 6, 611 - 619, doi: 10.1002/jctb.743.
9. **Aringhieri, R., Pardini, G., Gispert, M., Sole, A.** Testing a simple methylene blue method for surface area estimation in soils, *Agrochimica*, 1992, **36**, № 3, 224-232.
10. **Khokhotva, O. P., Avetisyan, Y. I**. Vydalennya z vody ioniv midi modyfikovanym ferytnym sorbentom, *Problemy vodopostachannya, vodovidvedennya ta hidravliky*, 2014, № **23**, 133 - 136.
11. **Nikitin, N. I.** Himija drevesiny i celljulozy. *M-L: Izd-vo akademii nauk SSSR*, 1962, 711 s.

Сведения об авторах (About authors)

Хохотва Александр Петрович **–** кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт" им. И. Сикорского, доцент кафедры экологии и технологи растительных полимеров; г. Киев, Украина; e-mail: khokhotva@bigmir.net.

Oleksandr Khokhotva **–** Ph. D., Docent, Associate Professor, Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: khokhotva@bigmir.net.

Малыхина Карина Артуровна **–** аспирант кафедры экологии и технологи растительных полимеров, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт" им. И. Сикорского; г. Киев, Украина; e-mail: malykhinakarina@gmail.com.

Karina Malykhina **–** graduate student of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: malykhinakarina@gmail.com.

Лиштва Павел Валерьевич – студент кафедры экологии и технологии растительных полимеров, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт" им. И. Сикорского, г. Киев, Украина; e-mail: pavell95ua@yahoo.com.

Pavlo Lyshtva – student of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: pavell95ua@yahoo.com.

Федорок Яна Анатолиевна – студент кафедры экобиотехнологии и биоэнергетики, факультет биотехнологии, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт" им. И. Сикорского, г. Киев, Украина; e-mail: yana__fedorok@mail.ru.

Yana Fedorok – student of Department of environmental biotechnology and bioenergy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: yana__fedorok@mail.ru.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Хохотва, А. П. Фосфорилированный углеродный сорбент для очистки воды от тяжелых металлов / **А. П. Хохотва, К. А. Малыхина, П. В. Лиштва, Я. А. Федорок** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 205-210. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.29.

Please cite this article as:

Khokhotva, O., Malykhina, K., Lyshtva, P., Fedorok, Y. Phosphorylated carbon sorbent for the removal of heavy metals from water. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 205-210, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.29.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Хохотва, О. П. Фосфорильований вуглецевий сорбент для очистки води від важких металів **/ О. П. Хохотва, К. А. Малихіна, П. В. Лиштва, Я. А. Федорок //** *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 205-210. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.29.

АНОТАЦІЯ *Синтезовано фосфорсодержащий вуглецевий сорбент шляхом термічної обробки (при 170 °С) соснової тирси, попередньо просоченої розчинами* $(NH_4)_3PO_4$ *різної концентрації. Досліджено вплив коефіцієнта просочення і тривалості карбонізації на ефективність вилучення Cu(II) з модельних розчинів. За сорбцією метиленового синього встановлено, що відмивання сорбенту після карбонізації кип'ятінням помітно збільшує питому сорбційну поверхню і сприяє зростанню питомої ємності сорбенту по міді. Процес сорбції Cu (II) лімітується дифузією металу в мікропорах.*
Ключові слова: *соснова тирса; фосфорилювання; фосфат амонію; важкі метали; адсорбція*

Поступила (received) 27.02.2017

УДК 547.495.6:547.93 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.30

НОВЫЙ СПОСОБ СИНТЕЗА СОЛЕЙ 1-N-АЛКОКСИАМИНОПИРИДИНИЯ

В. Г. ШТАМБУРГ[1], В. В. ШТАМБУРГ[1], С. В. КРАВЧЕНКО[2*], А. В. МАЗЕПА[3], А. А. АНИЩЕНКО[4], Е. А. ПОСОХОВ[5]

[1] кафедра органической химии, Украинский государственный химико-технологический университет, Днепр, УКРАИНА
[2] кафедра химии, Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, Днепр, УКРАИНА
[3]Институт физической химии им. А. В. Богатского НАН Украины, Одесса, УКРАИНА
[4] кафедра органической химии, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепр, УКРАИНА
[5] кафедра органической химии, билохимии и микробиологии, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, УКРАИНА
** email: svtailor@ukr.net*

АННОТАЦИЯ *Найдено, что взаимодействие метил-N-хлор-N-алкоксикарбаматов с 4-диметиламинопиридином является общим способом синтеза хлоридов 1-N-алкоксиаминопиридиния. Предложен новый способ синтеза хлоридов 1-N-алкоксиаминопиридиния аммонолизом хлоридов N-(1-пиридиний)-N-алкоксимочевин в спиртовом растворе при комнатной температуре. Впервые получен фторид 1-N-метоксиамино-4-диметиламинопиридиния взаимодействием хлорида N-(1-4-диметиламинопиридиний)-N-метоксимочевины с KF в ацетонитриле. Структура солей 1-N-алкоксиаминопиридиния доказана с помощью данных спектров ЯМР ^1H, ^{13}C и масс-спектров.*
Ключевые слова: *соли 1-N-алкоксиаминопиридиния; хлориды N-(1-пиридиний)-N-алкоксимочевин; аммонолиз; N-хлор-N-алкоксикарбаматы; N-алкоксигидразины; декарбамоилирование; синтез; обмен аниона; 4-диметиламинопиридин.*

A NEW SYNTHESIS OF N-ALKOXYAMINOPYRIDINIUM SALTS

V. G. SHTAMBURG[1], V. V. SHTAMBURG[1], S. V. KRAVCHENKO[2]*, A. V. MAZEPA[3], A. A. ANISHCHENKO[4], E. A. POSOKHOV[5]

[1] Department of organic chemistry, Ukrainian State Chemico- Technologycal University, Dnepr, UKRAINE
[2] Department of chemistry, Dnipropetrovsk State Agrarian-Economic University, Dnepr, UKRAINE
[3]A. V. Bogatsky Physico-Chemical Institute of NAS of Ukraine, Odessa, UKRAINE
[4] Department of organic chemistry, O. Gonchar Dnepropetrovsk National Unioversity, Dnepr, UKRAINE
[5] Department of organic chemistry, biochemistry and microbiology, National Technical University «KhPI», Kharkov, UKRAINE
** email: svtailor@ukr.net*

ABSTRACT *It was found, that methyl N-alkoxy-N-chlorocarbamates interaction with 4-dimethylaminopyridine was overall manner of synthesis of 1-N-alkoxyaminopyridinium chlorides. New1-N-n-octyloxyamino-4-dimethylaminopyridinium and 1-N-benzyloxyamino-4-dimethylaminopyridinium chlorides have been synthesized by the methyl N-chloro-N-n-octyloxycarbamate and methyl N-benzyloxy-N-chlorocarbamate interaction with 4-dimethylaminopyridine in acetonitrile solution, respectively. The novel synthesis of 1-N-alkoxyaminopyridinium chlorides by reaction of N- -алкоксимочевин alkoxy-N-(1-pyridinium)ureas chlorides ammonolysis has been proposed. 1-N-Methoxyamino-4-dimethylaminopyridinium chloride and 1-N-n-butyloxyamino-4-dimethylaminopyridinium chloride have been synthesized by reaction of N-1-4-dimethylaminopyridinium-N-methoxyurea chloride and N-n-butyloxy-N-(1-4-dimethylaminopyridinium)urea chloride, respectively, with excess of ammonia in ethanol solution at room temperature during few minutes. Evidently, the carbamoyl proton elimination by ammonia causes further formation 1-N-alkoxy-4-dimethylaminopyridinium chlorides and HNCO. It is new example of decarbamoylation of N-alkoxy-N-(1-pyridinium)ureas salts. 1-N-Metoxyamino-4-dimethylaminopyridinium fluoride has been synthesized by N-1-(4-dimethylamino)pyridinium-N-methoxyurea chloride reaction with potassium fluoride in acetonitrile. Probably, in this reaction N-1-(4-dimethylamino)pyridinium-N-methoxyurea caution decarbamoylation occurs after the chloride anion exchange on fluoride anion. 1-N-Alkoxyaminopyridinium salts structures have been confirmed by data of NMR ^1H spectra, NMR ^{13}C spectra and mass-spectra.*
Keywords: *1-N-alkoxyaminopyridinium salts; N-alkoxy-N-(1-pyridinium)ureas chlorides; ammonolysis; N-alkoxy-N-chlorocarbamates; N-alkoxhydrazines; decarbamoylation; synthesis; anion exchange; 4-dimethylaminopyridine.*

© В. Г. ШТАМБУРГ, В. В. ШТАМБУРГ, С. В. КРАВЧЕНКО, А. В. МАЗЕПА, А. А. АНИЩЕНКО, Е. А. ПОСОХОВ, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Введение

Данная статья является продолжением исследований, посвященных способам синтеза и изучению строения солей 1 - (N - алкоксиамино) пиридиния [1–8].

Анализ последних исследований и литературы

Соли 1 - N - алкоксиаминопиридиния селективно образуются при взаимодействии N-хлор-N-алкоксиаминов **1** [1,3,6] и N-хлор-N-алкоксиамидов **2**,**3** [2,4,5,7,8] с пиридинами (рис. 1) и являются уникальной стабильной разновидностью N-алкоксигидразинов [9–11].

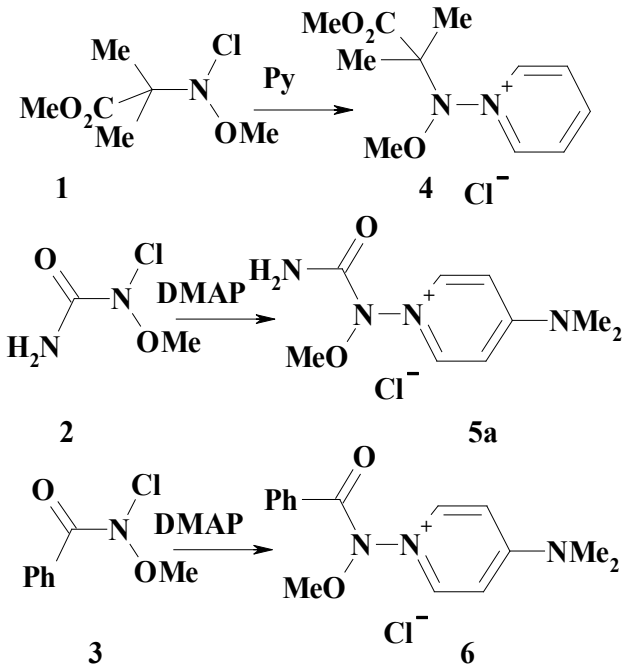


*Рис. 1 – Схема синтеза хлоридов 1-N-алкоксиаминопиридиния **4-6***

Данным способом получены соли 1-N-алкокси-N-треталкиламинопиридиния **4** [1,3,6], 1-N-алкокси-N-карбамоиламинопиридиния **5** [2,4,5,7] и 1-N-алкокси-N-бензоиламинопиридиния **6** [7].

В соединениях **4-6** невозможна реализация аномерного эффекта $n_N \rightarrow \sigma^*_{N\text{-}OR}$. [12,13].

Взаимодействием N - хлор - N - алкоксикарбаматов **7a-d** с диметиламинопиридином (ДМАП) впервые получены незамещенные по атому азота соли 1-N-алкоксиаминопиридиния **8a-d** [14].

Цель работы

Целью данного исследования является как расширение границ применимости уже известного способа синтеза хлоридов 1-N-алкоксиаминопиридиния **8** из N-хлор-N-алкоксикарбаматов **7** [14], так и создание нового способа получения солей 1-N-алкоксиаминопиридиния **8** из хлоридов N-(1-пиридиний)-N-алкоксимочевин (хлоридов 1-N-алкокси-N-карбамоиламинопиридиния) **5**.

Материалы исследований

Данная статья посвящена дальнейшему развитию способа синтеза хлоридов 1-N-алкоксиаминопиридиния **8** из N-хлор-N-алкоксикарбаматов **7**, а также созданию альтернативного способа соединений **8** аммонолизом хлоридов N-(1-пиридиний)-N-алкоксимочевин (соединения **5a** и его аналога **5c**).

Результаты исследований

Нами установлено, что взаимодействие N-хлор-N-алкоксиуретанов **7** с ДМАП является довольно общим способом синтеза хлоридов 1-N-алкоксиаминопиридиния **8**. Это подтверждается селективным образованием весьма липофильного хлорида 1 – N – н – октилоксиамино – 4 - диметиламинопиридиния **8e** и хлорида 1-N-н-бензилоксиамино-4-диметиламинопиридиния **8f** при взаимодействии метил-N-хлор-N-алкоксикарбаматов **7e,f**, соответственно, с ДМАП в MeCN (рис. 2). Соединение **7f** – это первый представитель солей 1-N-алкоксиаминопиридиния **8** с N-аралкоксильным заместителем.

Также предложены две методики выделения соли **8a**, основанные на его относительно слабой растворимости в органических растворителях.

Строение соединений **8e,f** подтверждается данными спектров ЯМР ^{1}H и ^{13}C, а так же масс-спектрами. В спектрах ЯМР ^{1}H солей **8e,f** в слабом поле присутствуют характеристичные сигналы протона группы NHO в виде синглета в области 11,00 – 11,60 м.д.

Исследование строения хлоридов 1-N-алкоксиаминопиридиния **8a**,**b** с помощью РСА [14] показало, что оно более адекватно описуется хиноидной структурой (рис. 2) с положительным зарядом на атоме азота диметиламиногруппы.

Нами также предложен новый способ синтеза хлоридов 1-N-алкоксиаминопиридиния **8** аммонолизом в этаноле при комнатной температуре хлоридов N-(1-пиридиний)-N**5** (рис. 3). Реакция протекает при комнатной температуре относительно селективно и заканчивается через 26–45 минут.

Длительная выдержка солей **8** в этанольном растворе аммиака не желательна, т.к. в дальнейшем наблюдается их деструкция до гидрохлорида ДМАП.

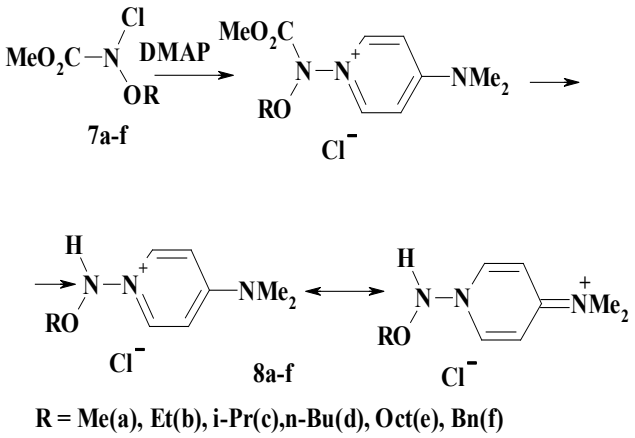


*Рис. 2 – Схема синтеза хлоридов 1-N-алкоксиаминопиридиния **8** из N-хлор-N-алкоксикарбаматов **7***

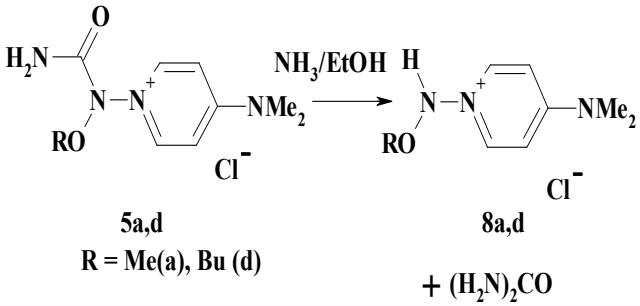


*Рис. 3 – Схема синтеза солей **8** аммонолизом хлоридов N-(1-пиридиний)-N-алкоксимочевин **5***

Механизм декарбамоилирования N-(1-пиридиний)-N-алкоксимочевин **5** в присутствии оснований остается неясным, но, по-видимому, на первой стадии происходит отрыв протона молекулой аммиака от карбамоильной группы с последующим отщеплением изоциановой кислоты, которая далее превращается в мочевину. При этом образуется также хлорид 1-N-алкоксиаминопиридиния **8.**

Найдено, что кратковременная обработка хлорида N - (1 - 4 - диметиламиопиридиний) - N -метоксимочевины **5a** избытком KF в MeCN приводит как к декарбамоилированию, так и к обмену аниона – образуется фторид 1-N-метоксиамино-4-диметиламинопиридиния **9** (рис. 4), строение которого установлено с помощью спектроскопии ЯМР ^{1}H и масс-спектрометрии.

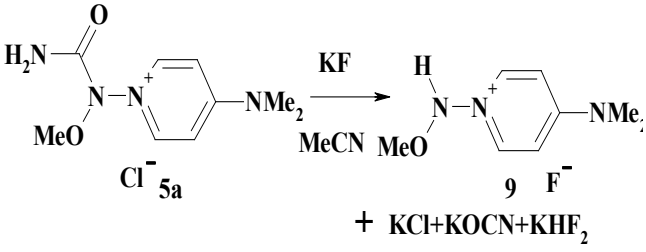


*Рис. 4 – Схема синтеза фторида 1-N-метоксиамино-4-диметиламинопиридиния **9***

Вероятно, в данном случае первоначально происходит обмен хлорид-аниона на фторид-анион. Образующийся при этом хлорид калия нерастворим в MeCN и выпадает в осадок. Фторид-анион в ацетонитрильном растворе выступает в качестве сильного основания, отрывающего протон от катиона N - (1 - 4 - диметиламинопиридиний) – N - метоксимочевины **5a**, что сопровождается отщеплением HCNO. Данная реакция является удобным способом получения ранее неизвестных фторидов 1-N-алкоксиаминопиридиния.

Экспериментальная часть

Спектры ЯМР ^{1}H регистрировали на спектрометре VARIAN VXR-300 (300 МГц) и VARIAN GEMINI-400 (400 МГц), Me_4Si в качестве внутреннего стандарта; приведены значения δ, м.д., КССВ (*J*), Гц. Спектры ЯМР ^{13}C регистрировали на спектрометре VARIAN VXR-300 (75 МГц, Me_4Si в качестве внутреннего стандарта, APT-режим). Масс-спектры регистрировали на масс-спектрометре VG 770-70EQ в FAB режиме. Бензол сушил кипячением и перегонкой над Na. Этанол сушили кипячением и перегонкой над Ca. MeCN сушили кипячением и перегонкой над P_2O_5. 4-Диметиламинопиридин (ДМАП) сублимировали в вакууме 3 мм рт. ст. KF сушили в вакууме 3 мм рт. ст. при 150 ºC.

Хлорид 1 - N - метоксиамино - 4 - диметиламинопиридиния (8a) [14]. Раствор 0,207 г (1,694 ммоль) ДМАП в 13 мл MeCN добавили к раствору 0,236 г (1,694 ммоль) метил-N-хлор-N-метоксикарбамата **7a** в 6 мл MeCN при -15 °C, реакционную смесь нагрели до 20 °C в течение 17 ч, выдерживали ее при 5 °C в течение 5 ч, после чего растворитель упарили в вакууме, остаток экстрагировали 8 мл PhH при 5 °C в течение 20 ч, затем осадок фильтровали и сушили при 20 °C и 3 мм рт. ст., затем твердый осадок **A** (вариант A [15]) экстрагировали 11 мл CH_2Cl_2 при 6 °C в течение 19 ч, фильтровали, нерастворившийся осадок сушили при 3 мм рт. ст. Получено 0,146 г (39 %) моногидрата) хлорида 1-N-метоксиамино-4-диметиламинопиридиния **8a**·H_2O, бесцветные

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

кристаллы, т.пл. 83 – 85 °С (моногидрат) (CH_2Cl_2 – PhH), весьма гигроскопичен. Спектр ЯМР ^{1}H, 300 МГц, $(CD_3)_2SO$, δ, м.д., (*J*, Гц): 3,26 (6H, с, NMe_2); 3,58 (3H, с, NOMe); 7,05 (2H, д, ^3J = 7,5 Гц, C(3)H, C(5)H); 8,46 (2H, д, ^3J = 7,5 Гц, C(2)H, C(6)H); 11,08 (1H, с, NHO). Спектр ЯМР ^{13}C, 75 МГц, $CDCl_3$, δ, м.д.: 40,77 (NMe_2); 60,76 (NOMe); 107,39 (C(3), C(5)); 142,49 (C(2), C(6)); 156,96 (C(4)). Масс-спектр (FAB, m/z, $I_{rel.}$(%)): 373 [$2M^+ \cdot Cl^-$] (3), 371 [$2M^+ \cdot Cl^-$] (9), 168 M^+ (100), 137 (24). Найдено (%): N 18,76; Cl 15,65. $C_8H_{14}ClN_3O \cdot H_2O$. Вычислено (%): N 18,95; Cl 15,99. К оставшемуся CH_2Cl_2-фильтрату прибавили 17 мл Et_2O, смесь выдерживали при -16 °С в течение 3 ч, образовавшийся осадок фильтровали и сушили при 3 мм рт. ст. Дополнительно получено 0,099 г (26 %) соединения **8a**·H_2O.

Вариант Б. Реакционную смесь **А**, являющуюся (согласно данным спектра ЯМР [1]) смесью соединения **8a** и ДМАП в соотношении 78:22% мольн., экстрагировали 6,6 мл MeCN при 5 °С в течение 22 ч, нерастворившийся осадок фильтровали и сушили в вакууме 3 мм рт. ст. Получено 0,086 г (23 %) чистого (согласно данным спектра ЯМР ^{1}H) моногидрата хлорида 1-N-метоксиамино-4-диметиламинопиридиния **8a**·H_2O. Оставшийся MeCN-экстракт упаривали в вакууме, остаток растворяли в 7,3 мл CH_2Cl_2, добавляли 12,1 мл PhH, выдерживали при 5 °С в течение 20 ч, образовавшийся осадок фильтровали и сушили в вакууме 3 мм рт. ст. Получено 0,061 г (16 %) соединения **8a**·H_2O.

Хлорид 1 - N - н - бутилоксиамино - 4 - диметиламинопиридиния (моногидрат) (8d) H_2O [14]·был получен по аналогичной методике из метил-N-хлор-N-н-бутилоксикарбамата **7d** [16] в MeCN растворе, выход 46 %, гигроскопичные бесцветные кристалл, т.пл. 49–51 °С (моногидрат.). Спектр ЯМР ^{1}H, 300 МГц, $(CD_3)_2SO$, δ, м.д., (*J*, Гц): 0,86 (3H, т, $NOCH_2CH_2CH_2Me$, ^3J = 7,5 Гц); 1,27 (3H, секс, $NOCH_2CH_2CH_2Me$, ^3J = 7,5 Гц); 1,51 (3H, квинт, $NOCH_2CH_2CH_2Me$, ^3J = 7,5 Hz); 3,25 (6H, с, NMe_2); 3,79 (2H, т, $NOCH_2$, ^3J = 6,3 Гц); 7,05 (2H, д, C(3)H, C(5)H, ^3J = 7,8 Гц); 8,46 (2H, д, C(2)H, C(6)H, ^3J = 7,8 Гц); 11,00 (1H, с, NHO). Спектр ЯМР ^{13}C, 75 МГц, $CDCl_3$, δ, м.д.: 13,52 ($NO(CH_2)_3Me$); 18,76 ($NO(CH_2)_2CH_2Me$); 30,12 ($NOCH_2CH_2CH_2Me$); 40,68 (NMe_2); 73,27 ($NOCH_2Pr$); 107,30 (C(3), C(5)); 142,37 (C(2), C(6)); 156,97 (C(4)). Масс-спектр (FAB, m/z, $I_{rel.}$(%)): 457 [$2M^+ \cdot Cl^-$] (1,3), 455 [$2M^+ \cdot Cl^-$] (4), 210 M^+ (100), 136 (16), 122 (28). Найдено (%): C 53,45; H 8,45; N 16,98. $C_{11}H_{20}ClN_3O$. Вычислено (%): C 53,76; H 8,20; N 17,10.

Хлорид 1 - N - этоксиамино - 4 - диметиламинопиридиния (8b) [14]. Раствор 0,198 г (1,623 ммоль) ДМАР в 10 мл MeCN добавили к раствору 0,248 г (1,612 ммоль) метил-N-хлор-N-этоксикарбамата **7b** [16] в 5 мл MeCN при -17 °С, реакционную смесь нагрели до -11 °С в течение 1 ч, выдерживали ее при 12 °С в течение 42 ч, после чего растворитель упарили на 2/3 в вакууме, образовавшийся осадок фильтровали, сушили в вакууме 2 мм рт. ст. Получено 0,158 г (45 %) 1-N-этоксиамино-4-диметиламинопиридиния хлорида **8b,** бесцветные кристаллы, т.пл. 168-172 °С(с разл.) (MeCN). Спектр ЯМР ^{1}H, 300 МГц, $(CD_3)_2SO$, δ, м.д., (*J*, Гц): 1,13 (3H, т, ^3J = 7,0 Гц, $NOCH_2Me$,); 3,25 (6H, с, NMe_2); 3,83 (2H, к, ^3J =7,0 Гц, $NOCH_2Me$,); 7,04 (2H, д, ^3J = 7,8 Гц, C(3)H, C(5)H); 8,46 (2H, д, ^3J = 7,8 Гц, C(2)H, C(6)H); 10,90 (1H, с, NHO). Спектр ЯМР ^{13}C (75 МГц, $CDCl_3$): 13,43 ($NOCH_2Me$); 40,61 (NMe_2); 68,64 ($NOCH_2Me$); 107,16 (C(3), C(5)); 142,19 (C(2), C(6)); 156,68 (C(4)). Масс-спектр (FAB, m/z, $I_{rel.}$(%)): 401 [$2M^+ \cdot Cl^-$] (2), 399 [$2M^+ \cdot Cl^-$] (7), 182 M^+ (100), 137 (13), 123 (17). Найдено (%): N 19,16; Cl 16,21. $C_9H_{16}ClN_3O$. Вычислено (%): N 19,30; Cl 16,29. MeCN-Фильтрат упарили в вакууме, остаток растворили в 5 мл CH_2Cl_2 и добавили 5 мл Et_2O. После выдерживания при -16 °С в теч. 20 ч образовавшийся осадок отфильтровали, сушили в вакууме. Дополнительно получено 0,095 г (27 %) соединения **8b**.

Тем же путем получили **хлорид 1-(N-изопропилоксиамино)-4-диметиламинопиридиния (8c)** [14] из метил-N-хлор-N-изопропил-оксикарбамата **7c** [16] в Et_2O растворе, выход 81 %, бесцветные кристаллы, т.пл. 175–177 °С (с разл.) (MeCN – Et_2O). Спектр ЯМР ^{1}H, 300 МГц, $(CD_3)_2SO$, δ, м.д., (*J*, Гц): 1,13 (6H, д, ^3J = 5,7 Гц, $NOCHMe_2$); 3,25 (6H, с, NMe_2); 4,04 (1H, септ, ^3J = 5,7 Гц, $NOCHMe_2$); 7,01 (2H, д, ^3J = 7,5 Гц, C(3)H, C(5)H); 8,43 (2H, д, ^3J = 7,5 Гц, C(2)H, C(6)H); 10,58 (1H, с, NHO). Спектр ЯМР ^{13}C, 75 МГц, $CDCl_3$, δ, м.д.: 21,12 ($NOCHMe_2$); 40,70 (NMe_2); 75,15 ($NOCHMe_2$); 107,24 (C(3), C(5)); 142,26 (C(2), C(6)); 156,81 (C(4)). Масс-спектр (FAB, m/z, $I_{rel.}$(%)): 429 [$2M^+ \cdot Cl^-$] (2), 427 [$2M^+ \cdot Cl^-$] (5), 196 M^+ (100), 137 (10), 123 (14). Найдено (%): N 18,01; Cl 15,25. $C_{10}H_{18}ClN_3O$ Вычислено (%): N 18,13; Cl 15,30.

Хлорид 1 - N - н - октилоксиамино - 4 - диметиламинопиридиния (8e). К раствору 0,220 г (0,975 ммоль) метил-N-хлор-N-н-октил-оксикарбамата **7e** [17] в 5 мл MeCN при -8 °С прибавили раствор 0,126 г (1,032 ммоль) ДМАП в 8 мл MeCN, в течение 2 ч подняли температуру реакционной смеси до 0 °С, выдерживали 45 ч при 5 °С, затем удалили растворитель в вакууме. Остаток промыли 10 мл PhH, нерастворившийся остаток экстрагировали 3 мл CH_2Cl_2, CH_2Cl_2-экстракт упарили в вакууме, остаток выдерживали при 2 °С и 2 мм рт. ст. Получено 0,145 г (49 %) хлорида 1-N-н-октилоксиамино-4-диметиламино-пиридиния **8e**, желтоватое вязкое масло. Спектр ЯМР ^{1}H, 300 МГц, $(CD_3)_2SO$, δ, м.д., (*J*, Гц): 0,85

(3H, т, ^3J = 6,6 Гц,, $NO(CH_2)_7Me$); 1,15–1,23 (10H, м, $NOCH_2CH_2(CH_2)_5Me$); 1,43–1,59 (2H, м, $NOCH_2CH_2(CH_2)_5Me$); 3,24 (6H, с, NMe_2); 3,77 (2H, м, ^3J = 5,4 Гц, $NOCH_2$); 7,04 (д, 2H, ^3J = 7,2 Гц, C(3)H, C(5)H); 8,46 (д, 2H, ^3J = 7,2 Гц, C(2)H, C(6)H); 11,00 (1H, с, NHO). Спектр ЯМР ^{13}C, 75 МГц, $CDCl_3$, δ, м.д., APT режим: 1) CH, CH_3:. 13,8 (Me); 40,7 (NMe_2); 107,2 (C-3, C-5 Py); 142,4 (C-2, C-6 Py); 2) $C_{четн.}$: 22,3; 25,6; 28,1; 29,0; 31,5; 48,5 ($NOCH_2(CH_2)_6Me$); 73,4 ($NOCH_2$); 156,8 (C-4 Py). Масс-спектр, *m/z* ($I_{отн}$ %): 266 M^+ (90), 152 (12), 137 (40), 123 (100). Найдено (%): C 59,82; H 9,55; N 13,82. $C_{15}H_{28}ClN_3O$. Вычислено (%): C 59,69; H 9,35; N 13,92.

Хлорид 1 - N - бензилоксиамино - 4 - диметиламинопиридиния (8f). К раствору 0,163 г (0,758 моль) метил-N-хлор-N-бензилоксикарбамата **7f** [15] в 5 мл MeCN при -22 °C прибавили раствор 0,115 г (0,945 ммоль) ДМАП в 10 мл MeCN, в течение 20 ч подняли температуру реакционной смеси до 18 °C, затем удалили растворитель в вакууме. Остаток экстрагировали 2·10 мл PhH при 5 °C в течение 2 суток, нерастворившийся осадок фильтровали и сушили при 3 мм рт. ст. и 20 °C. Получено 0,153 г (72 %) хлорида 1-N-бензилоксиамино-4-диметиламинопиридиния **8f**, содержащего незначительные примеси. После дополнительной очистки переосаждением 3 мл PhH из раствора в 1 мл CH_2Cl_2 получено 0,068 г (36 %) соединения **38f**, бесцветное твердое очень гигроскопичное вещество. Спектр ЯМР ^{1}H, 300 МГц, $(CD_3)_2SO$, δ, м.д., (*J*, Гц): 3,24 (6H, с, NMe_2); 4,86 (2H, с, $NOCH_2$); 7,00 (2H, д, ^3J = 7,5 Гц, C(3)H, C(5)H Py); 7,34 (5H, с, Ph); 8,38 (2H, д, ^3J = 7,5 Гц, C(2)H, C(6)H Py); 10,97 (1H, с, NHO). Спектр ЯМР ^{1}H, $CDCl_3$, δ, м.д., (*J*, Гц): 3,20 (6H, с, NMe_2); 4,83 (2H, с, $NOCH_2$); 6,77 (2H, д, ^3J = 7,6 Гц, C(3)H, C(5)H Py); 7,26 (5H, с, Ph); 8,27 (2H, д, ^3J = 7,6 Гц, C(2)H, C(6)H Py); 11,60 (1H, с, NHO). Спектр ЯМР ^{13}C, 75 МГц, $CDCl_3$, δ, м.д., APT режим: 1) CH, CH_3:. 40,4 (NMe_2); 106,8 (C-3, C-5 Py); 127,9; 128,0; 128,4 (C-2,3,4,5,6 Ph); 142,0 (C-2, C-6 Py); 2) $C_{четн.}$: 75,5 ($NOCH_2$); 135,8 (C-1 Ph); 156,3 (C-4 Py). Масс-спектр, *m/z* ($I_{отн}$ %): 525 [$2M^+ \cdot Cl^-$] (1), 523 [$2M^+ \cdot Cl^-$] (1), 244 M^+ (100), 152 (7), 137 (28), 123 (33), 91 (7). Найдено (%): C 59,96; H 6,85; N 14,76. $C_{14}H_{18}ClN_3O$. Вычислено (%): C 60,10; H 6,49; N 15,02.

Получение хлорида 1-N-метоксиамино-4-диметиламинопиридиния (8a) аммонолизом хлорида N-1-(4-диметиламинопиридиний) - N - метоксимочевины (5a). К смеси 0,0424 г (0,1719 ммоль) хлорида N-1-(4-диметиламинопиридиний)-N-метоксимочевины **5a** [8] и 2 мл EtOH прибавили раствор 0,0272 г (1,597 ммоль) NH_3 в 2,5 мл EtOH, выдерживали реакционный раствор при 22 ºC в течение 45 минут, затем удалили растворитель в вакууме 3 мм рт. ст. при 22 ºC. Остаток экстрагировали 13 мл CH_2Cl_2, экстракт упарили в вакууме. Остаток растворили в 2,5 мл CH_2Cl_2, добавили 7,5 мл PhH, выдерживали 24 ч при 10 ºC, осадок фильтровали и сушили в вакууме 3 мм рт. ст. Получено 0,026 г (68 %) моногидрата хлорида 1-N-метоксиамино-4-диметиламинопиридиния **8a**, идентифицированного по спектру ЯМР ^{1}H и масс-спектру с заведомым образцом.

Хлорид 1 - N - н - бутилоксиамино - 4 - диметиламинопиридиния (8d). К смеси 0,0570 г (0,1972 ммоль) хлорида N-1-(4-диметиламинопиридиний)-N-бутилоксимочевины **5d** [8] и 1 мл EtOH прибавили раствор 0,0542 г (1,597 ммоль) NH_3 в 0,5 мл EtOH, выдерживали реакционный раствор при 15 ºC в течение 26 минут, затем удалили растворитель в вакууме 3 мм рт. ст. при 15 ºC. Остаток экстрагировали 12 мл CH_2Cl_2, экстракт упарили в вакууме. Получено 0,0352 г (67 %) моногидрата хлорида 1-N-н-бутилоксиамино-4-диметиламинопиридиния **8d**, идентифицированного по спектру ЯМР ^{1}H и масс-спектру с заведомым образцом. Нерастворившийся в CH_2Cl_2 осадок, 0,0088 г (74 %), является, согласно масс-спектру, мочевиной.

Фторид 1 - N - метоксиамино - 4 - диметиламинопиридиния (9). Смесь 0,0583 г (0,2363 ммоль) хлорида N-1-(4-диметиламинопиридиний)-N-метоксимочевины **5a**, 0,30 г (5,340 ммоль) KF и 10 мл MeCN интенсивно перемешивали при 19-20 ºC в теч. 20 минут, затем осадок KF отфильтровали, промыли 5 мл MeCN, объединенный фильтрат упарили в вакууме. Остаток экстрагировали 3 мл CH_2Cl_2, экстракт упарили в вакууме. Остаток растворили в 0,5 мл CH_2Cl_2, полученный раствор прикапали в 5 мл PhH, выпавшую нижнюю жидкую фазу отделили и выдерживали в вакууме 2 мм рт. ст. при 20 ºC. Получено 0,0342 г (77 %) фторида 1-N-метоксиамино-4-диметиламинопиридиния **9**, желтое масло. Спектр ЯМР ^{1}H, 400 МГц, $CDCl_3$, δ, м.д., (*J*, Гц): 3,26 (6H, с, NMe_2); 3,62 (3H, с, NOMe); 6,78 (2H, д, ^3J = 7,6 Гц, C(3)H, C(5)H); 8,63 (2H, д, ^3J = 7,6 Гц, C(2)H, C(6)H). Масс-спектр (FAB, m/z, $I_{rel.}$(%)): 168 M^+ (100), 137 (49), 123 (25).

Заключение

Найдено, что взаимодействие N-хлор-N-алкоксиуретанов **7** с ДМАП является общим способом синтеза хлоридов 1-N-алкоксиаминопиридиния **8**. Предложены новый способ синтеза хлоридов 1-N-алкоксиаминопиридиния **8** взаимодействием хлоридов N-(1-пиридиний)-N-алкоксимочевин **5** с аммиаком в этаноле при комнатной темературе и новый способ синтеза фторидов 1-N-алкоксиаминопиридиния **9** взаимодействием хлоридов N-(1-пиридиний)-N-алкоксимочевин **5** с KF в MeCN при комнатной температуре.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Список литературы

1 **Штамбург, В. Г.** Геминальные системы. Сообщение 16. Реакции N-хлор-N-алкоксиаминов с аминами / **В. Г. Штамбург, В. Ф. Рудченко, Ш. С. Насибов** [и др.] // *Изв. АН СССР. Сер. Хим.* – 1981. – № 10. – С. 2320 – 2326.

2 **Рудченко, В. Ф.** Геминальные системы. Сообщение 20. Реакции N-хлор-N-метокси-N',N'-диметилмочевины с N-нуклеофилами / **В. Ф. Рудченко, В. И. Шевченко, Р. Г. Костяновский** // *Изв. АН СССР. Сер. хим.* – 1986. – № 3. – С. 606– 610.

3 **Shtamburg, V. G.** *N,N*-Dimethoxy-*N*-*tert*.-alkylamines: new synthesis methods and crystal structure of precursor / **V. G. Shtamburg, A. V. Tsygankov, E. A. Klots** [et. al] // *Mendeleev Commun*. – 2006. – V. 16, N 2. – P. 84–85. – doi: 10.1070/MC2006v016n02ABEH002222.

4 **Shtamburg, V. G.** Synthesis, structure and properties of *N*-alkoxy-*N*-(1-pyridinium)urea salts, *N*-alkoxy-*N*-acyloxyureas and *N,N*-dialkoxyureas / **V. G. Shtamburg, O. V. Shishkin, R. I. Zubatyuk** [et. al] // *Mendeleev Commun*.–2007.–V. 17, N 3. – P. 178–180. – doi: 10.1016/j.mencom.2007.05.016.

5 **Штамбург, В. Г.** *N'*-Алкоксиамино-*N*-пиридиниевые соли / **В. Г. Штамбург, А. В. Цыганков, В. В. Штамбург** [и др.] // *Вопр. химии и хим. технолог*. – 2009. – № 3. – С. 1–23.

6 **Штамбург, В. Г.** Синтез и строение перхлората метилового эфира 3-[*N*-метокси-*N*-(4'-диметиламино-1'-пиридиний)]–амино-3-метилбутановой кислоты / **В. Г. Штамбург, А. В. Цыганков, М. В. Герасименко** [и др.] // *Вопр. химии и хим. технолог*. **–** 2010. – № 4. – С. 20–24.

7 **Shtamburg, V. G.** 1 - Alkoxyamino - 4 - dimethylaminopyridinium derivatives as new representatives of O-*N*-N^+geminal systems and their structure / **V. G. Shtamburg, A. V. Tsygankov, O. V. Shishkin** [et. al] // *Mendeleev Commun*. – 2012. – V. 22, N 2. – P. 92–94. – doi: 10.1016/j.mencom.2012.03.014.

8 **Shtamburg, V. G.** Synthesis and structure of new *N*-alkoxy-N-(1-pyridinium)urea chlorides / **V. G. Shtamburg, V. V. Shtamburg, A. V. Tsygankov** [et. al] // *Eur. Chem. Bull.* – 2016. – V. 5, N 4. – P. 142–146 – doi: 10.17628/BCB.2016.5.142.

9 **Shtamburg, V. G.** Synthesis and structure of *N*-alkoxyhydrazines and *N* - alkoxy - *N',N',N'* - trialkylhydrazinium salts / **V. G. Shtamburg, O. V. Shishkin, R. I. Zubatyuk** [et. al] // *Mendeleev Commun*. – 2013. – V. 23, 5. – P. 289–291. – doi: 10.1016/j.mencom2013.09.018.

10 **Shtamburg, V. G**. 1-(N-Alkoxyamino)pyridine Derivatives and others N-Alkoxyhydrazines. / **V. G. Shtamburg, A. V. Tsygankov, V. V. Shtamburg** [et. al] // *VII International conference "Chemistry of Nitrogen Containing Heterocycles"*. – Kharkiv, Ukraine. Abstr. – 2015. – O-10.

11 **Штамбург, В. Г.** Синтез та будова похідних N-алкоксигідразинів / **В. Г. Штамбург, С. В. Шишкіна, В. В. Штамбург** [та ін.] // Матеріали *XXIV Української конференції з органічної хімії.* – Полтава, Україна. Тез. доп. – 2016. – Д-10. – С. 28.

12 **Glover, S.A.** Anomeric Amides – Structure, Properties and Reactivity / **S. A. Glover** // *Tetrahedron*. – 1998. – V. 54, N 26. – P. 7229-7271. – doi:10.1016/S0040-4020(98)00197-5.

13 **Glover, S.A.** HERON Rearrangement of *N,N'*-Diacyl-*N,N'*-dialkoxyhydrazines – a Theoretical and Experimental Study / **S. A. Glover, A. Rauk** // *Tetrahedron*. – 1999. – V. 55, N 11. – P. 3413–3426. – doi: 10.1016/S0040-4020(98)01151-X.

14 **Штамбург, В. Г.** 1 - Alkoxyamino - 4 - dimethylaminopyridiniun salts: synthesis and structure / **V. G. Shtamburg, S. V. Shishkina, V. V. Shtamburg** [et. al] // *Mendeleev Commun*. – 2016.– V. 26, N 2. – P. 169–171. – doi: 10.1016/j.mencom.2016.03.030.

15 **Штамбург, В. Г.** N - Хлор - N - метоксиуретилан / **В. Г. Штамбург, В. Ф. Рудченко, Ш. С. Насибов** [и др.] // *Изв. АН СССР. Сер:. Хим.*– 1981. – № 2. – С. 449–452.

16 **Shtamburg, V. G.** Alcoholysis of *N*-acetoxy-*N*-alkoxycarbamates. Synthesis of *NH-N,N*-dialkoxyamines from *N,N*dialkoxycarbamates / **V. G. Shtamburg, A. A. Anishchenko, V. V. Shtamburg** [et. al] // *Eur. Chem.Bull.* – 2014. – V. 3, N 12. – P. 1119–1125.

17 **Штамбург, В. Г.** Геминальные системы. Сообщение 50. Синтез и алкоголиз *N*-алкокси-*N*-ацилоксипроизводных мочевин, карбаматов, бензамидов / **В. Г. Штамбург, Е. А. Клоц, А. П. Плешкова** [и др.] // *Изв. РАН. Сер.: Хим.* – 2003. – № 10. – С. 2132–2140. – doi: 10.1023/B:RUCB.0000011887.40529.b0.

Bibliography (transliterated)

1 **Shtamburg, V. G., Rudchenko, V. F., Nasibov, Sh. S., Chervin, I. I., Pleshkova, A. P., Kostyanovsky, R. G.** Geminal'nye sistemy. Soobshhenie 16. Reakcii n-hloral-N-alkoksiaminov s aminami [Geminal systems. Communication 16. Reactions of N-chloro-N-alkoxy-N-alkylamines with amines]. *Bull. Acad. Sci. USSR. Div. Chem. Sci*., 1981, **30**, 10, 1914–1920.

2 **Rudchenko, V. F., Shevchenko, I. I., Kostyanovsky, R. G.** Geminal'nye sistemy. Soobshhenie 20. Rreakcii N-hlorl-N-metoksi-N',N'-dimetilmocheviny s N-nukleofilami. [Geminal systems. Communication 20. Reactions of N-chloro-N-metoxy-N',N'-dimethylurea wit N-nucleophiles]. *Bull. Acad. Sci. USSR. Div. Chem. Sci*., 1986, **35**, 3, 551–554.

3 **Shtamburg, V. G., Tsygankov, A. V., Klots, E. A., Fedyanin, I. V., Lyssenko, K. A, Kostyanovsky, R. G.** *N,N*-Dimethoxy-*N*-*tert*.-alkylamines: new synthesis methods and crystal structure of precursor. *Mendeleev Commun.*, 2006, **16**, 2, 84 – 85, doi: 10.1070/C206v016n02ABEH002222.

4 **Shtamburg, V. G., Shishkin, O. V., Zubatyuk, R. I., Kravchenko, S. V., Tsygankov, A. V., Klotz, E. A., Shtamburg, V. V, Distanov, V. B., Kostyanovsky, R. G.** Synthesis, structure and properties of *N*-alkoxy-*N*-(1-pyridinium)urea salts, *N*-alkoxy-*N*-acyloxyureas and *N,N*-dialkoxyureas. *Mendeleev Commun.*, 2007, **17**, 3, 178–180, doi: 101016/j.mencom.2007.05.016.

5 **Shtamburg, V. G., Tsygankov, A. V., Shtamburg, V. V., Gerasimenko, M. V.** *N'-Alkoksi-amino-N-piridinievye* soli [*N'*-Alkoxyamino-*N*-pyridinium salts]. *Vop. Khimii and Khim. Technology*, 2009, **3**, 16–23.

6 **Shtamburg, V. G., Tsygankov, A. V., Shtamburg, V. V., Gerasimenko, M. V, Zubatyuk, R. I, Shishkin, O. V.** Cintez i stroenie perhlorata metilovogo jefira 3-[N-metoksi-N-(4'-dimetilamino-1'-piridinij)]amino-3-metilbutanovoj kisloty.[A synthesis and structure of perchlorate of methyl

ester of 3-[*N*-methoxy-*N*-(4'dimethylamino-1'-pyridinium)]amino-3-methylbutanoic acid]. *Vop. Khimii and Khim. Technology*, 2010, **4**, 20–24.

7 **Shtamburg, V. G., Tsygankov, A. V., Shishkin, O. V., Zubatyuk, R. I., Shtamburg, V. V., Gerasimenko, M. V., Mazepa, A. V., Kostyanovsky, R. G.** 1-Alkoxyamino-4-dimethylaminopyridinium derivatives as new representatives of O-*N*-N^+geminal systems and their structure. *Mendeleev Commun.*, 2012, **22**, 2, 92–94, doi: 10.1016/j.mencom.2012.03.014.

8 **Shtamburg, V. G., Shtamburg, V. V., Tsygankov, A. V., Anishchenko, A. A., Zubatyuk, R. I., Shishkina, S. V., Mazepa, A. V, Klots, E. A.** Synthesis and structure of new *N*-alkoxy-N-(1-pyridinium)urea chlorides. *Eur. Chem. Bull.*, 2016, **5**, 4, 142–146, doi: 10.17628/BCB.2016.5.142.

9 **Shtamburg, V. G., Shishkin, O. V., Zubatyuk, R. I., Shtamburg, V. V., Tsygankov, A. V., Mazepa, A. V., Kadorkina, G. K., Kostyanovsky, R. G.** Synthesis and structure of *N*-alkoxyhydrazines and *N*-alkoxy-*N'*,*N'*,*N'*-trialkylhydrazinium salts. *Mendeleev Commun.*, 2013, **23**, 5, 289 - 291, doi: 10.1016/j.mencom2013.09.018.

10 **Shtamburg, V.G., Tsygankov, A.V., Shtamburg, V.V., Klotz, E.A., Shishkina, S.V., Zubatyuk, R.I., Mazepa, A.V.** 1-(N-Alkoxyamino)pyridine Derivatives and others N-Alkoxyhydrazines. *VII International conference "Chemistry of Nitrogen Containing Heterocycles"*, Kharkiv, Ukraine. Abstr., 2015, O-10.

11 **Shtamburg, V. G., Shishkina, S. V., Shtamburg, V. V., Tsygankov, A. V., Zubatyuk, R. I., Mazepa, A. V., Kravchenko, S. V.** Syntez ta budova poxidnyx N-alkoksigidrazyniv [The synthesis and structure of N-alkoxyhydrazines derivatives] *XXIV Ukrainian conference by organic chemistry.*, Poltava, Ukraine. Abstr., 2016, D-10, P. 28.

12 **Glover, S. A.** Anomeric Amides – Structure, Properties and Reactivity. *Tetrahedron.*, 1998, **54**, 26, 7229–7271, doi: 10.1016/S0040-4020(98)00197-5.

13 **Glover, S. A., Rauk, A.** HERON Rearrangement of *N,N'*-Diacyl-*N,N'*-dialkoxyhydrazines – a Theoretical and Experimental Study. *Tetrahedron.*, 1999, **55**, 11, 3413–3426, doi:10.1016/S00404020(98)01151-X.

14 **Shtamburg, V. G., Shishkina, S. V, Shtamburg, V. V., Mazepa, A. V., Kadorkina, G. K., Kostyanovsky, R. G.** 1-Alkoxyamino-4-dimethylaminopyridiniun salts: synthesis and structure. *MendeleevCommun.*, 2016, **26**, 2, 169–171, doi: 10.1016/j.mencom.2016.03.030.

15 **Shtamburg, V. G., Rudchenko, V. F., Nasibov, S. S., Chervin, I. I., Kostyanovsky, R. G.** N-hlor-N-metoksiuretilan. [N-Chloro-N-methoxyuretylane]. *Bull. Acad. Sci. USSR. Div. Chem. Sci.*, 1981, **30**, 2, 423–426.

16 **Shtamburg, V. G, Anishchenko, A. A., Shtamburg, V. V, Tsygankov, A. V., Kostyanovsky, R. G.** Alcoholysis of *N*-acetoxy-*N*-alkoxycarbamates. Synthesis of NH-N,N-dialkoxyamines from N,N-dialkoxycarbamates. *Eur. Chem. Bull.*, 2014, **3**, 12, 1119–1125.

17 **Shtamburg, V. G., Klots, E. A., Pleshkova, A. P., Avramenko, V. I., Ivonin, S. P., Tsygankov, A. V., Kostyanovsky, R. G.** Geminal'nye sistemy. Soobshhenie 50. Cintez I alkogoliz N-alkoksi-n-aciloksiproizvodnyh mochevin, karbamatov, benzamidov. [Geminal systems. Communication 50. Synthesis and alcoholysis of N-acyloxy-N-alkoxy derivatives of ureas, carbamates, and benzamides]. *Russ. Chem. Bull.*, 2003, **52**, 10, 2251–2250, doi:10.1023/B:RUCB.0000011887.40529.b0.

Сведения об авторах (About the Authors)

Штамбург Василий Георгиевич – доктор химических наук, профессор, Украинский государственный химико-технологический университет, профессор кафедры органической химии, г. Днепр, Украина; e-mail: stamburg@gmail.com.

Vasiliy Georgievych Shtamburg – Doctor of Chemical Sciences, Full Professor, Ukrainian State Chemico-Technologycal University, Professor at the Department of organic chemistry, Dnepr, Ukraine; e-mail: stamburg@gmail.com.

Штамбург Виктор Васильевич – кандидат химических наук, Украинский государственный химико-технологический университет, старший научный сотрудник кафедры органической химии, г. Днепр, Украина; e-mail: stamburg@gmail.com.

Victor Vasylievych Shtamburg – Candidate of Chemical Sciences (Ph.D.), Ukrainian State Chemico- Technologycal University, Senior Research Officer at the Department of organic chemistry, Dnepr, Ukraine; e-mail: polytehnik@gmail.com.

Кравченко Светлана Владимировна – кандидат химических наук, доцент, Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, доцент кафедры химии, г. Днепр, Украина; e-mail: svtailor@ukr.net.

Svetlana Vladimirovna Kravchenko – Candidate of Chemical Sciences (Ph.D.), Docent, Dnepropetrovsk State Agrarian-Economic University, Associate professor at the Department of chemistry, Dnepr, Ukraine; e-mail: svtailor@ukr.net.

Мазепа Александр Владимирович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Институт физической химии им. А.В. Богатского НАН Украины, старший научный сотрудник, г. Одесса, Украина; e-mail: almazepa@rambler.ru.

Aleksandr Vladymyrovych Mazepa – Candidate of Chemical Sciences (Ph.D.), Senior Research Officer, A. V. Bogatsky Physico-Chemical Institute of NAS of Ukraine, Senior Research Officer, Odesa, Ukraine; e-mail: almazepa@rambler.ru.

Анищенко Андрей Александрович – кандидат химических наук, доцент, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, доцент кафедры органической химии, г. Днепр, Украина; e-mail: koloxai@gmail.com

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Andrey Aleksandrovych Anishchenko – Candidate of Chemical Sciences (Ph.D.), Docent, O. Gonchar Dnepropetrovsk National Unioversity, Associate professor at the Department of organic chemistry, Dnepr, Ukraine; tel.: e-mail: koloxai@gmail.com.

Посохов Евгений Александрович – доктор химических наук, Наиональный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры органической химии, биохимии и микробиологии, г. Харьков, Украина; e-mail: yevgenposokhov@gmail.com.

Evgen Aleksandrovych Posohov – Doctor of Chemical Sciences, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Senior Lecturer at the Department of organic chemistry, biochemistry and microbiology, Kharkiv, Ukraine; e-mail: yevgenposokhov@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Штамбург, В. Г. Новый способ синтеза солей 1-N-алкоксиаминопиридиния / **В. Г. Штамбург, В. В. Штамбург, С. В. Кравченко, А. В. Мазепа, А. А. Анищенко, Е. А. Посохов** // *Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 211-218. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.30.

Please cite this article as:

Shtamburg, V. G., Shtamburg, V. V., Kravchenko, S. V., Mazepa, A. V., Anishchenko, A. A., Posokhov, E. A. A new synthesis of N-alkoxyaminopyridinium salts. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017, **7** (1229), 211-218, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.30.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Штамбург, В. Г. Новий спосіб синтезу солей 1-N-алкоксиамінопіридинія. **В. Г. Штамбург, В. В. Штамбург, С. В. Кравченко, А. В. Мазепа, А. О. Аніщенко, Є. О. Посохов** // *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 211-218. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.30.

АНОТАЦІЯ *Знайдено, що взаємодія метил-N-хлор-N-алкоксикарбаматів з 4-диметиламінопіридином є загальним способом синтезу хлоридів 1-N-алкоксиамінопіридинію. Запропоновано новий спосіб синтезу хлоридів 1-N-алкоксиамінопіридинію амонолізом хлоридів N-(1-піридиній)-N-алкоксисечовин у спиртовому розчині при кімнатній температурі. Уперше отримано флуорид 1-N-метоксиаміно-4-диметиламінопіридинію взаємодією хлориду N-(1-4-диметиламінопіридиній)-N-метоксисечовини з KF в ацетонітрилі. Структуру солей 1-N-алкоксиамінопіридинію доведено за допомогою даних спектрів ЯМР ^{1}H, ^{13}C та мас-спектрів.*

Ключові слова: *солі 1-N-алкоксиамінопіридинію; хлориди N-(1-піридиній)-N-алкоксисечовин; амоноліз; N-хлор-N-алкоксикарбамати; N-алкоксигідразини; декарбамоїлювання; синтез; обмін аніону; 4-диметиламінопіридин.*

Поступила (received)16.02.2017

УДК 614.89 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.31

ОЦІНКА ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ КЛАПАНІВ ВДИХАННЯ НА ПЕРЕПАД ТИСКУ РЕСПІРАТОРІВ

***С. І. ЧЕБЕРЯЧКО*[1*], *В. Ю. ФРУНДІН*[2], *Ю. І. ЧЕБЕРЯЧКО*[2]**

[1] *професор кафедри Аерології та охорони праці, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», Дніпро, УКРАЇНА*
[1] *доцент кафедри Аерології та охорони праці, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», Дніпро, УКРАЇНА*
[*]*email: sihc@yandex.ua*

АНОТАЦІЯ *Визначена доцільність використання клапану вдихання, який розташований після фільтра та його раціональний розмір, який забезпечить мінімальний перепад тиску. Встановлено, що за чотири години в систему увійшло близько 125 г вологи, при чому виміряна волога на фільтрах склала 2 % від загальної кількості вологи, що пройшла крізь фільтр. Приріст опору дихання фільтрів склав 19 Па на 1 г. Встановлено, що найнижчий приріст опору дихання зафіксований у фільтра з клапаном дихання діаметром 55 мм.*
Ключові слова: *фільтрувальний респіратор; опір дихання; працездатність; захисна ефективність*

EVALUATION OF DESIGN VALVE FOR INHALATION DIFFERENTIAL PRESSURE RESPIRATOR

***S. CHEBERIACHKO* [1], *V. FRUNDIN* [2], *YU. CHEBERIACHKO* [2]**

[1] *Professor of department Aerology and protection of labour, State Institution of Higher Education «National Mining University», Dnipro, UKRAINE*
[2] *Associate Professor of department Aerology and protection of labour, State Institution of Higher Education «National Mining University», Dnipro, UKRAINE*

ABSTRACT ***Purpose****. To determine the expediency of the inhalation valve usage located after the filter. To set the size of rational inhalation valve that guarantees the minimal pressure differences.*
Methods. *To check the valves inhalation resistance to air flow performed by the dynamic method. Its main elements are: respiratory machine, mannequin head, half-mask respirator with a special insert for the test operation of valves and instrumentation (electronic pressure-gauge Testo 512, and the air flow or gas measuring instrument Paul Gothe).*
Results. *It is found that when the system works during 4 hours, about 125 g of water comes to the system and the measured moisture on the filters was 2% of the total water amount passing through the filter. The increase of breathing filter resistance was 19 Pa at 1 g. It was found that the lowest breathing resistance increase was recorded in the breathing valve filter with the diameter of 55 mm.*
Practical significance. *It was found, the rational diameter of the silicone valve, which could reliably protect the filter from moisture and to provide the minimal resistance increase in the breathing filter box.*
Keywords: *filter respirator; breathing resistance; workability; protective efficacy*

Вступ

Вибір засобів ЗІЗОД доцільно проводити за декількома показниками головними з них є захисна ефективність та опір дихання який впливає на функціональний стан людини. Існує думка, що саме ергономічні показники (опір диханню, маса ЗІЗОД, кількість CO_2 під маскою респіратора) є дуже суттєвими, оскільки вони впливають і на працездатність людини і на час використання фільтрувальних респіраторів. Наприклад, досить часто при виконанні важких підземних робіт спостерігається ситуація, коли гірники через 40 – 50 хв. роботи зривають захисні індивідуальні пристрої органів дихання, тому що в них неможливо дихати. Цьому сприяє накопичення вологи на поверхні фільтра, яка потрапляє також з підмаскового простору через нещільне прилягання клапана вдихання до сідловини (рис. 1). При цьому пил осідає на гофрах нерівномірно. Це приводить до злипання суміжних складок (рис. 2) і збільшення опору диханню респіратора в цілому. Крім того, малий розмір вихідного отвору фільтрувальної коробки з розміщеним в ньому клапаном вдихання значно підвищує початковий опір диханню. Отже, вивчення впливу розміру кланів вдихання на опір повітряному потоку фільтрувальної коробки респіраторів є досить актуальною задачею.

Мета роботи

Метою дослідження є визначення взаємозв'язку розміру клапану вдихання на опір повітряному потоку фільтрувальної коробки.

© С. І. ЧЕБЕРЯЧКО, В. Ю. ФРУНДІН, Ю. І. ЧЕБЕРЯЧКО, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Рис. 1 – Вигляд клапанів вдиху

Рис. 2 – Вигляд запиленого фільтра

Публікації про вплив клапанів вдихання на якість ЗІЗОД у вітчизняній літературі практично відсутні. Тільки у роботі [1] сказано, що від клапану вдихання безпосередньо захисна властивість респіратора не залежить. Його основним призначенням є захист фільтра від повітря, що видихається.

В той же час існує велика кількість досліджень впливу опору дихання фільтрувальних коробок респіратора на працездатність людини [2 - 5]. Так, встановлено, що додатковий опір диханню призводить до значних змін у структурі дихання: збільшується тривалість фаз вдиху і видиху, зростає потреба у кисні, а також щохвилинний об'єм і частота дихання, змінюється глибина самого дихання [2]. Отримані дані у роботі [3], яка виконувалась на велгометрі вказують на погіршення фізичного стану досліджуваних у респіраторах порівняно з виконанням тестових вправ без ЗІЗОД. При вільному диханні артеріальний тиск (після виконання вправи) становив у середньому 140/90, тоді як у респіраторі з опором 60 Па він збільшувався майже на 15 %. Також зафіксоване і зростання пульсу, який значно підвищується при опорі респіратора більше за 60 Па. У роботі [4] розраховано втрату працездатності, яку можна оцінити за роботою м'язів грудної клітки. ЇЇ можна визначити як сумарний добуток загального тиску P на об'єм повітря V. Виявлено, що з появою додаткового опору диханню, тобто респіратора, дихальні м'язи при 60 Па запрацювали інтенсивніше на 16 % порівняно з легеневим навантаженням без ЗІЗОД, або на 56 % при 95 Па, чи на 110 % при 150 Па відповідно. Подібні результати були отримані і зарубіжними дослідниками, в яких використовувалось додаткове навантаження на дихальну систему випробувачів. В роботах показано, що збільшення опору при вдиханні різко зменшувало працездатність [4, 5]. Також була доведена лінійна залежність між опором диханню і працездатністю, яка показує, що тільки за рахунок зменшення опору диханню респіраторів можна підвищити працездатність людини [5].

Матеріали і методи дослідження

Перевірка опору повітряному потоку клапанів вдихання виконувалась за динамічним методом [6] і у відповідності до методики описаною у ДСТУ EN 149 (п. 8.3 вплив вологи). Вона дозволяє визначити величину підсмоктування клапану під час його спрацьовування. Для проведення випробувань використовувалась схема, показана на рис. 3. Основними її елементами є: дихальна машина, манекен голови, півмаска респіратора зі спеціальною вставкою для перевірки спрацювання клапанів та вимірювальні пристрої (електронний манометр Testo 512, та вимірювач потоку повітря або газу Paul Gothe).

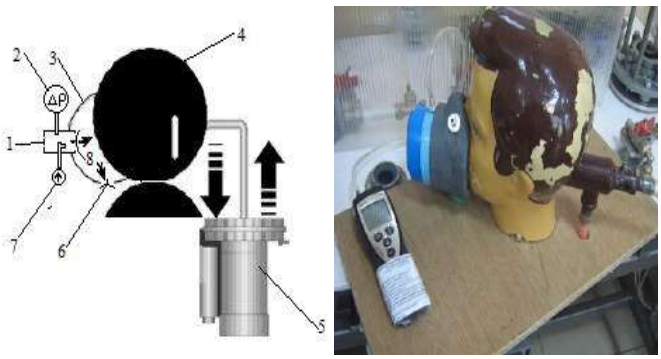


Рис. 3 – Схема і загальний вигляд установки з визначення опору клапану видихання:
1 – спеціальна насадка з перевірки клапанів вдихання; 2 – електронний манометр;
3 – півмаска; 4 – манекен голови;
5 – дихальна машина; 6 – клапан видихання;
7 – вимірювач потоку повітря;
8 – клапан вдихання

Для моделювання роботи клапану вдихання у відповідності до динамічної перевірки, у півмаску (рис. 4) встановлюється спеціальна насадка з отвором, на якій можна розміщувати клапани з різними діаметрами від 20 до 80 мм. У наведеному респіраторі, зворотну сторону корпусу фільтрувальної коробки (рис. 5) заклеювали плівкою у якій вирізали отвір, розмір якого відповідав діаметру клапану, що перевірявся. Клапан закріплювали гвинтом. Для випробувань були підібрані клапани із силікону, діаметром 27 мм, 37 мм, 55 мм, 80 мм (рис. 6). У фільтрувальну коробку респіратора був встановлений фільтр виготовлений з поліпропіленового матеріалу, який зважували до і після випробувань.

Півмаска розташовувалась на манекені голови та приєднувалась до дихальної машини. Дихальна машина відрегульована на 25 циклів за хвилину з 2,0 дм3 за хід. Стенд укомплектований датчиками температури (ТЕРА ТСМ 50М) і вологи (ТЕРА ДВТ-04) та блоком індикації (рис. 7). Під час випробування у повітропровід, який подає повітря у підмасковий простір під'єднали зволожувач Bonecо 7135. За допомогою електронного манометру вимірювався перепад тиску, як до клапану вдихання так і після нього. Наявність повітряного потоку за клапаном вдихання під час видиху, контролювалось вимірювачем потоку повітря або газу Paul Gothe. Змінюючи вхідний отвір спеціальної насадки визначали величну підсмоктування через клапан вдихання під час видиху. Саме під час видиху повинен спрацювати клапан вдихання і перекрити доступ повітря до спеціальної камери де розміщено фільтр. Випробування проводили чотири години При дослідженнях встановлювали наступний режим температура повітря у випробувальній камері 37 0С і вологість 95 %

Рис. 4 – Вигляд півмаски де встановлювали клапан вдихання

Рис. 5 – Вигляд зворотної сторони півмаски з установленим клапаном

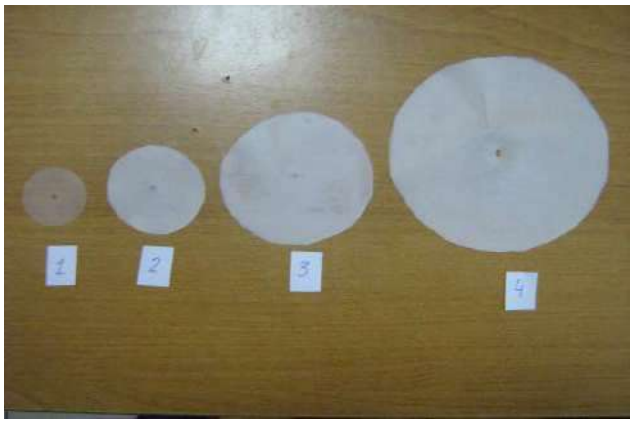


Рис. 6 – Клапани вдихання (дискові) діаметром 1 – 27 мм; 2 – 37 мм; 3 – 55 мм; 4 – 80 мм

Результати

В табл. 1 наведені результати вимірювань зміни перепаду тиску при роботі клапану вдихання

Таблиця 1 – Результати дослідження зміни перепаду тиску зумовлені розмірами клапанів вдихання

Розмір клапану, мм	Перепад тиску після клапану вдихання при вдиханні повітря, Па	Перепад тиску за клапаном вдихання при видиханні повітря, Па
27	17	0
37	9	0
55	5	0
80	2	6

У табл. 2 наведені результати досліджень зміни перепаду тиску при впливу вологи, що видихається.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Таблиця 2 – Результати дослідження зміни перепаду тиску від вологості повітря на фільтрувальній коробці

Розмір клапану, мм	Витрата повітря, л/хв	Початковий опір дихання респіратора, Па	Кінцевий опір дихання респіратора, Па
без клапану	50	76	142
27		99	102
37		84	87
55		79	81
80		77	106

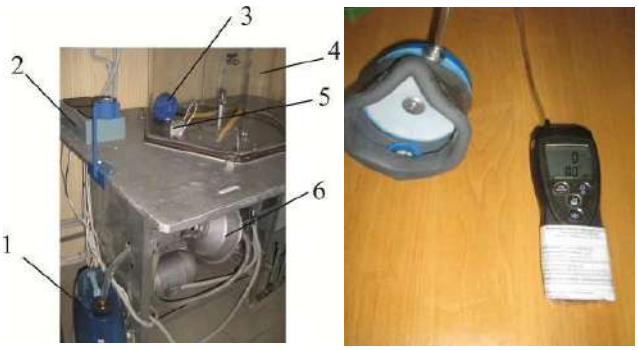


Рис. 7 – Установка для моделювання впливу вологості повітря на фільтри:
1 – зволожувач; 2 – індикатори датчиків температури і вологості повітря;
3 – фільтр; 4 – камера;
5 – датчик вологості повітря;
6 – дихальна машина

Через відмінність температури навколишнього середовища і під масковим простором та через велику вологість повітря, що видихається виникає конденсація вологи на фільтрах. Кількість вологи у підмасковому просторі залежить від об'єму вдиху, температури і вологості навколишнього повітря, властивостей фільтрувального матеріалу та площі його поверхні. Краплини води через значну їх поверхневу енергію при контакті з фільтрувальним матеріалом, утворюють великий кут контакту. Це приводить до блокування пір фільтра і в подальшому під дією капілярних сил краплини вологи збираються у великі каплі, що утворює поверхневу плівку (рис. 8).

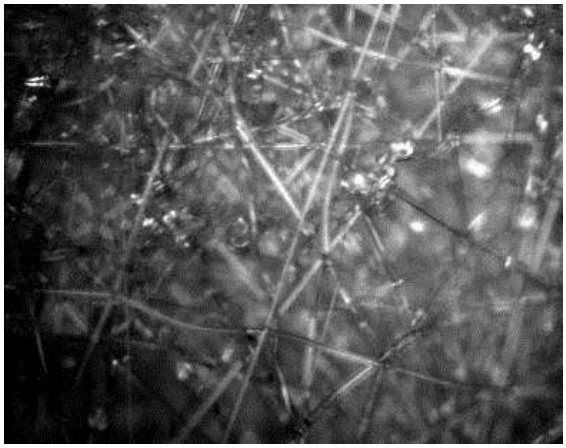


Рис. 8. – Вигляд структури елефлену у 300-кратному збільшенні після дослідження

Аналіз подібних досліджень показав, що за чотири години середнє накопичення вологи на поліпропіленових фільтрах складає 0,26 г за годину при помірній витраті повітря. В середньому кількість вологи в кожному об'ємі одного видихання складає 100 мкл/хв. (від 40 до 300 мкл/хв.) [7]. Однак існують дані, про значно більші об'єми видихаємої вологи. Наприклад, у роботах Маккаффета Дж.Б. говориться про 1,5 мл/хв. при хвилинній витраті 22,5 л/хв [8]. В нашому дослідженні за чотири години в систему увійшло близько 125 г вологи (21,7 мкл/вдих, 25 вдихів за хвилину, 240 хв). При таких умовах виміряна волога на фільтрах склала 2 % від загальної вологи, що пройшла крізь фільтр. Тобто на фільтра відклалось близько 2,5 г. Ці результати в деякій мірі відповідають даним, що були отамані при дослідженнях використання півмасок медичними робітниками [9, 10]. Автори вказали, що за час руху на біговій доріжці на масці накопичилось близько 0,4 г вологи. При цьому середній приріст опору дихання для гідрофобних фільтрів складає біля 5 Па. У нашому випадку приріст у 19 Па можна пояснити тільки злипанням суміжних гофр фільтра і виключенням частини площі фільтра з процесу фільтрування.

Аналіз результатів показує, що збільшення розміру клапана вдихання значно зменшує опір диханню, тим самим зменшує вплив на працездатність. Однак, максимальний діаметр клапану вдихання обмежується затримкою його спрацьовування при видиханні повітря, що зумовлює потрапляння вологи з під маскового простору на фільтр (таблиця 2 діаметр клапану 80 мм). Дослід показує, що клапан з діаметром 55 мм надійно спрацьовує, захищаючи фільтр від вологи і при цьому характеризується мінімальним опором диханню.

Висновок

В результаті проведених досліджень встановлено, що опір фільтрувальної коробки зменшується зі збільшенням розміру клапану вдихання. При цьому існує такий діаметр клапану, який надійно захистить фільтр від вологи і забезпечить мінімальний приріст опору диханню фільтрувальної коробки. Розмір клапану залежить від параметрів матеріалу з якого він виготовлений. Встановлено, що для латексу – діаметр клапану становить 55 мм, при цьому він надійно спрацьовує, захищаючи фільтр від вологи і характеризується мінімальним опором диханню.

Список літератури

1. Средства индивидуальной защиты органов дыхания: Справ.рук–во / **П. И. Басманов, С. Л. Каминский, А. В. Коробейников, М. Е. Трубицына**. // – С.Пб.: ГИПП «Искусство России», 2002. – 399 с.
2. **Каминский, С. Л.** Средства индивидуальной защиты в охране труда / **С. Л. Каминский**. – СПб: Проспект Науки, 2011. – 304 с.
3. **Чеберячко, С. І**. Оцінка впливу засобів індивідуального захисту органів дихання на працездатність людини / **С. І. Чеберячко, Ю. І. Чеберячко** // *Науковий вісник НГУ*. – 2007. – № 7. – С. 60-63.
4. **Голінко, В. І**. Застосування респіраторів на вугільних і гірничорудних підприємствах: Монографія. / **В. І. Голінько, С. І. Чеберячко, Ю .І. Чеберячко** // Д. НГУ, 2008 – 99 с.
5. **Kuo Y.-M.** Evaluation of Exhalation Valves / **Y.-M. Kuo, C.-Y. Lai, C.-C. Chen, B.-H. Lu, S.-H. Huang, C.-W. Chen** // *British Occupational Hygiene Society*. – 2005. – Vol .49. - No.7 – pp. 563–568. Doi: 10.1093/annhyg/mei003.
6. **Yang C.-M.** Dynamic Respirator Exhalation Valve Test Apparatus / **C.-M. Yang, S.-H. Huang, C.-C. Chen** // *Conference Occupational Hygiene*. – 2011 .– p. 19-20.
7. **Horvath, I.** Exhaled breath condensate: methodological recommendations and unresolved questions / **I. Horvath, J. Hunt, P. J. Baranes** // *European Respiratory Journal*. – 2005. – № 26 – p. 523–48. – doi: 10.1183/09031936.05.00029705.
8. **McCafferty, J. B.** Effects of breathing pattern and inspired air conditions on breath condensate volume, pH, nitrite, and protein concentrations / **J. B. McCafferty, T. A. Bradshaw, S. Tate** // *Thorax*. – 2004. - Vol 59 – p. 694–698. – doi: 10.1136/thx.2003.016949.
9. **Roberge, R. J.** Physiological impact of filtering facepiece respirators (‘‘N95 Masks’’) use on healthcare workers / **R. J., Roberge, A. Coca, W. J. Williams** // *Respiratory Care Journal*. – 2010. - Vol 55. – p. 569–577.
10. **Janssen, L. L.** Workplace protection factors for an N95 filtering facepiece respirator / **L. L. Janssen, T. J. Nelson K. T. Cuta** // *J. Occup. Environ. Hyg*. – 2007. – Vol. 4. – p. 698–707. – doi: 10.1080/15459620701517764.

Bibliography (transliterated)

1. **Basmanov, P. I., Kirichenko, V. N., Filatov, Yu. N., Yurov, Yu. L.**. Sredstva yndyvydualʹnoy zashchyty orhanov dykhanyya [High-efficiency gas purification to remove aerosol by means of Petrianov filters] Monograph. – St. Petersburg.: HYPP "art of Russia" – 2002. - 399 p.
2. **Kaminsky, S. L.,** Sredstva yndyvydualʹnoy zashchyty v okhrane truda [Means of individual protection in labor protection], St. Petersburg: Avenue of Science, 2006, 304 p.
3. **Cheberyachko, S. I., Cheberyachko, Y. I.** Otsinka vplyvu zasobiv indyvidualʹnoho zakhystu orhaniv dykhannya na pratsezdatnistʹ lyudyny [Assessing the impact of personal respiratory protection to human performance] *Naukovyy visnyk NHU [Scientific bulletin of NMU]*, 2007, **7**, C. 60-63.
4. **Golinko, V. I., Cheberyachko, S. I. and Cheberyachko, Yu. I.,** Zastosuvannya respiratoriv na vugilnih i girnichorudnih pidpriemstvah [The use of respirators in the coal and mining companies], SIHE «NMU», Dnepropetrovsk, Ukraine. 2008.
5. **Kuo, Y.-M., Lai, C.-Y., Chen, C.-C., Lu, B.-H., Huang, S.-H., Chen, C.-W.** Evaluation of Exhalation Valves, *British Occupational Hygiene Society*, 2005, Vol. **49**, No.7, p. 563–568. – doi: 10.1093/annhyg/mei003.
6. **Yang, C.-M., Huang, S.-H., Chen, C.-C.** Dynamic Respirator Exhalation Valve Test Apparatus. *Conference Occupational Hygiene*, 2011, UK p.p. 19-20.
7. **Horvath, I., Hunt, J., Baranes, P. J.** Exhaled breath condensate: methodological recommendations and unresolved questions. *European Respiratory Journal*, 2005, **26**, 523–48. Doi: 10.1183/09031936.05.00029705.
8. **McCafferty, J. B., Bradshaw, T. A., Tate, S.** Effects of breathing pattern and inspired air conditions on breath condensate volume, pH, nitrite, and protein concentrations. *Thorax*; 2004, **59,** 694–8. – doi: 10.1136/thx.2003.016949.
9. **Roberge, R. J., Coca, A., Williams, W. J.** Physiological impact of filtering facepiece respirators (‘‘N95 Masks’’) use on healthcare workers. *Respiratory Care Journal*, 2010, **55,** 569–77.
10. **Janssen, L. L., Nelson, T. J., Cuta, K. T.** Workplace protection factors for an N95 filtering facepiece respirator. *J. Occup. Environ. Hyg*. 2007, Vol. **4**, p. 698–707. – doi: 10.1080/15459620701517764.

Сведения об авторах (About authors)

Чеберячко Сергій Іванович – доктор технічних наук, професор кафедри Аерології та охорони праці, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», Дніпро, Україна; e-mail: sihc@yandex.ua.

Sergiy Ivanovich Cheberiachko – Doctor of Technikal Science (Grand PhD), Professor of department Aerology and protection of labour, State Institution of Higher Education «National Mining University», Dnipro, Ukraine; e-mail: sihc@yandex.ua.

Фрундін Володимир Юхимович – кандидат технічних наук, доцент кафедри Аерології та охорони праці, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», Дніпро, Україна; e-mail: intruder@hotbox.ru.

Volodymyr Yukhimovich Frundin – Candidate of Technikal Science (Ph.D), Associate Professor of department Aerology and protection of labour, State Institution of Higher Education «National Mining University», Dnipro, Ukraine, e-mail: intruder@hotbox.ru.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Чеберячко Юрій Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри Аерології та охорони праці, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», Дніпро, Україна; e-mail: cheberiachkoyi@ukr.net.

Yuriy Ivanovich Cheberiachko – Candidate of Technikal Science (Ph.D), Associate Professor of department Aerology and protection of labour, State Institution of Higher Education «National Mining University», Dnipro, Ukraine; e-mail: cheberiachkoyi@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Чеберячко, С. І. Оцінка впливу конструкції клапанів вдихання на перепад тиску респіраторів / **С. І. Чеберячко, В. Ю. Фрундін, Ю. І. Чеберячко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 7 (1229). – С. 219-224. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.31.

Please cite this article as:

Cheberiachko, S., Frundin, V., Cheberiachko, Yu. Evaluation of design valve for inhalation differential pressure respirator. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **7** (1229), 219–224, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.31.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Чеберячко, С. И. Оценка влияния конструкции клапанов вдоха на перепад давления респираторов / **С. И. Чеберячко, В. Е. Фрундин, Ю. И. Чеберячко,** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 7 (1229). – С. 219-224. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.31.

АННОТАЦИЯ *Определена целесообразность использования клапана вдыхания, который расположен после фильтра, и его рациональный размер, который обеспечит минимальный перепад давления. Установлено, что за четыре часа в систему вошло около 125 г влаги, при этом измеренная влажность на фильтрах составила 2 % от общего количества влаги, которая прошла через фильтр. Прирост сопротивления дыхания фильтров составил 19 Па на 1 г. Установлено, что самый низкий прирост сопротивления дыхания зафиксирован у фильтра с клапаном дыхания диаметром 55 мм.*

Ключевые слова: *фильтровальный респиратор; сопротивление дыхания; работоспособность; защитная эффективность*

Надійшла (received) 07.03.2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online) СЕРІЯ "НОВІ РІШЕННЯ В СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ"

УДК 338.27/ 637.51 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.32

МОДЕЛЮВАННЯ ЖИРНОКИСЛОТНОГО СКЛАДУ СІЧЕНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ З М'ЯСА ПТИЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДИФІКОВАНИХ ЖИРІВ

Д. А. ШВЕДЮК[1*], В. М. ПАСІЧНИЙ[2], І. Г. РАДЗІЄВСЬКА[3]

[1] магістрант кафедри технології м'яса та м'ясопродуктів Національного Університету Харчових Технологій, Київ, УКРАЇНА
[2] професор кафедри технології м'яса та м'ясопродуктів Національного Університету Харчових Технологій, Київ, УКРАЇНА
[3] доцент кафедри технології жирів та парфумерно-косметичних продуктів Національного Університету Харчових Технологій, Київ, УКРАЇНА
[*]email: shvedyuk.d@ukr.net

АНОТАЦІЯ *Досліджено можливість покращення біологічної повноцінності жирнокислотного складу напівфабрикатів м'ясних на основі м'яса курчат бройлерів шляхом введення до рецептур модифікованого жиру та комбінування м'ясної сировини з клітковиною та рослинною сировиною. Проаналізовано зміна жирнокислотного складу січених напівфабрикатів з м'яса птиці при різних рівнях введення та типах модифікованих жирів, обґрунтовано раціональні рівні та форму внесення модифікованих жирів. Проведено порівняльний аналіз змодельованих рецептур з продуктами традиційного асортименту та доведено підвищення біологічної повноцінності продукту.*
Ключові слова: *напівфабрикати; модифіковані жири; м'ясо птиці; клітковина; пальмова олія*

MODELING OF FATTY ACID COMPOSITION OF POULTRY MEAT MINCED HALF-FINISHED PRODUCTS WITH MODIFIED FATS APPLICATION

D. SHVEDYUK[1], W. PASICHNYI[2], I.RADZIEVSKA[3]

[1] postgraduate of Department of meat and meat products technology of NUFT, Kiyv, UKRAINE
[2] full professor of Department of meat and meat products technology of NUFT, Kiyv, UKRAINE
[3] assistant professor of Department of fat, perfumery and cosmetic products technology of NUFT, Kiyv, UKRAINE

ABSTRACT *Meat products are one of basic fat sources in human nutrition. Biological value of fat is determine by PUFA/SFA ratio and omega-6 to omega-3 fatty acids ratio. Biological value of meat half-finished products is low in cause of high polyunsaturated fatty acids intake . With the object to solution of this problem is modified fat application perceptively. Main object of this work was to investigate the ability of using mixed fat examples for production of protein –fat emulsion and following producing of half-finished meat products (especially cutlets). For investigation was taken a two kinds of mixed fats – one(A) including the palm oil (7%) , palm oleine (30%) and rape oil (63%); and second (B) including the palm oil (70%), corn oil (25%) and flax oil (5%).Testing examples was distributed to the depend protein – fat emulsion content (20, 22,5 and 25 %). Protein – fat emulsion includes the dry milk whey, pork skin protein, water and far in ratio as – 1:4:15:5. Formulation of cutlets consist of emulsion, poultry meat, pork fat and hydrated dietary fiber. Using the mathematical modeling method and analysis of stuff fatty acid composition it was estimated the theoretical fatty acid composition of modeling recipes. Calculated biological value of modeling recipes was higher than value of control example. The PUFA/ SFA ratio was in gap of 0,34- 0,49 for modeling recipes and 0,84 for control example, that shows the efficiency of modified, poultry and pork fat combination in formulas of minced half-finished meat products.*
Keywords*: half – finished meat products; modified fat; pork fat; protein – fat emulsion; dietary fiber*

Вступ

Біологічна цінність жиру визначається його жирнокислотним складом та співвідношеннями між насиченими (НЖК), поліненасиченими (ПНЖК) та мононенасиченими (МЖК) жирними кислотами а також між поліненасиченими жирними кислотами груп омега 6 та омега 3. Для жиру м'ясних продуктів ці співвідношення мають становити відповідно: ПНЖК – 10-20%, МЖК – 50-60%, НЖК – 30% [1] (в дослідженнях вчених країн Європи та США частіше всього за показник повноцінності жиру приймають співвідношення ПНЖК до НЖК, виражене у цілому числі, яке має бути наближеним до 0,4)[2] , враховуючи що поліненасичені жирні кислоти включають в себе кислоти родин омега 6 і омега 3 з розрахунку 8-10 г кислот омега 6 на 1 г кислот родини омега 3 [3].

За дослідженнями ряду вчених [4, 5] сучасний стан харчування населення (особливо у розвинутих країнах) не відповідає наведеним вище вимогам. Основними джерелами надходження жирів у раціони споживачів є продукти тваринного походження. Серед жирів тваринного походження значено

© Д. А. ШВЕДЮК, В. М. ПАСІЧНИЙ, І. Г. РАДЗІЄВСЬКА, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

переважає вміст насичених жирних кислот. Так, порівнюючи зразки жиру, отримані від різних видів тварин, вченими [2] було дослідним та аналітичним шляхами встановлено ряд характеристик та взаємозалежностей. Найбільший вміст жиру в середній пробі з стегна має баранина – 30,2%. Яловичина відповідно містить 15,6 % жиру, а свинина – 21,1 %. Вміст жиру у м'ясі птиці (зокрема бройлерів) у різних частинах тушки значно відрізняється. Найбільший вміст жиру (до 30 %) відмічений у шкірі, тоді як у м'язах стегна частка жиру знаходиться в межах 4,5-6%, а у філейній (грудній) частині рідко перевищує 2-3% [6].

Жирнокислотний склад тваринної сировини має ряд відмінностей, які особливо помітні на прикладі свинини та м'яса курчат бройлерів. Жир свиней та бройлерів має кращі показники біологічної повноцінності у порівнянні з жиром баранини та яловичини. Співвідношення ПНЖК до НЖК для зразків баранячого, яловичого, свинячого стегна та м'яса курчат бройлерів становить відповідно 0,11, 0,15, 0,58 та 0,64 [2,6]. Співвідношення між кислотами родин омега-6 та омега-3 становить відповідно для баранини, яловичини, свинини та м'яса бройлерів – 1,32:1, 2,11:1, 7,22:1 та 16,8:1. Таким чином, можна зробити висновок про можливість підвищення співвідношення між ПНЖК та НЖК шляхом комбінування жиру курчат-бройлерів та свинини.

Варто також звернути увагу на свинячий жир та сало зокрема, як джерело збагачення продукту жирними кислотами, особливо МНЖК. Сало позитивно впливає на органолептичні характеристики продукту та загальний вміст жирних кислот у 100 г готового продукту, крім того покращує консистенцію виробу.

На наш погляд перспективним є використання модифікованих жирів. Модифіковані жири являють собою суміш кількох видів рослинних олій, підібраних у таких пропорціях, щоб доповнювати жирнокислотний склад за тими жирними кислотами, вміст яких є недостатнім для окремих олій композиції. Це дозволяє вирішити ряд питань. Зокрема це питання використання тих рослинних олій, що вважаються неповноцінними, наприклад пальмової. З іншого боку це дає змогу розробляти відносно дешеві композиції біологічно повноцінних жирів та застосовувати їх у широкому сегменті харчових виробництв. З огляду на тенденцію введення в рецептури січених м'ясних напівфабрикатів складових, що замінюють частку основної м'ясної сировини, раціональним є внесення у рецептуру січених напівфабрикатів модифікованих жирів у вигляді білково-жирових емульсій для підвищення їх харчової цінності. Даний технологічний прийом дозволить поліпшити технологію внесення жирових композицій з покращеними показниками біологічної ефективності.

Мета роботи

Метою роботи було дослідити можливість комбінування м'яса курчат-бройлерів з хребтовим салом свиней та модифікованими жирами на основі рослинних олій з метою збільшення повноцінності жиру у рецептурах січених м'ясних напівфабрикатів, змоделювати жирнокислотний склад продукту та розрахувати показники біологічної повноцінності жиру отриманої моделі рецептури січеного напівфабрикату на основі м'яса курчат-бройлерів із застосуванням модифікованих жирів.

Виклад основного матеріалу

В ході постановки експерименту за основу була обрана рецептура напівфабрикату січеного м'ясного з використанням м'яса курчат бройлерів (зокрема філе та обваленого м'яса стегна), хліба та меланжу – котлети «Пожарські курячі» [за ТУ 9214-280-37676459-2014]. Вміст м'яса птиці у даному продукті складав 56%. Крім нього з жировмісних складових присутні хліб і борошно пшеничні (18 і 8% відповідно) та меланж (4%).

Розрахунок жирнокислотного складу продукту проведено з урахуванням вмісту компонентів у рецептурі, тобто відсоток сировини у рецептурі приведено у вигляді цілого числа та враховано як коефіцієнт перед значенням вмісту певного компоненту. Розрахунки для кожної жирної кислоти проводимо за формулою:

$$A_i = C_1 \cdot q_1 + C_2 \cdot q_2 + \ldots + C_n \cdot q_n$$

де A_i – вміст певної жирної кислоти на 100 г продукту, г; $C_{1,2,n}$ – вміст певного виду сировини у продукті, виражений у цілому числі; q_1 - вміст певної жирної кислоти на 100 г даної сировини, г.

Враховуючи, що з сировини, яка містить жирні кислоти до складі напівфабрикату входить хліб і пшеничне борошно (приймаємо однакові значення для спрощення розрахунків за жирнокислотним складом).

Дані про вміст жирних кислот у різних видах сировини приводимо за матеріалами довідкових джерел та досліджень [2, 6, 7, 8] та наводимо у таблиці Для розрахунку жирнокислотного складу використовували програму «ВІО1», за розробленою на кафедрі Технології м'яса та м'ясних продуктів НУХТ визначення споживчої цінності харчових продуктів [10, 11].

Отже, вміст кислот родини омега-6 становить:

$$A_{щ6} = 1{,}45 \cdot 0{,}26 + 0{,}84 \cdot 0{,}56 + 5{,}6 * 0{,}04 = 1{,}07 \text{ г/100 г}$$

Проаналізувавши жирнокислотний склад на 100 г продукту, очевидним є те, що біологічна ефективність даної сировини знаходиться на недостатньому рівні. Зокрема співвідношення між ПНЖК та НЖК становить 0,84, а співвідношення між кислотами родин омега 6 і омега 3 – 11,3 до 1. Характеристики жирнокислотного складу котлет «Пожарські курячі» з м'ясом курчат бройлерів приводимо у табл. 2.

Таблиця 1 – Характеристики жировмісної сировини

Показник	Шпик	Курятина	Меланж	Борошно
НЖК, %	39,64	1,4	9,8	0,8
МНЖК, %	45,56	2,07	18,2	0,65
ПНЖК,% з яких	10,6	0,89	6,3	1,6
щ-6	9,9	0,84	5,6	1,45
щ-3	0,7	0,05	0,7	0,15
ПНЖК/НЖК	0,27	0,63	0,64	2,0
щ-6/ щ-3	14,14	16,8	8,0	9,67

Таблиця 2 – Розрахунковий склад котлет «Пожарські курячі»

Показник	Розраховані значення
НЖК, %	1,38
МНЖК, %	2,06
ПНЖК,% з яких	1,17
щ-6	1,07
щ-3	0,1
ПНЖК/НЖК	0,84
щ-6/ щ-3	11,3

Причиною цього можна назвати відносно малу частку м'ясної сировини та недостатню біологічну ефективність жиру курчат-бройлерів. Даний жир містить велику частку ПНЖК, проте має далеке від оптимального співвідношення між омега-6 і омега-3 жирними кислотами. Пшеничне борошно, що виступає другим за відсотковим вмістом складовим рецептури має співвідношення ПНЖК до НЖК на рівні 1,9-2,05, (приймаємо 2,0 для розрахунків), що призводить до зростання відповідного співвідношення у готовому продукті, тоді як вміст кислот омега-6 залишається надмірним (співвідношення щ-6/ щ-3 для борошна – 9,7 до 1). Для підвищення збалансованості жирнокислотного складу хліб і деяку частину м'ясної сировини можна замінити білково-жировою емульсією. Для стабілізації текстури напівфабрикатів раціональним є використання клітковини. Клітковина на відміну від пшеничного борошна не містить у своєму складі жирової фази, отже усувається проблема зі зміщенням балансу в сторону ПНЖК. Також перевагою застосування клітковини є її радіопротекторні властивості та позитивний вплив на процеси, що відбуваються в шлунково-кишковому тракті [12]. Введення свинячого жиру (зокрема сала) має на меті змістити баланс в сторону НЖК та покращити органолептичні показники напівфабрикатів.

В процесі застосування модифікованих жирів було використано модифіковані жири двох видів. Рецептура першого виду модифікованого жиру включала в себе рослинні олії у співвідношеннях: ріпакова – 63%, пальмова – 7%, пальмовий олеїн – 30% (зразок 1). Рецептура другого виду жиру включала 70% пальмової, 25% кукурудзяної і 5% лляної олії (зразок 2). Склад наведених зразків представлено у табл. 3.

Таблиця 3 – Характеристики модифікованих жирів

Показник	Зразок 1	Зразок 2
НЖК, %	23,18	51,33
МНЖК, %	50,69	30,03
ПНЖК,% з яких	26,27	18,33
щ-6	19,64	15,05
щ-3	6,63	3,28
ПНЖК/НЖК	1,13	0,36
щ-6/ щ-3	2,96	4,59

З наведених вище даних можна зробити висновок, що введення до складу напівфабрикатів на основі м'яса курчат-бройлерів даних видів модифікованих жирів дозволить наблизити співвідношення ПНЖК до НЖК та щ-6/ щ-3 до рекомендованого рівня. Це обґрунтовано тим, що м'ясо курчат-бройлерів, яке має низьке співвідношення між щ-6 і щ-3 та високе між ПНЖК та НЖК буде збагачено кислотами омега-3 та насиченими жирними кислотами, отже матиме більшу повноцінність за жирнокислотним складом [12].

Для покращення консистенції та функціональних характеристик напівфабрикатів до складу рецептур вносили гідратовану пшеничну клітковину в якості заміни хліба та борошна. Також модельні рецептури включають в себе сало та білково-жирову емульсію на основі модифікованих жирів.

У процесі моделювання враховуємо раніше проведені дослідження, що довели високі органолептичні та функціонально-технологічні показники рецептур напівфабрикатів на основі м'яса курчат бройлерів, клітковини та білково-жирових емульсій з застосуванням модифікованих жирів аналогічного складу [13]. В ході досліджень встановлені раціональні відсоткові частки внесення наведених вище складових інгредієнтів.

Основою обраної рецептури є м'ясо курчат-бройлерів, кількість якого становить 40-45%, білково-жирова емульсія на основі модифікованих жирів та пшенична клітковина з ступенем гідратації 14:6. Варіанти рецептур наводимо у табл. 4.

Білково-жирова емульсія містила у своєму складі білки свинячої шкурки та суху молочну

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

сироватку, для підвищення біологічної цінності. Співвідношення між білками свинячої шкурки, сухою молочною сироваткою, жиром та водою становило відповідно 4:1:5:15 для усіх зразків білково-жирової емульсії. БЖЕ відрізнялась тільки видом застосовуваного в рецептурі модифікованого жиру.

При проведенні розрахунків жирнокислотого складу враховуємо тільки жировмісну сировину, а саме: м'ясо курчат-бройлерів, сало, модифікований жир та панірувальні сухарі.

Таблиця 4 – Рецептури модельних напівфабрикатів

Модель / Сировина	1	2	3	4	5	6
Курятина, %	45,0	42,5	40,0	45,0	42,5	40,0
Клітковина, %	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Вода, %	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0
шпик, %	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
БЖЕ, %, з яких	20,0	22,5	25,0	20,0	22,5	25,0
Білок свинячої шкурки, %	3,2	3,6	4,0	3,2	3,6	4,0
Модифікований жир першого типу, %	4,0	4,5	5,0	-	-	-
Модифікований жир другого типу, %	-	-	-	4,0	4,5	5,0
Суха молочна сироватка,%	0,8	0,9	1,0	0,8	0,9	1,0
Вода, %	12,0	13,5	15,0	12,0	13,5	15,0
Панірувальні сухарі, %	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

Так, вміст кислот родини омега-6 у першому модельному зразку становив:

$$А_{щ6}=1,45\cdot0,05+0,84\cdot0,45+9,9\cdot0,1+19,64\cdot0,04=2,23г/100г$$

Дані по розрахунку жирнокислотного складу модельних зразків наводено у табл. 5 і 6.

Таблиця 5 – Показники моделей 1-3

Показник	№1	№2	№3
НЖК, %	5,56	5,64	5,72
МНЖК, %	7,55	7,75	7,95
ПНЖК,% з яких	2,59	2,70	2,81
щ-6	2,23	2,30	2,38
щ-3	0,37	0,40	0,43
ПНЖК/НЖК	0,47	0,48	0,49
щ-6/ щ-3	6,10	5,80	5,55

Сумарний вміст жирних кислот у розрахунку на 100 г напівфабрикату у контрольному (котлети «Пожарські курячі») та дослідних зразках наводимо у табл. 7.

Таблиця 6 – Показники моделей 4-6

Показник	№4	№5	№6
НЖК, %	6,69	6,82	7,13
МНЖК, %	6,72	6,82	6,92
ПНЖК,% з яких	2,27	2,34	2,41
щ-6	2,04	2,10	2,15
щ-3	0,23	0,25	0,26
ПНЖК/НЖК	0,340	0,344	0,338
щ-6/ щ-3	8,83	8,51	8,23

Таблиця 7 – Вміст жирних кислот у 100 г продукту

Зразок	Розрахований вміст жирних кислот, г на 100 г продукту
Котлети «Пожарські курячі»	4,61
Модель 1	15,7
Модель 2	16,09
Модель 3	16,48
Модель 4	15,68
Модель 5	15,98
Модель 6	16,46

Обговорення результатів

Наведені розрахунки дозволяють проаналізувати доцільність та ефект використання модифікованих жирів у технології м'ясних січених напівфабрикатів а також ефективність впливу комбінування м'яса курчат бройлерів зі свинячим салом та клітковиною.

Загальний вміст жирних кислот у контрольному зразку та модельованому продукті значено відрізняється. Так, для котлет «Пожарські курячі» цей показник становить 4,61 г/100 г, а для модельованих зразків знаходиться в межах від 15,68 г/100 г (модель 4) до 16,48 г/100 г (модель 3). Це свідчить про те, що вміст жирних кислот у модельному продукті сприяє його здатності ефективніше забезпечувати добові норми людського організму у цьому інгредієнті.

Кількісний вміст жирних кислот усіх груп значено зростає у модельних зразках, що обумовлено

не тільки зміною якісних співвідношень та природи застосовуваних жирів, але також збільшенням частки жиру у рецептурі напівфабрикатів. Вміст насичених жирних кислот є значно вищим ніж у контролі і знаходиться у межах 5,56-7,13 г/100 г проти 1,38 г/100 г для контрольного зразка. Найбільший вміст НЖК спостерігається у моделі №6, а найменший – у моделі №1. В цілому вміст НЖК є прямо пропорційним до рівня введення білково-жирових емульсій, але коливається у відносно малому інтервалі значень.

Вміст моно ненасичених жирних кислот має дещо більший крок варіювання а також більшу різницю між значеннями контрольного зразка та розрахованих моделей. Вміст МНЖК на 100 г продукту становить для котлет «Пожарські курячі» лише 2,06 г/100 г, проти найменшого для модельних зразків значення 6,72 г/100 г (зразок №4). Найбільший вміст МНЖК згідно розрахунків спостерігається у модельному зразку № 3 і становить 7,95 г/100 г.

ПНЖК у всіх модельованих рецептурах за своїм вмістом також значно переважають вміст цього компоненту у контрольному зразку.

Так для контрольного зразку частка ПНЖК становить 1,17 г/100 г, а у модельних зразках цей показник знаходиться в межах від 2,27 до 2,81 г/100 г продукту.

Якісний склад ПНЖК характеризується співвідношенням між кислотами родин омега-6 та омега-3. В ході розрахунків та моделювання виявлено чітку тенденцію не тільки до збільшення вмісту кислот цих родин у модельних зразках, а й до зміщення співвідношення між ними у сторону рекомендованого (8-10).

Контрольний зразок містить 1,07 г/100 г кислот родини омега-6, проте має дуже низький вміст кислот родини омега-3 – 0,1 г/100 г, що обумовлює перевищення цього співвідношення понад рекомендовані норми – 11,3 (при рекомендованому 8-10). У модельних зразках вміст кислот обох родин (омега-6 і омега-3 значно перевищує відповідний показник контрольного зразку. Вміст кислот родини омега-6 знаходиться у межах 2,04-2,38 г/100 г, а омега-3 – 0,23-0,43 г/100 г. Але варто звернути увагу також на відношення між цими групами жирних кислот. Порівняно з контрольним зразком спостерігається зміщення показника в сторону рекомендованого.

Загалом відношення омега-6 до омега-3 знаходиться у межах 5,55-8,83. Найбільш наближеним до рекомендованого є показники зразків 4 і 5, проте варто звернути увагу на загальну високу кількість кислот родини омега-6 у раціоні населення. Завдяки високому вмісту кислот омега-3 модельні зразки 1-3 можуть змістити співвідношення жирних кислот заданих груп у сторону омега-3 кислот, наближаючи його до рекомендованого.

Співвідношення між ПНЖК та НЖК проявляє тенденцію до зниження у модельній групі порівняно з контролем і наближається до рекомендованого (0,4). Для контрольного зразка даний показник є значно вищим і становить 0,84, що перевищує рекомендовану норму більш ніж удвічі. У модельній групі відношення ПЖНК до НЖК коливається у межах 0,338-0,491.

Варто відмітити те, що у групі із застосуванням в рецептурі модифікованого жиру другого типу (моделі 4-6) крок зміни цього значення є дуже малим і вимагає переходу до тисячних для його підрахунку, тоді як в моделях 1-3 варіювання є значнішим. Максимально наближене до рекомендованого співвідношення має модельний зразок 1 – 0,466.

Для оцінки якісного складу жиру усіх зразків варто перейти від шкали г/100 г до відсоткового вмісту жирних кислот на 100 г жиру. Це дозволить нівелювати вплив загального збільшення жиру у продукті і оцінити біологічну повноцінність конкретної жирової фази. Для того щоб перейти від г/100 г до % від загальної маси жиру необхідно врахувати загальний вміст жиру у 100 г напівфабрикату. Наведені дані по якісному складу жирової фази контрольного та модельних зразків наводимо у табл. 8.

Таблиця 8 – Вміст груп жирних кислот у зразках напівфабрикатів, % від маси жиру

Показник	НЖК, %	МНЖК, %	ПНЖК,%
Контроль	29,93	44,69	25,38
Модель 1	35,42	48,07	16,51
Модель 2	35,06	48,16	16,78
Модель 3	34,72	48,24	17,04
Модель 4	42,64	42,86	14,50
Модель 5	42,67	42,67	14,66
Модель 6	43,32	42,03	14,66

Вміст НЖК у відсотковому співвідношенні на 100 г жиру у модельній групі зразків напівфабрикатів переважає відповідний показник контрольного зразка. Хоча насичені жирні кислоти мають низьку біологічну ефективність, збільшення їх відсоткового вмісту не є негативним, тому, що урівноважується вмістом ПНЖК і дозволяє досягнути оптимального співвідношення між цими групами жирних кислот. У модельних зразках простежується чітка залежність між видом застосовуваного в рецептурі модифікованого жиру та відсотковим вмістом НЖК. Група моделей з першим видом модифікованого жиру (зразок 1) має помітно нижчі показники відсоткового вмісту НЖК на 100 г жиру (34,72-35,42%) порівняно з другою групою (для якої цей показник становить 42,64-43,32%).

Вміст МНЖК у всіх зразках, включаючи контрольний знаходиться у межах 42,03-48,16, отже не зазнає різких коливань. З цього можна зробити висновок про те, що вміст МНЖК найбільше

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

залежить від вмісту м'ясної сировини, а саме м'яса курчат бройлерів. Низький рівень коливань цього параметра обумовлений невисоким вмістом МНЖК у м'ясі курчат-бройлерів, тому зниження даної сировини в рецептурі з 56 до 40% не призвело до значного зниження відсоткового вмісту МНЖК у 100 г жиру і компенсувалось внесенням модифікованих жирів.

Відсотковий вміст поліненасичених жирних кислот на 100 г жирової фази помітно відрізняється у контрольному і модельних зразках. Попри те, що ПНЖК мають найбільшу біологічну цінність і їх рівень в контрольному зразку є більшим, біологічна повноцінність модельних зразків знаходиться на вищому рівні, завдяки оптимальному співвідношенню між ПНЖК на НЖК.

В загальному модельні зразки мають вищу біологічну ефективність жиру та більший його вміст на 100 г продукту, що доводить ефективність комбінування заданих інгредієнтів у рецептурах м'ясних січених напівфабрикатів на основі м'яса курчат бройлерів.

Висновки

За проведеними операціями моделювання та розрахунками можна зробити висновок про ефективність застосування модифікованих жирів в якості джерела жирних кислот загалом та ПНЖК зокрема. Розрахований теоретичний жирнокислотний склад модельних рецептур наближається до оптимальних показників з точки зору рекомендацій вмісту жирних кислот у раціоні людини.

Висока біологічна цінність виражена не тільки у досягненні наближених до оптимальних співвідношень між групами жирних кислот, але й у значному підвищені вмісту жиру у напівфабрикатах.

Серед шести модельних рецептур напівфабрикатів найкращі показники біологічної повноцінності мають зразки №5 і 2. Їхні розрахункові співвідношення між групами жирних кислот максимально наближаються до рекомендованих. Рівень введення модифікованого жиру в даних рецептурах знаходиться на рівні 4,5 %, що підтверджує висновки функціонально-технологічних та органолептичних досліджень, проведених раніше.

У групах модельних рецептур встановлено ряд залежностей і тенденцій, продиктованих видом застосовуваного модифікованого жиру. Так у групі моделей, в рецептурах яких застосовано модифікований жир першого типу (зразок 1), розрахункове відношення ПНЖК до НЖК наближається до 0,4 (рекомендоване значення), проте відношення кислот родини омега-6 до кислот родини омега-3 є заниженим. У моделях групи із другим видом модифікованого жиру (зразок 2) значення відношення щ-6/ щ-3 наближається до рекомендованого, але відношення між ПНЖК і НЖК є низькими. Дані закономірності дозволяють зробити висновок про можливість комбінування обох наведених видів модифікованого жиру та перспективність подальших досліджень у цьому напрямку.

Загальна оцінка біологічної цінності модельних рецептур та порівняння її з контрольною рецептурою (котлети «Пожарські курячі») доводить ефективність комбінування м'яса курчат-бройлерів, клітковини, сала та білково-жирових емульсій на основі модифікованих жирів у технології м'ясних січених напівфабрикатів.

Список літератури

1. **Радзієвська, І. Г.** Розробка технології купажованих тваринно-рослинних жирів підвищеної харчової цінності : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.18.06 / Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". - Харків, 2010. - 23 с.
2. **Wood, J. D.** Effects of fatty acids on meat quality: a review / **J. D. Wood, R. I. Richardson, G. R. Nute, A. V. Fisher, M. M. Campo, E. Kasapidou, P. R. Sheard, M. Enser //** *Meat Sci*. – 2004. – 66(1). – 21-32. – doi: 10.1016/S0309-1740(03)00022-6. PubMed PMID: 22063928.
3. **Simopoulos, A. P**. The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids / **A. P**. **Simopoulos,** // *Biomedicine & Pharmacotherapy*. – 2004. – V. 56, Issue 8,. – P. 365-379. – doi: 10.1016/S0753-3322(02)00253-6
4. **Rymer, C.** n−3 fatty acid enrichment of edible tissue of poultry: A review / **C. Rymer, & D. I. Givens** // *Lipids*. – 2005. – 40. – 121. – doi:10.1007/s11745-005-1366-4.
5. **Howe, P.** Dietary intake of long-chain omega-3 polyunsaturated fatty acids: contribution of meat sources / **P. Howe, B. Meyer, S. Record, K. Baghurst** // *Nutrition*. – 2006. – 22(1). – 47-53. – doi: 10.1016/j.nut.2005.05.0099.
6. **Wood, J. D.** Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: A review / **J. D. Wood, M. Enser, A. V. Fisher, G. R. Nute, P. R. Sheard, R. I. Richardson, S. I. Hughes, F. M. Whittington** // *Meat Science*. – 2008. – 78(4). – 343-58. – doi: 10.1016/j.meatsci.2007.07.019.
7. **Патиева, А.М.** Жирнокислотный состав шпика свиней датской породы / **А. М. Патиева, С. В. Патиева, В. А. Величко** // *Вестник НГИЭИ*. – 2012. – №8.
8. **Архипов, А. В.** Липидная питательность мяса птицы и влияние на нее факторов питания / **А. В. Архипов** // *Вестник ФГОУ ВПО Брянская ГСХА*. – 2010. – №1.
9. **Jimйnez-Colmenero, F.** Healthier meat and meat products: their role as functional foods / **F. Jimйnez-Colmenero, J. Carballo, S. Cofrades //** *Meat Sci*. – 2001. –59(1). –5 -13. – doi: 10.1111/j.1365-2621.2005.tb07110.x.
10. **Пасічний, В. М.** М'ясомісткі напівфабрикати кулінарні з м'яса птиці підвищеної харчової цінності / **В. М. Пасічний, Г. О. Сімахіна, А. М. Гередчук, В. В. Задорожній** // *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. Ґжицького*. – 2014. - Т. 16, № 2(4). - С. 149-155.
11. **Пасічний, В.М.** Рангове оцінювання комбінованих м'ясопродуктів / **В.М. Пасічний** // *Наукові праці НУХТ*. – 2002. – № 11. – С.77-80.
12. **Пасічний, В. М.** Визначення споживчої вартості комбінованих м'ясопродуктів / **В. М. Пасічний** // *Наукові праці НУХТ*. – 2003. - № 14. – С. 81-84.

13. **Шведюк, Д. А.** Дослідження фізико-хімічних властивостей напівфабрикатів м'ясних з додаванням білково-жирових емульсій на основі купажованих жирів / **Д. А. Шведюк, В. М. Пасічний, Ж. І. Прохоренко** // **Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях**. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 223-227. – doi:10.20998/2413- 4295.2016.42.36.
14. **Betti, M. 1.** Omega-3-enriched broiler meat: 2. Functional properties, oxidative stability, and consumer acceptance / **M. l. Betti, B. L. Schneider, W. V. Wismer, V. L. Carney, M, J, Zuidhof, R. A. Renema** // *Poult Sci*. – 2009. – 88(5). – 1085-95. – doi: 10.3382/ps.2008-00158.
15. **Barroeta, A. C.** Nutritive value of poultry meat: relationship between vitamin E and PUFA / **A. C. Barroeta** // *World's Poultry Science Journal.* – 2007. – 63(2). – p. 277–284. – doi: 10.1017/S0043933907001468.

Bibliography (transliterated)

1. **Radziyevs`ka, I. G.** Rozrobka texnologiyi kupazhovany`x tvary`nno-rosly`nny`x zhy`riv pidvy`shhenoyi xarchovoyi cinnosti : avtoref. dy`s... kand. texn. nauk: 05.18.06 / Nacional`ny`j texnichny`j universy`tet "Xarkivs`ky`j politexnichny`j insty`tut". - Xarkiv, 2010. - 23 s.
2. **Wood, J. D., Richardson, R. I., Nute, G. R., Fisher, A. V., Campo, M. M., Kasapidou, E., Sheard, P. R., Enser, M.** Effects of fatty acids on meat quality: a review. *Meat Sci*. 2004 **66(1)**, 21-32. doi: 10.1016/S0309-1740(03)00022-6. PubMed PMID: 22063928.
3. **Simopoulos. A. P.** The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids, *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2004, V. **56**, Issue 8, 365-379, doi: 10.1016/S0753-3322(02)00253-6.
4. **Rymer, C. & Givens, D. I.** n−3 fatty acid enrichment of edible tissue of poultry: A review. *Lipids*, 2005, **40**, 121. doi:10.1007/s11745-005-1366-4.
5. **Howe, P., Meyer, B., Record, S., Baghurst, K.** Dietary intake of long-chain omega-3 polyunsaturated fatty acids: contribution of meat sources, *Nutrition*. 2006, **22(1)**, 47-53. doi: 10.1016/j.nut.2005.05.0099.
6. **Wood, J. D., Enser, M., Fisher, A. V., Nute, G. R., Sheard, P. R., Richardson, R. I., Hughes, S. I., Whittington, F. M.** Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: A review, *Meat Science*, **78(4)**, 343-58, doi: 10.1016/j.meatsci.2007.07.019.
7. **Paty`eva, A. M., Paty`eva, S. V., Vely`chko, V. A**. Zhy`rnoky`slotnij sostav shpy`ka svy`nej datskoj porodi, *Vestny`k NGY`ЭY`*. 2012.
8. **Arxy`pov, A. V.** Ly`py`dnaya py`tatel`nost` myasa pty`czy` vly`yany`e na nee faktorov py`tany`ya. *Vestny`k FGOU VPO Bryanskaya GSXA*. 2010.
9. **Jimйnez-Colmenero, F., Carballo, J., Cofrades, S.** Healthier meat and meat products: their role as functional foods. *Meat Sci*. 2001, **59(1)**, 5 - 13, doi: 10.1111/j.1365-2621.2005. tb07110.x.
10. **Pasichnyi, V. M., Simakhina, H. O., Heredchuk, A. M., Zadorozhnii, V. V.** Miasomistki napivfabrykaty kulinarni z miasa ptytsi pidvyshchenoi kharchovoi tsinnosti, *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnolohii im. Gzhytskoho*. 2014, **16**, № 2(4). 149-155.
11. **Pasichnyi, V.M.** Ranhove otsiniuvannia kombinovanykh miasoproduktiv, *Naukovi pratsi NUKhT*. 2002, № **11**, 77-80.
12. **Pasichnyi, V. M.** Vyznachennia spozhyvchoi vartosti kombinovanykh miasoproduktiv, *Naukovi pratsi NUKhT*. 2003, № **14,** 81-84.
13. **Shvedyuk, D. A., Pasichny`j, V. M., Proxorenko, Zh.I.** Doslidzhennya fizy`ko-ximichny`x vlasty`vostej napivfabry`kativ m'yasny`x z dodavannyam bilkovo-zhy`rovy`x emul`sij na osnovi kupazhovany`x zhy`riv, *Visny`k NTU «XPI», Seriya: Novi rishennya v suchasny`x texnologiyax*. Xarkiv: NTU «XPI». 2016. **42** (1214). 223-227. doi:10.20998/2413- 4295.2016.42.36.
14. **Betti, M. 1., Schneider, B. L., Wismer, W. V., Carney, V. L., Zuidhof, M. J., Renemam R. A.** Omega-3-enriched broiler meat: 2. Functional properties, oxidative stability, and consumer acceptance. *Poult Sci*. 2009, **88**(5), 1085-95. doi: 10.3382/ps.2008-00158.
15. **Barroeta, A. C**. Nutritive value of poultry meat: relationship between vitamin E and PUFA, *World's Poultry Science Journal*, 2007, **63**(2), 277–284. doi: 10.1017/S0043933907001468.

Відомості про авторів (About authors)

Пасічний Василь Миколайович – доктор технічних наук, професор, Національний Університет Харчових технологій, профессор кафедри Технології м'яса та м'ясних продуктів; м. Київ, Україна; e-mail: pasww1@ukr.net.

Vasyl Mykolayevitch Pasichnyi – Doctor of Science, Full professor, National University of Food Technologies, professor of Department of meat and meat products technology, Kyiv,Ukraine; e-mail: pasww1@ukr.net.

Шведюк Дмитро Анатолійович – магістрант, кафедра Технології м'яса та м'ясних продуктів, Національний Університет Харчових технологій, м. Київ; e-mail: shvedyuk.d@ukr.net.

Dmytro Anatoliyovytch Shvedyuk – postgraduate, National University of Food Technologies, Department of meat and meat products technology, Kyiv,Ukraine; e-mail: shvedyuk.d@ukr.net.

Радзієвська Ірина Геронтіївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний Університет Харчових технологій, заступник завідувача кафедри Технології жирів та парфумерно-косметичних продуктів ; м. Київ, Україна; e-mail: logos2007@ukr.net.

Irina Herontiivna Radzievska – Candidate of Science, Assistant professor, National University of Food Technologies, department director assistant of Department of fat, perfumery and cosmetic products technology, Kyiv, Ukraine; e-mail: logos2007@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Шведюк, Д. А. Моделювання жирнокислотного складу січених напівфабрикатів з м'яса птиці з використанням модифікованих жирів / **Д. А. Шведюк, В. М. Пасічний, І. Г. Радзієвська** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 225-232. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.32.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Please cite this article as:

Shvedyuk, D., Pasichniy, V., Radzievska, I. Modeling of fatty acid composition of poultry meat minced half-finished products with modified fats application. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 225–232, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.32.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Шведюк, Д. А. Моделирование жирнокислотного состава рубленных полуфабрикатов с мяса птицы с использованием модифицированных жиров / **Д. А. Шведюк, В. Н. Пасичный, Радзиевская И. Г.** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017.– № 7 (1229). – С. 225-232. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.32.

АННОТАЦИЯ *Исследовано возможность улучшения биологической полноценности жирнокислотного состава полуфабрикатов мясных на основании мяса цыплят бройлеров путем внесения в рецептуру модифицированного жира и комбинирования мясного сырья с клетчаткой и растительным сырьём. Проанализировано изменение жирнокислотоного состава рубленных полуфабрикатов с мяса птицы при разных уровнях введения и видах модифицированных жиров, обосновано рациональные уровни и форму внесения модифицированных жиров. Проведено сравнительный аналіз смоделированных рецептур с продуктами традиционного ассортимента и доказано повышение биологической полноценности продукта.*

Ключевые слова: *полуфабрикаты; модифицированные жиры; мясо птицы; клетчатка; пальмовое масло*

Поступила (received) 10.03.2017

УДК 620.179.16 doi:10.20998/2413-4295.2017.07.33

АНАЛІЗ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ В ПРОЦЕСАХ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕЙВЛЕТ-ПАКЕТІВ

В. В. ШЕВЧЕНКО, С. С. ЗАЄЦЬ, А. І. ОЛІНІЙЧУК*

Кафедра приладобудування. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Сікорського», Київ, УКРАЇНА.
**email: a.oliniychuk@gmail.com*

АНОТАЦІЯ *В даній роботі були проведені дослідження акустичної емісії (АЕ) в рамках моніторингу процесів механічної обробки. АЕ безпосередньо пов'язана зі станом інструменту, так як акустична хвиля генерується за рахунок пластичної деформації, стирання, руйнування та поширення тріщин. У дослідженні, опублікованому в даній роботі було виміряно декілька параметрів АЕ під час механообробки. В той час як ці параметри вказують на ступінь зносуріжучого інструменту, їх інформативність для промислового використання обмежена. Для набуття більшої інформативності була використана теорема вейвлет-пакетів (ВП), за допомогою якої ми ввели додаткові коефіцієнти ентропію та силу. Отримали адекватну модель для визначення стану інструменту.*
Ключові слова*:акустична емісія; вейвлет-пакети; ентропія; механічна обробка; аналіз АЕ*

ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION IN THE PROCESSES OF MACHINING USING WAVELET PACKETS

V. SHEVCHENKO, S. ZAYATS, A. OLINIYCHUK

[1]Department of Instrument Design and Engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE.

ABSTRACT *The problem of safe operation and efficient operation of complex technical systems and equipment hazardous industries. A significant depreciation of industrial equipment involves the search for new approaches to solving the problems that stand before the technical diagnosis. The aim was to develop a system of analysis of acoustic emission (AE) for machining processes. Originally performed by analysis of informative parameters of AE. After the experiment, it was found that their information content is insufficient for industrial use. To solve this problem, we used wavelet packet method. Using advanced options and forces of entropy, solved the problem, which was confirmed experimentally. Parameter energy in conjunction with the parameters of AE is a measure of tool wear. When we register peak signals a change in the behavior of other parameters, leading to the rejection of the system. Informative parameters AE can establish dependency on energy consumption equipment that gives a fairly accurate results. The downside can be assumed that all of these parameters and their combination is sensitive to the conditions and needs careful care facilities.*
Keywords: *acoustic emission; wavelet packet; entropy; machining; analysis of AE*

Вступ

Під час моніторінгу процесів механічної обробки метод акустичної емісії має ряд значних переваги у порівнянні з іншими. Основною серед них є те, що акустична емісія має широкий спектр коливань, набагато ширший ніж у відповідних коливань спричинених вібраціями обладнання та шумами навколишнього середовища. При цьому вона не впливає на операції різання. З іншого боку, акустична емісія безпосередньо пов'язана зі станом інструменту, оскільки коливання генеруються за рахунок пластичної деформації, стирання, руйнування та поширення тріщин.

Науковці [1] встановили, що процеси деформації та руйнування є основним джерелом акустичної емісії у механічній обробці металів. Вони виділяють три зони, де може виникати акустична емісія:

Зона первинної деформації: ріжучий край інструменту, поступово наближаючись до матеріалу та тиснучи на нього, формує зріз фронтальної зони.

Стружка здіймається над лицьовою стороною інструменту і він частково деформується.

Зона вторинної деформації: виникає у проміжку між стружкою та ріжучим краєм у момент стирання та часткової деформації інструменту,

Зона третинної деформації: виникає у місці тертя нової поверхні, вивільненої з-під стружки, та ріжучого краю інструмента.

Коли стружка відділяється та падає, незалежно від того постійно чи періодично, вона пошкоджує металеву частину інструменту. Відповідно, це має бути вказане як додаткове джерело акустичної емісії.

© В. В. ШЕВЧЕНКО, С. С. ЗАЄЦЬ, А. І. ОЛІНІЙЧУК, 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Мета роботи

Під час моніторінгу процесів механічної обробки метод акустичної емісії має ряд значних переваги у порівнянні з іншими. Основною серед них є те, що акустична емісія має широкий спектр коливань, набагато ширший ніж у відповідних коливань спричинених вібраціями обладнання та шумами навколишнього середовища. При цьому вона не впливає на операції різання. З іншого боку, акустична емісія безпосередньо пов'язана зі станом інструменту, оскільки коливання генеруються за рахунок пластичної деформації, стирання, руйнування та поширення тріщин.

Науковці [1] встановили, що процеси деформації та руйнування є основним джерелом акустичної емісії у механічній обробці металів. Вони виділяють три зони, де може виникати акустична емісія:

Зона первинної деформації: ріжучий край інструменту, поступово наближаючись до матеріалу та тиснучи на нього, формує зріз фронтальної зони. Стружка здіймається над лицьовою стороною інструменту і він частково деформується.

Зона вторинної деформації: виникає у проміжку між стружкою та ріжучим краєм у момент стирання та часткової деформації інструменту,

Зона третинної деформації: виникає у місці тертя нової поверхні, вивільненої з-під стружки, та ріжучого краю інструмента.

Коли стружка відділяється та падає, незалежно від того постійно чи періодично, вона пошкоджує металеву частину інструменту. Відповідно, це має бути вказане як додаткове джерело акустичної емісії.

Виклад основного матеріалу досліджень

Попередні теоретичні дослідження [1] співвідносять різноманітні параметри різання із значенням RMS сигналу на основі формули 1. Це спів- відношення бере до уваги першу та другу зони деформації акустичної емісії. Якщо ми хочемо застосувати формулу 1, то вплив третинної зони деформації має бути мінімізований. Мінімізувати акустичну емісію спричинену відділенням стружки можна за допомогою переміщення стружки поза межі робочої зони. Джерела акустичної емісії, пов'язані із третинною зоною деформації можуть бути зменшені за рахунок гостроти ріжучого краю інструменту, а також за умови взяття до уваги лише початкової стадії виробничого процесу(процесу обробки)

$$RMS = C\,sin\alpha\left(\tau_k b_1 U\left(\frac{cos\alpha}{sin\alpha cos(\varphi-\alpha)}t_1+\frac{1}{3}(l+\right.\right.$$
$$\left.\left.+2l_1)\frac{sin\alpha}{cos(\varphi-\alpha)}\right)^{\frac{1}{2}}\right. \quad (1)$$

де : b_1 – ширина різання, l_1 – довжина зони різання, l – довжина зони контакту ріжучого інструменту й стружки, U – швидкість різання, α – передній кут, φ – кут зсуву, τ_k – напруга зсуву, C – const.

Рівняння 1, є поганим наближенням до реальних експериментів, хоч воно і описує вплив геометрії і швидкості на процес різання. До тих пір поки йде руйнування геометрії ріжучого інструменту відбувається зміна константи та змінних, вони приймають різні значення. Крім того, при механічній обробці важлива частина АЕ генерується в третинній зоні. Через це потрібно статистичне дослідження декількох параметрів сигналу АЕ.

Реалізований метод аналізу сигналів в даній роботі ґрунтується на вейвлетному пакеті перетворень («Wavelet Packet Transform»).

Це узагальнення стандарту вейвлет - перетворення і дозволяє контролювати точність аналізу в частотної області[2]. Існує широкий набір ортогональних баз - сигналів з кінцевою енергією, які пов'язані з цим методом. Для оптимального представлення сигналу, підбираються адекватні критерії, для вибору кращої бази [3]. Елементарними функціями, які складають основи, є хвильові пакети. Їх можна розглядати як вейвлети фіксованої тривалості та патерну коливань. Таким чином можна розширити набір стандартних вейвлетів, що поєднуються в широкому діапазоні за частотою і часом.

Метод Вейвлет Пакетів, запропонований Маэром[4], є результатом послідовного застосування пари сполучених фільтрів, пов'язаних зі схемою кратномасштабного аналізу.

Маючи заданий сигнал, можна проаналізувати його за допомогою узагальненого алгоритму Маллата, що оснований на рекурсивній дії кон'югованих фільтрів[5]. Ця процедура організована таким чином: генеруються коефіцієнти, які представляють сигнал в класах елементарних функцій, організованих в бібліотеці ортонормованих базисів. Коли цей процес буде завершений, ми повинні вибрати коефіцієнти , які відповідають оптимальній основі.

Нарешті , ми маємо уявлення про сигнал у вигляді:

$$s(t) = \sum_j c_j \varphi_j(t) \quad (2)$$

де j – пакет хвиль в оптимальній базі, c_j – відповідний коефіцієнт представлення.

Оскільки базис ортонормований, енергія сигналу визначається за формулою:

$$\int |s(t)|^2 dt = \sum_j |c_j|^2 \quad (3)$$

Інформація, представлена коефіцієнтами j , які залежать від обраного критерію. Зокрема, якщо використовувати критерій мінімальної ентропії, ми обираємо основу, яка зводить до мінімуму число значущих коефіцієнтів в поданому сигналі.

Ентропія S є параметром, який відображає значення ступеню внутрішнього розладу або неорганізованості сигналу що до заданого базису: відносно низьке значення ентропії свідчить про наявність структури здатною до розпізнавання навіть на рівні елементів паттернів. Що в свою чергу, робить результати більш точними та корельованими, та робить використання та подальші обрахунки біль надійними. Навпаки, ситуація коли значення ентропії є високим, це вказує на відсутність простої та ідентифікованої структури [5-7] . Що в свою чергу може потребувати введення параметрів для корекції результатів, а це ускладнення підрахунків та зниження достовірності отриманих результатів

Застосування цих критеріїв виявляється досить корисним, зокрема, для аналізу послідовностей сигналів, що надходять від процесів з властивостями, які задаються стаціонарно в короткі проміжки часу, але не є стаціонарними. Стаціонарні сигнали з плином часу не можуть ні затухати, ні набувати все більших значень, тому їх в урахування є недоречним. Оскільки, використовувані сигнали, обмежені в часі, вони будуть нестаціонарними [8-9].

Під час обробки сигнал було розділено на аналоговий та дискретний. В даній роботі були проаналізовані тільки аналогові сигнали (з простору L – простір неперервних по області визначення), оскільки вони містять інформацію про зношування інструменту. Вони несуть інформацію про мікротріщини інструменту та шуми. Стаціонарними сигналами являються ті, що мають середнє значення.

Обговорення результатів

Стаціонарні сигнали є ті, які мають середнє $E(xt)$ та такий параметр автокореляції $R_x(t, t+\tau)$, і не залежать від часу , на відміну від нестаціонарних, котрі модулюються за часом та частотою. Сигнал знаходиться в нерухомому стані, якщо:

$$E = (X_1) = \mu_k \quad (4)$$

$$R_x(t, t+\tau) = R_x(\tau) \quad (5)$$

тобто з практичної точки зору:

$$|E(X_1) - \mu_k| \leq \varepsilon \quad (6)$$

$$|R_x(t, t+\tau) - R_x(\tau)| < \varepsilon \quad (7)$$

Приймаємо μ_k та $R_x(\tau)$ константи. У рівнянні 4, використовуємо контроль стаціонарності. У тому сенсі, що сигнал буде розділений на аналоговий та дискретний.

Первинна обробка даних АЕ полягала в прийнятті інформативних параметрів, які встановлюються системою, обираючи середнє значення пісня кожного проходження. Зростання енергії зображено на рис. 1. Ми можемо спостерігати піки посеред випробування. Цей пік попереджує про зміну інших параметрів, таких як сумарний підрахунок, швидкість підрахунку, амплітуда, спектр та кількість сигналів перевищуючих встановлений поріг. Після перевищуючого піку, ці п'ять параметрів представляють критичні значення. На рис. 2 зображена динаміка енергії, отримана у другом експерименті. Енергетичний пік був отриманий в другій частині, що супроводжувалося перегрівом, але він не є критичним, хоча може вказати на деякі нюанси в роботі системи.

На графіках рис.1, рис.2 добре помітно пікове зростання енергії, яке наглядно нам демонструє ситуацію, яка відбувається з інструментом під час роботи. Тобто це свідчить про зміну наших інформативних параметрів, враховуючи, що ми маємо різні піки для кожного інструменту, то можна вважати, що це є недоліком для прийняття даних параметрів для діагностики у промисловості.

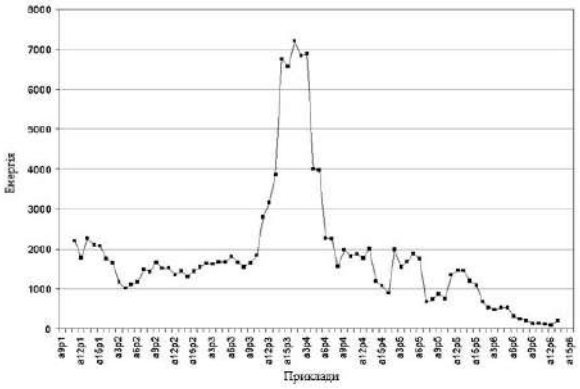


Рис. 1 – Перепад енергії у першому експерименті

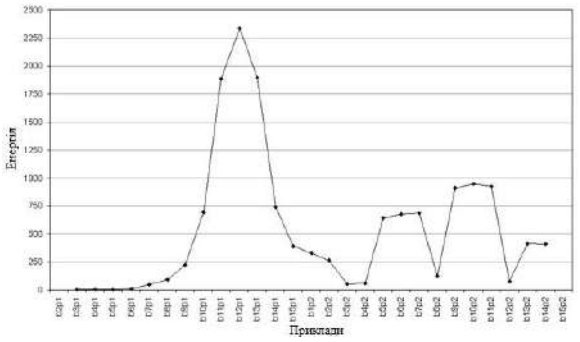


Рис. 2 – Перепад енергії у другому експерименті

На гістограмах рис. 3, рис. 4, помітно, що пошкодження інструменту відбувається переважно за низьких частот.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

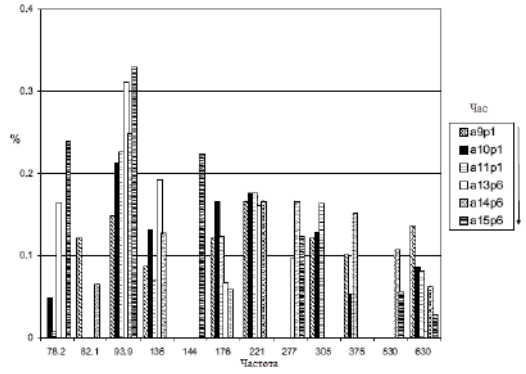


Рис. 3. – Частотна діаграма до першого експерименту

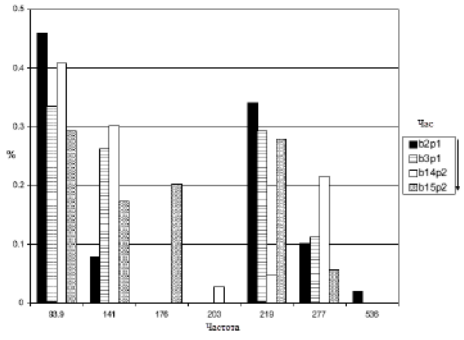


Рис. 4. – Частотна діаграма до другого експерименту

Перепади енергії, що супроводжуються зміною параметрів на графіках та гістограмах вказують на необхідність обробки сигналів з допомогою методів, розроблених для нестаціонарних процесів, таких як ВП. Таким чином, ми шукаємо показники, які встановлять залежність з енергією.

Ми використовуємо метод ВП, оскільки кожен пакет містить інформацію про сигнал, залежність частоти від часу. Застосовуючи даний метод, ми отримаємо коефіцієнти за якими, зможемо розрахувати потужність за формулою 8.

$$P = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} c_j^2 \qquad (8)$$

c_j – коефіцієнт ВП в зазначеному діапазоні, N – число коефіцієнтів. Щоб розподілити сигнал по рівням, ми використали батьківську вейвлет-функцію (Вейвлет Хаара). Після розкладання сигналу, обираємо кращий базис. Ми шукали базис з мінімальною ентропією ВП, для перетворення коефіцієнтів. Далі використовуємо модель рівняння Шеннона – Вивера (Shanon-Weawer model) для обчислення ентропії ,що зводиться до рівняння 9.

$$S = -\sum_i p_i \log p_i \qquad (9)$$

Де p_i:

$$p_i = \frac{c_i^2}{NP} \qquad (10)$$

На рис. 5 та рис. 6, зображено напівалгорифмічні графіки, які відображають ситуацію в попередньо проведених експериментах, але розрахованих та від ображених за новою системою розрахунку. Можна помітити, що графіки нагадують попередні. Але різниця полягає в тому, що представлені нижче - значно посилені. Іншим важливим моментом є те, що обчислення потужності здійснюється з фіксованим часовим вікном і не залежить від загальної тривалості подій, як в попередньому випадку.

Це зручно для розрахунку інших показників, які доповнюються або посилюються, встановлення залежності параметрів та енерговитрат добре себе зарекомендувала. Зміна частот відображається та вказує індикатору на розподіл частот.

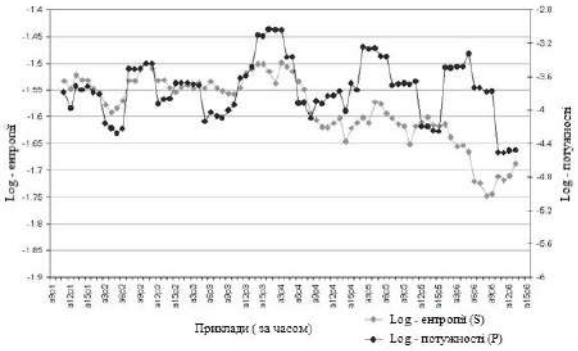


Рис. 5 – Результати першого експерименту розраховані за методом ВП

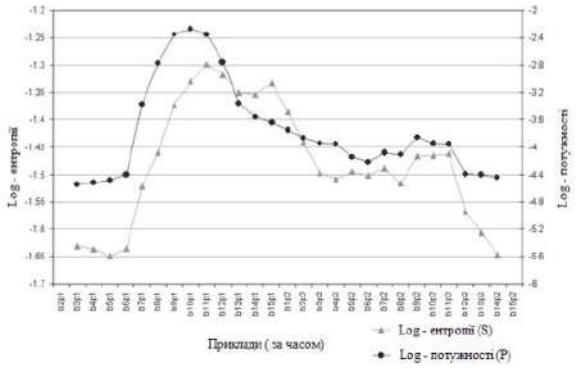


Рис. 6 – Результати другого експерименту розраховані за методом ВП

Порівнюючи результати одних й тих самих експериментів, але обрахованих за різними методами, то одразу помітно, що система ВП, є більш досконалою, а результати несуть більше інформації, встановлюють більш широкі та точні залежності з інформативними параметрами системи обробки. Це

дозволяє робити подальші розрахунки більш точними та надійними.

Висновки

Параметр енергії в зв'язці з параметрами АЕ є показником зносу інструменту.Коли ми реєструємо пікові сигнали , відбувається зміна в поведінці інших параметрів, що приводить до відхилення роботи системи. Інформативні параметри АЕ можуть встановлювати залежність з енерговитратами обладнання, що дає досить точні результати. Недоліком можна вважати , те що всі ці параметри та їх поєднання є чутливим до умов експлуатації, та потребує ретельного догляду за обладнанням.

Потужність розраховується за коефіцієнтами ВП в обраному діапазоні частот і являється гарним індикатором стану інструменту. Відображення зносу інструменту зображено в проведених тестах, ми бачимо максимальні й мінімальні значення у різних тестах, дані параметри та тести були збережені, в наших планах на наступні роки є впровадження бази коефіцієнтів та побудови для неї нейромережі на базі нечітких методів прогнозування.

Це дозволить розробити гнучку систему автоматичного контролю, яка буде відстежувати стан інструменту, відображати періоди підвищеного зносу інструменту, проводити аналіз даних та надавати своєчасні рекомендацію, що до часу роботи до наступного втручання в систему, впроваджувати більш ефективні режими обробки.

Дані напрацювання вже зараз дозволяють, проводити моніторинг стану інструменту, що дозволить підприємству підвищити продуктивність та покращити економічні показники.

Список літератури

1 **Heiple, C. R.** Origin of Acoustic Emission produced during single point machining / **C. R. Heiple, S. H. Carpenter, D. L. Armentrout and A. Mc Manigle** // *Materials Evaluation*. – 1994. – 52. – 590-596.
2 **Kamarthi, S. V.** Flank wear estimation in turning through wavelet representation of Acoustic Emission signals / **S. V. Kamarthi, S.R.T. Kumara, and P.H. Cohen** // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2000. – 122. – 12-19. – doi:10.1115/1.538886
3 **Kannatey-Asibu, Jr. E.** Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting / **Jr. E. Kannatey-Asibu and D. A. Dornfeld** // *Journal of Engineering for Industry*. – 1981. – 103. – 330-340. – doi:10.1115/1.3184493
4 **Mallat, S**. Multiresolution Representation and Wavelets. – Grasp. Lap 153. – *University of Pennsylvania*. – Philadelphia. – 1988.
5 **Meyer, Y**. Wavelets: Algorithms and Applications. – *SIAM*. – Philadelphia. – 1993.
6 **Jamaludin, N.** Condition Monitoring of Slow-speed Rolling Element Bearings using Stress Waves / **N. Jamaludin, R. H. Bannister** // *Proc. Inst. Mech. Eng*. – 2001. – 215. – 245-271.
7 **Ono, K.** New Characterization Methods of AE Sensors / **K. Ono, H. Cho, and T. Matsuo** // *JAE*. – 2010. – 28. – 256.
8 **Zhang, L. J.** Morphological Undecimated Wavelet and Its Application to Feature Extraction of Impulsive Signal / **L.J. Zhang, J. H. Yang, J. W. Xu, D. B. Yang** // *Shock Vibr*. 2007. – 26. – 56-59. – doi**:** 10.1109/CISP.2009.5303712.
9 **He, Y. Y.** Acoustic Emission characteristics of Rub-impact for Rotor-bearing System Based on Wavelet Scalogram / **Y. Y. He, X. Y. Yin, F. L. Chu** // *Chin. J. Mech. Eng*. – 2007. – 43. – 149-153. – doi: 10.3901/JME.2007.06.149.
10 **Li, Z.** Bearing condition monitoring based on shock pulse method and improved redundant lifting scheme / **Z. Li, Z. J. He, Y. Y. Zi, X. F. Chen** // *Math. Comput. Simulat*. – 2008. – 79. – 318-338. – doi: 10.1016/j.matcom.2007.12.004.
11 **Остафьев, В. А.** Адаптивная система управления / **В. А. Остафьев, Г. С. Тымчик, В. В. Шевченко** // *Механизация и автоматизация управления*. – 1983. –№1. – с. 18-20.
12 **Шевченко, В. В.** Система автоматической размерной настройки ГПС/ **В. В. Шевченко, Н. А. Симута, А. А. Скороход.** – Киев. – 2014. – с. 7-10.
13 **Заєць, С. С**. Система прогнозування стану процесу механічної обробки / **С. С. Заєць, І. В. Максимчук, К. О. Педько**. // *Науковий вісник КУЕІТУ*. – 2012.
14 **Reininger, T.** Sensors in position control applications for industrial automation / **T. Reininger, F. Welker, M. von Zeppelin** // *Sens. Act. A.* – 2006. – 129. – 270-274. – doi: 10.1016/j.sna.2005.09.056.
15 **Leroy, P.** An ac/dc magnetometer for space missions: Improvement of a Hall sensor by the magnetic flux concentration of the magnetic core of a searchcoil / **P. Leroy, C. Coillot, V. Mosser,** et al. // *Sens. Act. A*. – 2008. – 142. – 503-510. – doi: 10.1016/j.sna.2007.08.030.
16 **Bukkapatnam, S. T. S.** Analysis of acoustic emission in machining / **S. T. S. Bukkapatnam, S. R. T. Kumara, and A. Lakhtakia** // *ASME Transactional Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2003. – vol. 121. – p.568-573. – doi: 10.1016/S0041-624X(99)00126-2.
17 **Kumara, S. R. T.** Sensor based of monitoring for real time quality control in manufacturing / **S. R. T. Kumara, S. V. Kamarthi, S. T. S. Bukkapatnam, and J. W. Lee** // *ASME Transactional Journal of Dynamic System. –Measurements and Control*. – 2000. – vol. 122. – 89-94.

Bibliography (transliterated)

1 **Heiple, C. R., Carpenter, S. H., Armentrout, D. L. and Mc Manigle, A.** Origin of Acoustic Emission produced during single point machining, *Materials Evaluation*, 1994, **52**, 590-596.
2 **Kamarthi, S. V., Kumara, S. R. T., and Cohen, P. H.** Flank wear estimation in turning through wavelet representation of Acoustic Emission signals, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2000, **122**, 12-19. doi:10.1115/1.538886.
3 **Kannatey-Asibu, Jr. E. and Dornfeld, D. A.** Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting, *Journal of Engineering for Industry*, 1981, **103**, 330-340. doi:10.1115/1.3184493.
4 **Mallat, S**. Multiresolution Representation and Wavelets, Grasp. Lap 153, University of Pennsylvania, Philadelphia, 1988.
5 **Meyer, Y**. Wavelets: Algorithms and Applications, SIAM, Philadelphia, 1993.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

6 **Jamaludin, N., Bannister, R. H.** Condition Monitoring of Slow-speed Rolling Element Bearings using Stress Waves. *Proc. Inst. Mech. Eng*. 2001, **215**, 245-271.
7 **Ono, K., Cho, H., and Matsuo, T.** New Characterization Methods of AE Sensors, *JAE,* 2010, **28,** 256.
8 **Zhang, L. J., Yang, J. H. Xu, J. W., Yang, D. B**. Morphological Undecimated Wavelet and Its Application to Feature Extraction of Impulsive Signal. *Shock Vibr*. 2007, **26**, 56-59. doi**:** 10.1109/CISP.2009.5303712.
9 **He, Y. Y. Yin, X. Y. Chu, F. L**. Acoustic Emission characteristics of Rub-impact forRotor-bearing System Based on Wavelet Scalogram. *Chin. J. Mech. Eng*. 2007, **43**, 149-153. doi: 10.3901/JME.2007.06.149.
10 **Li, Z., He, Z. J., Zi, Y. Y., Chen, X. F.** Bearing condition monitoring based on shock pulse method and improved redundant lifting scheme. *Math. Comput. Simulat*. 2008, **79**, 318-338. doi: 10.1016/j.matcom.2007.12.004.
11 **Ostafiev, V. A., Tymchik, G.S., Shevchenko, V.V.** Adaptive control system. *Mechanization and automation of management*. 1983, No. **1,** 18-20.
12 **Shevchenko, V. V., Simuta, N. A., Skorokhod, A. A.** The system of automatic dimensional adjustment of GPS. Kiev, 2014, 7-10.
13 **Zayats, S. S**. System forecasting of process of machining / **S. S. Zayats, I. V. Maksymchuk, K. O. Pedko** // *Scientific Herald KUEITU*. - 2012.
14 **Reininger, T., Welker, F., von Zeppelin, M.** Sensors in position control applications for industrial automation, *Sens. Act. A*, 2006, **129**, 270-274. doi: 10.1016/j.sna.2005.09.056.
15 **Leroy, P., Coillot, C., Mosser, V.,** et al.: An ac/dc magnetometer for space missions: Improvement of a Hall sensor by the magnetic flux concentration of the magnetic core of a searchcoil. *Sens. Act. A*, 2008, **142,** 503-510. doi: 10.1016/j.sna.2007.08.030.
16 **Bukkapatnam, S. T. S., Kumara, S. R. T., and Lakhtakia, A.** Analysis of acoustic emission in machining, *ASME Transactional Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2003, vol. **121**, 568-573. doi: 10.1016/S0041-624X(99)00126-2.
17 **Kumara, S. R. T., Kamarthi, S. V., Bukkapatnam, S. T. S., and Lee, J. W.** Sensor based of monitoring for real time quality control in manufacturing, *ASME Transactional Journal of Dynamic System, Measurements and Control*, 2000, vol. **122**, 89-94.

Відомості про авторів (About authors)

Шевченко Вадим Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», виконуючий обов'язки завідувача кафедри виробництва приладів, м. Київ, Україна; e-mail: vp@kpi.ua.

Vadim Shevchenko– Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Instrumentation Design and Engineering, «National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine; e-mail: vp@kpi.ua.

Засць Сергій Сергійович – асистент кафедри виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: zss_vp@bigmir.net.

Sergey Zayats– Assistant, Department of Instrumentation Design and Engineering, «National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine; e-mail: zss_vp@bigmir.net.

Олінійчук Антон Ігорович – магістрант кафедри виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: a.oliniychuk@gmail.com.

Anton Oliniychuk– Master`s degree student, Department of Instrumentation Design and Engineering, «National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine; e-mail: a.oliniychuk@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Шевченко, В. В. Аналіз акустичної емісії в процесах механічної обробки з використанням вейвлет – пакетів / **В. В. Шевченко, С. С. Заєць, А. І. Олінійчук** //*Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 233-238. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.33.

Please cite this article as:

Shevchenko, V., Zayats, S., Oliniychuk, A. Analysis of acoustic emission in the processes of machining using wavelet packets. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 233-238, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.33.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Шевченко, В. В. Анализ акустической эмиссии в процессах механической обработки с использованием вейвлет-пакетов / **В. В. Шевченко, С. С. Заец, А. И. Олинийчук** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 233-238. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.33.

АННОТАЦИЯ *В данной работе были проведены исследования акустической эмиссии (АЭ) в рамках мониторинга процессов механической обработки. АЭ непосредственно связана с состоянием инструмента, так как акустическая волна генерируется за счет пластической деформации, истиранию, разрушения и распространение трещин. В исследовании, опубликованном в данной работе были измерены несколько параметров АЭ во время механообработки. В то время как эти параметры указывают на степень износа режущего инструмента, их информативность для промышленного использования ограничена. Для получения большей информативности была использована теорема Вейвлет-пакетов, с помощью которой мы ввели дополнительные коэффициенты энтропию и силу. Получили адекватную модель для определения состояния инструмента.*

Ключевые слова: *акустическая эмиссия; вейвлет-пакеты; энтропия; механическая обработка; анализ АЭ*

Надійшла (received) 28.02.2017