

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Нові рішення
в сучасних технологіях**

№ 16 (1292) 2018

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: New solutions
in modern technology**

No. 16 (1292) 2018

Collected Works

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2018

Kharkiv
NTU "KhPI", 2018

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2018. — № 16 (1292) 2018. — 200 с. — ISSN 2079-5459.

Журнал публікує наукові результати мультидисциплінарних досліджень та досягнення молодих науковців широкого профілю у сферах машинобудування, енергетики, технологій органічних і неорганічних речовин, екології, інформаційних технологій і систем управління, а також з фундаментальних аспектів сучасних технологій.

The journal publishes scientific results of multidisciplinary researches and accomplishments of young scientists of a wide profile in the field of machine building, energy, technologies of organic and inorganic substances, ecology, information technologies and control systems, as well as on the fundamental aspects of modern technologies.

Державне видання.

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року.

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Наказом МОН України № 1328 від 21.12.2015 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року».

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях» індексується в наукометричних базах даних Index Copernicus (Польща), OCLC WorldCat (США), Google Scholar; включений у світовий каталог періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/>

Засновник

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Головний редактор

Сокол С. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

Заст. головного редактора

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Секретар

Горбунов К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Редакційна колегія серії

Відповідальний редактор:

Сокол С. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний секретар:

Томашевський Р. С., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Меньшикова С. І., НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Брагіна Л. Л., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Вехов Є., Мерилендський університет, США

Гораш Є., проф., Університет Стратклайда, Великобританія

Данько В. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Долбня В. Т., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Клепиков В. Б., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Куліченко В. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Ларін О. О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Львов Г. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Мележик Є., Інститут фізики напівпровідників імені В. Є.

Лашкарьова НАНУ, Україна

Піментел С. Р., проф., Федеральний Університет Гояс,

Бразилія

Раскін Л. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Ситнік Р. Д., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Editor-in-chief

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

Deputy editor-in-chief

Marchenko A. P., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Secretary

Gorbunov K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff

Associate editor:

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

Executive secretary:

Tomashevskiy R. S., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Menshikova S. I., NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Bragina L. L., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Vekhov Ye., University of Maryland, College Park, USA

Gorash Ye., prof., University of Strathclyde, UK

Danko V. G., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Dolbnya V. T., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Klepikov V. B., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Kulichenko V. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Larin A. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Lvov G. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Melezhyk Ye., V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics

NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

Pimentel S., prof., Federal University of Goias, Brazil

Raskin L. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Sytnik R. D., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 5 від 25 травня 2018 р.

УДК 669

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.01

ПРОЕКТУВАННЯ ПРОГНОЗУЄМИХ СТРУКТУР ПЕРЕРІЗІВ ВИЛИВКА БЛОК-КАРТЕРА ЦИЛІНДРІВ

О. В. АКИМОВ¹, П. С. ПЕНЗЕВ², Л. О. САЛТИКОВ³, О.М. ГОРОЩЕНКО³

¹ завідувач кафедри ливарного виробництва, проф., НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

² Асистент Кафедри Ливарного Виробництва, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

³ магістрант кафедри ливарного виробництва, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

АННОТАЦІЯ У статті досліджено гідродинамічні процеси заливки та кристалізації вилівки блок-картера циліндрів, з використанням інженерного моделювання, на прикладі автомобільного дизеля 4DTNA1. Наведено результати комп'ютерного моделювання процесу заповнення форми і кристалізації сплаву для вдосконаленої технології лиття, результати комп'ютерного моделювання можуть бути використані для вдосконалення процесу заливки, та зменшення кількості дефектів.

Ключові слова: вилівка; кристалізація; фазовий перехід; дефекти газоусадкового характеру; інженерне моделювання; дизель; блок-картер.

DESIGN OF FORECASTING STRUCTURES OF CRANKCASE SECTIONS

O. V. AKIMOV¹, P. S. PENZEV², L. O. SALTIKOV³, O.M. GOROSCHENKO³

¹ Head of the Department of Foundry, Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

² Assistant of the Foundry Department, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

³ Master of the Foundry Department, NTU "KhPI", Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT The goal of this thesis is a scientific basis and the creation of technology design and manufacture of cast parts continuously 4DTNA1 of the generalized solution of engineering problems. The characteristics of the engine, laid down at the design stage, depend on the quality of the cast castor cylinder. In the article the hydrodynamic processes of pouring and crystallization of block-carbide castings of cylinders are investigated, using engineering modeling, on the example of automobile diesel 4DTNA1.

The results of computer simulation of the process of filling the form and crystallization of the alloy for advanced molding technology are presented, computer simulation results can be used to improve the filling process, and to reduce the number of defects.

To achieve this objective processes of manufacture of molded body parts of 4DTNA1 using CALS principles were studied generalized solution of engineering problems, created a mathematical model of engineering simulation molded housing part of engines series 4DTNA1 using the method of finite differences, and, with the help of such software packages as the NovaFlow and SolidWorks was created 3D-model of the input housing with gating system, conducted a computer-integrated manufacturing modeling of foundry processes cast crankcase, analyzed the nature of the metal filling the form, phase transition and the location of the casting defects.

Keywords: casting; phase transition; defects of gas shrinkage nature; engineering modeling; diesel; block carter, SolidWorks, NovaFlow.

Вступ

Створений в ДП «Харківське конструкторське бюро з двигунобудування» автомобільний дизель 4DTNA1 є унікальним продуктом науково-технічних потужностей Харківського регіону в сучасній Україні. Більшість литих деталей для дизелів транспортного та спеціального призначення виготовляється методом лиття, при проектуванні якого, в основу повинні бути закладені технологічні аспекти виготовлення, а саме враховані різні ливарні дефекти. Дані дефекти виникають через відсутність методів та інструментарію для здійснення впливу на технологічні режими виробництва. Від якості литого

блок-картеру циліндрів залежать необхідні характеристики двигуна, закладені на стадії проектування. Удосконалення показників сучасних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), є пріоритетним завданням сучасного двигунобудування. Цю задачу неможливо вирішити без оптимізації конструкції ДВЗ, будь-то двигун як готовий виріб, його вузли або окремі деталі. Однак сама конструкція, якою б досконалою вона не була, не спроможна досягти оптимальних показників ДВЗ, якщо в основу її проектування не закладені технологічні аспекти виготовлення деталей, з яких складаються вузли двигуна. Розрахункові і експериментальні методи визначення конструктивної

міцності, надійності та ресурсу в обов'язковому порядку повинні бути узгоджені з тими закономірностями, які визначають при виготовленні деталей фізичні, фізико-хімічні, теплові і т.п. процеси. В першу чергу це відноситься до питань отримання литих деталей двигунів. Наявність компромісу між проектуванням конструкції деталей і реалізацією технологічного процесу їх виготовлення є визначальним фактором отримання якісних деталей, що забезпечують досягнення заданих експлуатаційних характеристик і надійності ДВЗ. Як показує практика провідних світових виробників ДВЗ, технологічні аспекти повинні бути обов'язково враховані при розробці та застосуванні САПР для двигунів.

Мета

Метою даної роботи є дослідження та вдосконалення гідродинамічних процесів заливки та кристалізації виливки блок-картера циліндрів автомобільного дизеля 4ДТНА1 з використанням інженерного моделювання.

Основний матеріал

Досліджувана деталь для комп'ютерно-інтегрованого моделювання - литий блок-картер дизеля 4ДТНА1 (Рис. 1).

В ІКС SolidWorks була створена 3D-модель виливки блок-картера з технологічною ливниково-живильною системою. Створена нами ливниково-живильна система являє собою систему «звужуючого» типу, яка повинна забезпечити завдяки своїй конструкції правильне і поступове заповнення форми металом щоб уникнути попадання шлакових включень в її порожнину.

Розроблена 3D-модель виливки блок-картера з технологічної литниково-живильної системою дозволила створити кінцево-об'ємну модель виливки і технологічної оснастки, а також виконати інженерне моделювання процесів лиття в ІКС NovaFlow. Для литого блок-картера автомобільного дизеля 4ДТНА1 виконаний аналіз фізичних особливостей процесів заповнення і охолодження виливки у формі, визначені місця розташування і розміри газоусадкових дефектів за критерієм Niyama.

Моделювання та умови

З використанням модуля 3D-імпорту, вбудованого в ІКС NovaFlow, модель блок-картера з ливарно-живильною системою, а також моделлю і кочілем можна конвертувати в звичайно-об'ємну модель. Оптимальні параметри осередків, виходячи з вимог час розрахунку-адекватність результатів:

- розмір осередку - 3,7 мм;
- кількість осередків - 7 672 320 шт.

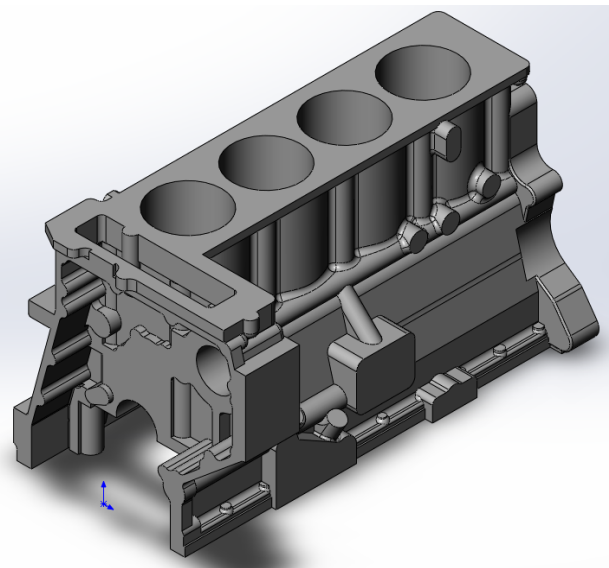


Рис. 1 – Литий блок-картер дизеля 4ДТНА1

Призначення граничних умов для матеріалу елементів виливки і технологічної оснастки проводився шляхом розбиття збірки на окремі частини, кожній з яких надається свій колір:

- матеріал виливки блок-картера – АК5М ДСТУ 2839-94;
- матеріал технологічної оснастки – Сталь 45, СЧ20.
- на формотворчих частинах кочілю нанесена кочільна фарба товщиною – 0,2 мм, яка має теплопровідність $\lambda = 0,3$ Вт/м·К.

Для запобігання попадання вологи на формотворювальну поверхню і високою різницею температур при заливці розплавом, технологічне оснащення попередньо прогрівається до $t=250\div 280$ °С.

Температура розплаву перед заливкою в форму становила – 710 °С.

Аналіз динаміки охолодження виливки, фазового переходу, пов'язаності зон, що кристалізуються останніми, дозволили визначити місця можливої появи дефектів газоусадкового характеру.

Остаточний висновок будується виходячи з аналізу результатів розташування дефектів, виражених в ІКС NovaFlow критерієм Niyama.

Критерієм для визначення місць розташування газоусадкових дефектів і їх величини є Niyama, він використаний нами для передбачення мікропористості і газоусадкової пористості, досить великий для виявлення її методом радіографічного тестування. Цей критерій є надійним провісником пористості для простих відливок, але в разі виливків зі складною геометрією його використання вимагає більш ретельного аналізу результатів моделювання, оскільки багато чинників впливають на утворення газоусадкової пористості.

Аналіз місць розташування дефектів показав, що найбільш схильні до усадочних явищ:

- кромки порожнин циліндрів;
- верхня площина в передній частині блоку, в місцях кріплення під головку;
- масиви бобишек з боків блоку.

Промодельовувати дефекти дозволяють зробити прогноз, що брак литого виробу може становити 5-6 %.

З результатів інженерного моделювання теплових і гідродинамічних процесів лиття блок-картера слідує, що дефекти газоусадкового характеру можуть бути концентраторами напружень в конструктивних елементах деталі, а тому можуть вплинути на характеристики міцності в процесі експлуатації.

Обговорення результатів

Результати проведеного нами аналізу показали, що рух розплаву в формі можна вважати незадовільним.

Аналіз результатів комп'ютерно-інтегрованого моделювання процесу охолодження деталі в технологічній формі (кокілі) проводився відповідно до параметрів:

- перехід з рідкої в тверду фазу в процесі охолодження деталі в форм;
- дефекти газоусадкового характеру, виражені критерієм Niyama.

З результатів інженерного моделювання теплових і гідродинамічних процесів лиття блок-картера слід, що дефекти газоусадкового характеру можуть бути концентраторами напружень в конструктивних елементах деталі, а тому можуть вплинути на характеристики міцності в процесі експлуатації.

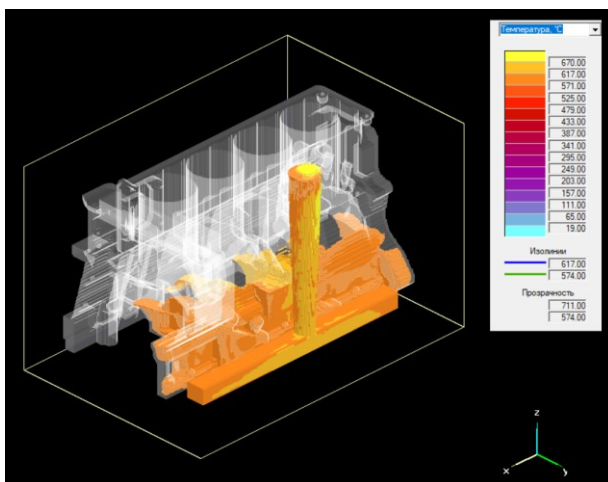


Рис. 2 – Розподіл температур на стадії заливки 25 %

Розроблена 3D-модель виливка блок-картера з технологічною ливарно-живильною системою та результати досліджень дозволили створити кінцево-об'ємну модель виливка і технологічної оснастки, а також виконати інженерне моделювання процесів лиття в ІКС NovaFlow. Для литого блок-картера автомобільного дизеля 4ДТНА1 виконаний аналіз фізичних особливостей процесів заповнення і охолодження виливка у формі, визначені місця розташування і розміри газоусадкових дефектів за критерієм Niyama.

Отримані результати інженерного моделювання та дослідження заповнення форми розплавом, спрямованості кристалізації при охолодженні (перехід від рідкої до твердої фази) і відображенні розташування газоусадкових дефектів та з аналізу результатів розташування дефектів, виражених в ІКС NovaFlow критерієм Niyama [8] підтвердили висновки про необхідність зміни технічних умов її виготовлення. За результатами досліджень були розроблені зміни, спрямовані на стабілізацію характеристик металу, зниженні газоусадкових дефектів, збільшенні швидкості заливки та кристалізації. Розроблено рекомендації щодо зміни конфігурації і рекомендації щодо зміни технічних умов по ливарним дефектів, що виявляється на перегородках і стінках виливка блок-картер.

Отримані результати дослідження та моделювання гідродинамічних процесів заливки та кристалізації модернізованої виливки блок-картера циліндрів автомобільного дизеля 4ДТНА1 з використанням інженерного моделювання представлені графічно на рис. 2-4.

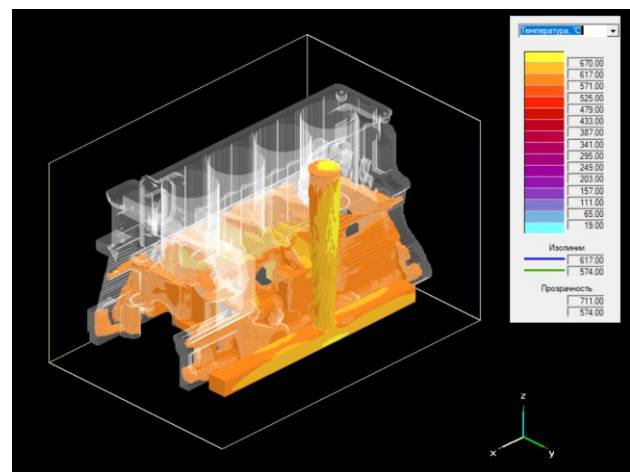


Рис. 3 – Розподіл температур на стадії заливки 50%

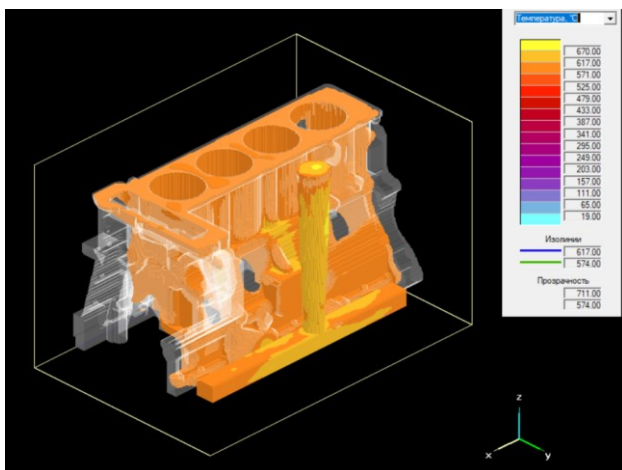


Рис. 4 – Розподіл температур на стадії заливки 100%



Рис. 5 – Стенд для дослідницьких та приймально-здавальних випробувань дизелів серії ДТНА

Висновок

З приведених розрахунків видно, що в центральній зоні блок-картера, найбільш небезпечного місця по НДС, графіт великодисперсний, механічні властивості невисокі [7].

Порівняння результатів динамічних випробувань на моделі підтвердили аналогічну картину.

Порівняльна оцінка блок-картера базового і виготовленого по модернізованій конструкції показує, що в останньому випадку не спостерігається зона залишкових напружень. На основі аналізу отриманої кінцевої моделі можемо стверджувати, що нерівномірний розподіл напружень і їх величина в литому картері є потенційним джерелом зниження функціональної надійності корпусу в процесі експлуатації двигуна.

Список літератури

1. **Акимов, О. В.** Научные основы и методы компьютерно-интегрированного ресурсного проектирования литых блок-картеров ДВС / **О.В. Акимов** // *Научно-технический журнал «Двигатели внутреннего сгорания»*. Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – №1. – С. 120 – 124.
2. **Kim, Woo-Gon.** Long-Term Creep Characterization of Gr. 91 Steel by Modified Creep Constitutive Equations / **Woo-Gon Kim, Sung-Ho Kim, Chan-Block Lee** // *Metals and Materials International*. – 2011. – Vol. 17, № 3. – P. 497-504.
3. Техніко-економічне обґрунтування необхідності державної підтримки у виконанні інноваційно-інвестиційного проекту «Розроблення та впровадження у виробництво малолітражного автомобільного дизеля потужністю 100–175 к.с. подвійного призначення (Слобожанський дизель)» [Текст] : монографія / за ред. **Ф. І. Абрамчука, О. В. Грицюка, І. А. Дмитрієва**. – Харків : ХНАДУ, 2012. – 164 с.
4. **Алехин, В. И.** Расчет влияния дислоцированных литых дефектов усадочного характера на прочность литой детали поршня / **В. И. Алехин, А. В. Белогуб, О. В. Акимов** // *Литейщик России*. – 2011. – №4. – С. 16 – 19.
5. **Mackerle, J.** Creep and creep fracture/damage finite element modelling of engineering materials and structures: An addendum / **J. Mackerle** // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2004. – Vol. 81, № 5. – P. 381-392.
6. Анализ качества литого блок-картера автомобильного дизеля 4ДТНА1 с использованием инженерного моделирования / **П. С. Пензев, В. И. Алёхин, А. В. Грицюк, О. В. Акимов** // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2015. – № 2. – С. 78-82.
7. **Акимов, О. В.** Экспериментальные исследования и компьютерное моделирование материалов для блок-картера ДВС / **О. В. Акимов, А. П. Марченко** // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. —2008. – № 5/1(35).
8. Методика определения показателей дизеля 4ДТНА1 при дорожных испытаниях / **А. В. Грицюк, Ф. И. Абрамчук, А. Н. Врублевский** // *Автомобильный транспорт*. – 2013. – Вып. 33. – С. 44-49.
9. **Алёхин, В. И.** Исследование влияния размеров литых дефектов на напряженно-деформированное состояние поршня / **В. И. Алёхин, А. В. Белогуб, О. В. Акимов** // *Научно-технический журнал «Двигатели внутреннего сгорания»*. Харьков: НТУ «ХПИ». – 2011. – №2. – С. 99 – 103.
10. **Rabotnov, Yu. N.** Creep Problems in Structural Members / **Yu. N. Rabotnov**. – Amsterdam/London: NorthHolland Publishing, 1969. – 822 p
11. Адаптація отечественного автомобильного дизеля 4ДТНА1 к моторному отделению современного грузопассажирского автомобиля / **С. А. Алёхин, А. В. Грицюк, Ф. И. Абрамчук, А. Н. Врублевский, А. А. Мотора, В. П. Струков** // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 7. – С. 70–76.
12. **Алехин, В. И.** Расчет влияния дислоцированных литых дефектов усадочного характера на прочность литой детали поршня / **В. И. Алехин, А. В. Белогуб, О. В. Акимов** // *Литейщик России*. – 2011. – №4. – С. 16 – 19.

13. Выбор и обоснование дополнительных критериев формирования внешней скоростной характеристики автомобильного дизеля / **А. В. Грицюк, А. А. Овчинников** // *Двигатели внутреннего сгорания*. - 2014. - № 1. - С. 109-116.
14. Улучшение технико-экономических показателей высокооборотного дизеля малой мощности путём изменения условий смесеобразования / **С. А. Алёхин, И. А. Краюшкин, С. В. Лыков** // *Авиационно-космическая техника и технология*. - 2008. - № 8. - С. 173-175.
15. **Carlson, K. D.** Prediction of Shrinkage Pore Volume Fraction Using a Dimensionless Niyama Criterion / **K. D. Carlson, C. Beckermann** // *Metallurgical and Materials Transactions A*. - 2009. - V. 40. - № 1. - P. 163-175. - doi.org/10.1007/s11661-008-9715-y.
16. **Cukierski, K.** Flow Control with Local Electromagnetic Braking in Continuous Casting of Steel Slabs / **K. Cukierski, B. G. Thomas** // *Metall and Materi Trans B*. - 2008. - № 39 (94). - doi.org/10.1007/s11663-007-9109-3.
17. **Wondrak, T.** Contactless inductive flow tomography for a model of continuous steel casting / **T. Wondrak, V. Galindo, G. Gerbeth, T. Gundrum, F. Stefani** // *Measurement Science and Technology*. - 2010. - V. 21. - № 4. - doi:10.21303/2461-4262.2016.00220.
18. Анализ технологических факторов, существенно влияющих на формирование напряжений в литых деталях машин / **О. В. Акимов, В. И. Алёхин, П. С. Пензев, А. В. Дяченко, А. М. Овчаренко** // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. - 2015. - № 6(7). - С. 43-47.
6. **Penzev, P. S., Alyohin, V. I., Gricyuk, A. V., Akimov, O. V.** Analiz kachestva litogo blok-kartera avtomobil'nogo dizelya 4DTNA1 s ispol'zovaniem inzhenerного modelirovaniya. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2015, 2, 78-82.
7. **Akimov, O. V., Marchenko, A. P.** EHksperimental'nye issledovaniya i komp'yuternoe modelirovanie materialov dlya blok-kartera DVS. *Skhidno-Yevropejs'kij zhurnal peredovih tekhnologij*, 2008, 5/1(35).
8. **Gricyuk, A. V., Abramchuk, F. I., Vrublevskij, A. N.** Metodika opredeleniya pokazatelej dizelya 4DTNA1 pri dorozhnyh ispytaniyah. *Avtomobil'nyj transport*, 2013, 33, 44-49.
9. **Alyohin, V. I., Belogub, A. V., Akimov, O. V.** Issledovanie vliyaniya razmerov litejnyh defektov na napryazhenno-deformirovanное sostoyanie porshnya. *Nauchno tekhnicheskij zhurnal «Dvigateli vnutren- nego sgoraniya»*. Har'kov: NTU «HPI», 2011, 2, 99 – 103.
10. **Rabotnov, Yu. N.** Creep Problems in Structural Members. Amsterdam/London: NorthHolland Publishing, 1969, 822 p.
11. **Alyohin, S. A., Gricyuk, A. V., Abramchuk, F. I., Vrublevskij, A. N., Motora, A. A., Strukov, V. P.** Adaptaciya otechestvenного avtomobil'nogo dizelya 4DTNA1 k motornomu otdeleniyu sovremenного грузopassazhirского avtomobilya. *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2014, 7, 70–76.
12. **Alekhin, V. I., Belogub, A. V., Akimov, O. V.** Raschet vliyaniya dislocirovannyh litejnyh defektov usadochnого haraktera na prochnost' litoj detali porshnya. *Litejshchik Rossii*, 2011, 4, 16 – 19.
13. **Gricyuk, A. V., Ovchinnikov, A. A.** Vybor i obosnovanie dopolnitel'nyh kriteriev formirovaniya vneshnej skorostnoj harakteristiki avtomobil'nogo dizelya. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2014, 1, 109-116.
14. **Alyohin, S. A., Krayushkin, I. A., Lykov, S. V.** Uluchshenie tekhniko-ehkonomicheskikh pokazatelej vysokooborotного dizelya maloj moshchnosti putyom izmeneniya uslovij smeseobrazovaniya. *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, 8, 173-175.
15. **Carlson, K. D., Beckermann, C.** Prediction of Shrinkage Pore Volume Fraction Using a Dimensionless Niyama Criterion. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009, 40, 1, 163-175, doi.org/10.1007/s11661-008-9715-y.
16. **Cukierski, K., Thomas, B. G.** Flow Control with Local Electromagnetic Braking in Continuous Casting of Steel Slabs. *Metall and Materi Trans B*, 2008, 39 (94), doi.org/10.1007/s11663-007-9109-3.
17. **Wondrak, T., Galindo, V., Gerbeth, G., Gundrum, T., Stefani, F.** Contactless inductive flow tomography for a model of continuous steel casting. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21, 4, doi:10.21303/2461-4262.2016.00220.
18. **Akimov, O. V., Alyohin, V. I., Penzev, P. S., Dyachenko, A. V., Ovcharenko, A. M.** Analiz tekhnologicheskikh faktorov, sushchestvenно vliyayushchih na formirovanie napryazhenij v lityh detalayah mashin. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij*, 2015, 6(7), 43-47.

Bibliography (transliterated)

1. **Akimov, O. V.** Nauchnye osnovy i metody komp'yuterno-integrirоvannого resursного proektirovaniya lityh blok-karterov DVS. *Nauchno-tekhnicheskij zhurnal «Dvigateli vnutrennego sgoraniya»*. Har'kov: NTU «HPI», 2008, 1, 120 – 124.
2. **Kim, Woo-Gon, Sung-Ho, Kim, Chan-Block, Lee.** Long-Term Creep Characterization of Gr. 91 Steel by Modified Creep Constitutive Equations. *Metals and Materials International*, 2011, 17, № 3, 497-504.
3. Tekhniko-ekonomichne obruntuvannya neobhidnosti derzhavnoi pidtrimki u vikonanni innovacijno-investicijnого proektu «Rozroblennya ta vprovadzhennya u virobniцtvo malolitrazhного avtomobil'nого dizelya potuzhnisty 100–175 k.s. podvijного priznachennya (Slobozhans'kij dizel')» [Tekst] : monografiya / za red. **F. I. Abramchuka, O. V. Gricyuka, I. A. Dmitrieva**, Harkiv : HNADU, 2012, 164.
4. **Alekhin, V. I., Belogub, A. V., Akimov, O. V.** Raschet vliyaniya dislocirovannyh litejnyh defektov usadochnого haraktera na prochnost' litoj detali porshnya. *Litejshchik Rossii*, 2011, 4, 16 – 19.
5. **Mackerle, J.** Creep and creep fracture/damage finite element modelling of engineering materials and structures: An addendum. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2004, 81, № 5, 381- 392.

Сведения об авторах (About authors)

Акімов Олег Вікторович – завідуючий, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Oleg Akimov – head, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Kyrychova str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Пензев Павло Сергійович – асистент, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Pavlo Penzev – assistant, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Kuryuchova str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Салтиков Леонід Олександрович – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Leonid Saltikov – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Kuryuchova str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Горощенко Олександр Миколайович – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Olexandr Goroschenko – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Kuryuchova str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Акімов, О. В. Проектування прогнозуємих структур перерізів виливка блок-картера циліндрів / **О. В. Акімов, П. С. Пензев, Л. О. Салтиков, О. М. Горощенко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 3-8. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.01.

Please cite this article as:

Akimov, O. V., Penzev, P. S., Saltikov, L. O., Goroschenko, O. M. Designing of predictable cross-sectional casting structures of block-crankcase cylinders. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 16 (1292), 3-8, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.01.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Акімов, О. В. Проектирование прогнозируемой структур сечений отливки блок-картера цилиндров / **О. В. Акімов, П. С. Пензев, Л. А. Салтиков, О. Н. Горощенко** / *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 3-8. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.01.

АННОТАЦИЯ В статье исследованы гидродинамические процессы заливки и кристаллизации отливки блок-картера цилиндров с использованием инженерного моделирования на примере автомобильного дизеля 4ДТНА1. Приведены результаты компьютерного моделирования процесса заполнения формы и кристаллизации сплава для усовершенствованной технологии литья, результаты компьютерного моделирования могут быть использованы для усовершенствования процесса заливки и уменьшения числа дефектов.

Ключевые слова: отливка; кристаллизация; фазовый переход; дефекты газоусадочного характера; инженерное моделирование; дизель; блок-картер.

Поступила (received) 02.05.2018

УДК 622:658.012.011.56

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.02

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГОЛОВНИХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

О. В. БОРИЧЕНКО^{1*}, А. В. ЧЕРНЯВСЬКИЙ¹, Ю. Ю. ОСТАПЧУК¹

¹ кафедра електропостачання, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА
*email: borichenko_olena@ukr.net

АНОТАЦІЯ Дана стаття присвячена аналізу доцільності використання методу головних компонент для формування математичної моделі електроспоживання карусельної сушарки з метою оцінювання рівня енергоефективності. В результаті застосування методу головних компонент визначено чинники, які мають найбільший вплив на споживання електроенергії. Точність сформованих регресійних моделей електроспоживання оцінювалась на основі визначення середньої відносної похибки, середньоквадратичної похибки та коефіцієнта варіації.

Ключові слова: метод головних компонент; регресійний аналіз; математична модель; споживання електроенергії; базовий рівень енергоефективності

APPLICATION OF PRINCIPAL COMPONENTS METHOD FOR EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY LEVEL

O. BORYCHENKO^{1*}, A. CHERNIAVSKIY¹, Y. OSTAPCHUK¹

¹ Department of Power Supply, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT This article is devoted to the analysis of the feasibility of using the method of the main components for the assessment and control of the level of achieved energy efficiency at the enterprise. For quantify the level of achieved energy efficiency are used energy efficiency indicators and a baseline of energy consumption is established to compare energy efficiency values over a long period of time and quantify changes in the level of achieved energy efficiency. The following methods were used to solve this problem: the method of regression analysis and the principal components method. As a research object the carousel dryer of the malt shop of the enterprise was taken. Accuracy of forecasting electricity consumption the object of research requires analysis of internal production factors. Factors whose parameters can be determined during the period of the carousel dryer are selected. According to the expert estimation method, experts and technical staff of the enterprise were interviewed, as a result of which factors outlining factors that could affect the consumption of electricity during the work of the carousel dryer were identified. After analyzing the application of the above-mentioned methods, it is proved that the mathematical model of the baseline energy consumption for a round-bottomed dryer of the malt shop is more accurate in the case of its construction by the principal components method than by the regression analysis. The accuracy of the received mathematical models of baseline power consumption levels is estimated on the basis of the calculation of the average relative error, the mean square error and the variation coefficient. In addition, it is more appropriate to use the principal components method to determine the most significant factors affecting the consumption of electric power of the carousel dryer when setting its baseline energy efficiency.

Keywords: the principal components method; regression analysis; mathematical model; electricity consumption; baseline energy efficiency

Вступ

Вдосконалення системи управління споживання електроенергії сприяє підвищенню ефективності енерговикористання. На підприємстві з виробництва алкогольних та безалкогольних напоїв існує необхідність вдосконалення методів аналізу, оцінювання та управління процесами споживання електроенергії для зменшення рівня нераціонального енерговикористання.

З числа відомих методів для вирішення задачі було обрано наступні методи: метод регресійного аналізу та метод головних компонент. В якості об'єкта дослідження взято карусельну сушарку солодового цеху підприємства. Так як, проаналізувавши результат розрахунку обсягів споживання

електричної енергії споживачами солодового цеху, було встановлено, що вентиляторні установки основного технологічного устаткування цеху споживають значний обсяг електричної енергії, і тому в даній статті пропонується для оцінювання та контролю рівня енергоефективності використовувати вентилятор карусельної сушарки.

Точність прогнозування споживання електроенергії об'єктом дослідження вимагає аналізу внутрішніх виробничих чинників. Як показало дослідження, може бути значна кількість чинників, які впливають на електроспоживання об'єкта дослідження [1]. Існує необхідність визначення наявності лінійної залежності між чинниками в регресійній моделі з метою уникнення зміщення оцінок параметрів моделі, збільшення коваріації

оцінок та незначущості параметрів моделі. Необхідно визначити найбільш інформативні чинники, які слід включити в математичну модель.

Згідно чинного національного стандарту України ДСТУ ISO 50006:2016 "Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання рівня досягнутої енергоефективності з використанням базових рівнів енергоспоживання та показників енергоефективності. Загальні положення та настанови" (ISO 50006:2014, IDT) для кількісної оцінки рівня досягнутої енергоефективності застосовують показники енергоефективності. Базовий рівень енергоспоживання застосовується для порівняння значень енергоефективності протягом тривалого часу та кількісного оцінювання змін в рівні досягнутої енергоефективності. Для здійснення оцінки рівня енергоефективності традиційно використовується регресійний аналіз [2].

Аналіз можливості застосування методу головних компонент для формування математичної моделі процесу електроспоживання представлено в роботах [1; 3; 4].

Мета роботи

Метою роботи є аналіз доцільності використання регресійного аналізу та методу головних компонент для оцінювання та контролю рівня досягнутої енергоефективності на підприємстві.

Викладення основного матеріалу

Для вирішення задачі відбору інформативних чинників необхідно визначити такі, які не несуть корисної інформації в контексті вирішення поставленої задачі. До розгляду було обрано чинники, параметри яких можна визначити в період роботи карусельної сушарки. За методом експертних оцінок було опитано фахівців та технічних працівників підприємства, в результаті чого з перелічених показників визначено чинники, які можуть впливати на споживання електроенергії в процесі роботи карусельної сушарки, а саме: продуктивність сушарки (т/добу); продуктивність вентилятора (м³/год); вологість зеленого солоду (%); вологість готового солоду (%); відносна вологість зовнішнього повітря (%); температура солоду на вході в сушарку (0С); температура солоду на виході з сушарки (0С); зовнішня температура повітря (0С); атмосферний тиск (мм. рт. ст.); тиск пари на вході в калорифер (кгс/м²); швидкість пари на вході в калорифер (м/с); статистичний тиск пари на вході у вентилятор (мм. вод. ст.); статистичний тиск пари на виході з вентилятора (мм. вод. ст.). В результаті аналізу отриманих значень показників, з дослідження було вилучено чинники, значення яких є постійними.

Для проведення аналізу запропонованими методами дослідження було обрано наступні чинники впливу:

- x_1 – продуктивність сушарки (т/добу);
- x_2 – продуктивність вентилятора (м³/год);
- x_3 – вологість зеленого солоду (%);
- x_4 – відносна вологість зовнішнього повітря (%);
- x_5 – температура солоду на вході в сушарку (0С);
- x_6 – зовнішня температура повітря (0С);
- x_7 – атмосферний тиск (мм. рт. ст.);
- x_8 – статистичний тиск пари на вході у вентилятор (мм. вод. ст.).

Обсяг вибірки - 30 спостережень.

При проведенні аналізу зв'язку між явищами широко застосовується кореляційний та регресійний аналізи. Кореляційний аналіз полягає у визначенні ступеню зв'язку між величинами. Коефіцієнт парної кореляції – це міра тісноти лінійного зв'язку між двома змінними, який оцінюється за вибіркою з n пов'язаних пар спостережень із загальної сукупності x_i та y [5]. Обрані чинники було оброблено в програмному забезпеченні MS Excel пакет "Аналіз даних". В табл. 1 наведено результати кореляційного аналізу.

Таблиця 1 – Результати кореляційного аналізу чинників

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
X1	1	0,99	-0,23	-0,33	0,10	0,07	0,46	-0,14
X2	0,99	1	-0,19	-0,35	0,06	0,03	0,47	-0,08
X3	-0,23	-0,19	1	0,42	-0,6	-0,55	-0,46	0,44
X4	-0,33	-0,35	0,42	1	-0,18	-0,05	-0,68	0,01
X5	0,1	0,06	-0,6	-0,18	1	0,95	0,36	-0,52
X6	0,07	0,03	-0,55	-0,05	0,95	1	0,20	-0,54
X7	0,46	0,47	-0,46	-0,68	0,36	0,2	1	-0,12
X8	-0,14	-0,08	0,44	0,01	-0,52	-0,54	-0,12	1

Для оцінювання мультиколінеарності чинників необхідно обчислити визначник кореляційної матриці:

$$\det(r_{xx}) = \begin{vmatrix} r_{x_1x_1} & r_{x_1x_2} & \dots & r_{x_1x_8} \\ r_{x_2x_1} & r_{x_2x_2} & \dots & r_{x_2x_8} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{x_8x_1} & r_{x_8x_2} & \dots & r_{x_8x_8} \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

Визначник матриці дорівнює нулю. Отриманий результат вказує на повну лінійну залежність та мультиколінеарність чинників.

Обговорення результатів

Застосування регресійного аналізу.

Загальний вигляд початкової регресійної моделі:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + a_7x_7 + a_8x_8, (2)$$

де a_0 – вільний член рівняння, який не залежить від чинників x_i ; a_1, \dots, a_8 – коефіцієнти регресії; x_1, \dots, x_8 – факторні показники.

На рис. 1 представлено результати розрахунку регресійного аналізу.

Выводы итогов					
Регрессионная статистика					
Множественный R	0,999236077				
R-квадрат	0,998472738				
Нормированный R-квадрат	0,998296515				
Стандартная ошибка	4,832059697				
Наблюдения	30				
Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	3	396881,2623	132293,7541	5665,976365	1,02851E-36
Остаток	26	607,0688237	23,34880091		
Итого	29	397488,3311			
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%
Y-пересечение	224,5855066	34,93328318	6,428983658	8,21748E-07	152,7791154
X2	0,024218209	0,000200436	120,8279311	2,74723E-37	0,023806208
X3	-1,812889371	0,576327945	-3,145586443	0,004121517	-2,997548417
X6	-12,36301149	0,327410458	-37,75997742	3,04596E-24	-13,03601331
			Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
			296,3918979	152,7791154	296,3918979
			0,02463021	0,023806208	0,02463021
			-0,628230325	-2,997548417	-0,628230325
			-11,69000966	-13,03601331	-11,69000966

Рис. 1 – Результат виконання регресійного аналізу

В результаті застосування регресійного аналізу визначено чинники, які найбільш суттєво впливають на споживання електроенергії карусельної сушарки, а саме: продуктивність вентилятора (x_2), вологість зеленого солоду (x_3) та зовнішня температура повітря (x_6). З отриманих результатів регресійна модель має наступний загальний вигляд:

$$y = 224,58 + 0,02x_2 - 1,81x_3 - 12,36x_6.$$

На рис. 2 представлено порівняння отриманої базової лінії електроспоживання та фактичного споживання електроенергії карусельної сушарки.

На рис. 2 видно, що побудована базова лінія електроспоживання та фактичне споживання електроенергії карусельної сушарки практично співпадають.

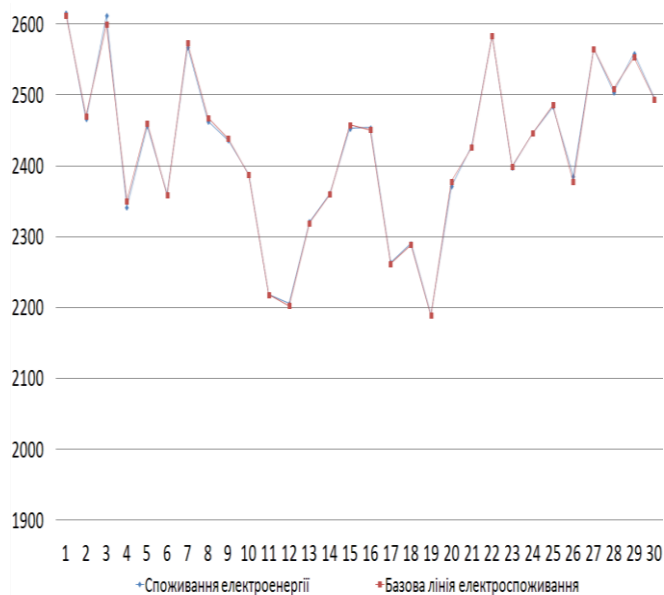


Рис. 2 – Порівняння отриманих результатів

Застосування методу головних компонент.

При виконанні аналізу даних існує необхідність створення спрощеної моделі, яка повинна максимально точно описувати вихідні дані. Досить часто чинники мають значну залежність один від одного та їх одночасна наявність є надлишковою. Деякі ознаки/фактори мають неявну залежність. Знаючи залежності та їх силу за допомогою методу головних компонент можна виразити декілька чинників через один, тобто об'єднати, і працювати з більш простою моделлю. Уникнути втрати інформації при цьому неможливо, але метод головних компонент надає можливість їх мінімізувати. Даний метод апроксимує n-мірний простір («хмару») спостережень до еліпсоїда, піввісі якого будуть майбутніми головними компонентами і при проекції на такі осі (зменшення розмірності) зберігається найбільша кількість інформації [6].

Метод головних компонент заснований на конструюванні чинників (як метод відбору інформативних ознак). Головна ідея методу полягає в об'єднанні декількох корельованих змінних в одну, яка представлятиме собою лінійну комбінацію вихідних змінних. Метою методу є дослідження внутрішньої структури досліджуваної системи величин, "стиснення" цієї системи без істотної втрати інформації шляхом виявлення

невеликого числа чинників, які пояснюють мінливість і взаємозв'язок величин [6, 7].

Для виконання розрахунків застосовується програмне забезпечення STATISTICA.

При формуванні моделі для карусельної сушарки солодового цеху методом головних компонент, програмою автоматично було визначено оптимальну кількість головних компонент, а саме: PC1, PC2 та PC3. Отримані головні компоненти є фіктивними, тобто такими, що не мають фізичної реалізації, однак надають можливість об'єднувати декілька реальних кореляційно пов'язаних чинників в один. Інформацію про головні компоненти наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати опису головних компонент

Component	Principal Components Analysis Summary (KC-45)					
	R ² X	R ² X (Cumul.)	Eigen-values	Q ²	Limit	Q ² (Cumul.)
Number of components is 3 83,9182% of sum of squares has been explained by all the extracted components.						
1	0,43	0,43	3,44	0,16	0,16	0,16
2	0,27	0,7	2,18	0,22	0,17	0,34
3	0,14	0,84	1,09	0,24	0,2	0,5

В результаті застосування методу головних компонент визначено чинник, який має найбільший вплив на споживання електроенергії карусельної сушарки, а саме: продуктивність сушарки (x_1).

Значення власних векторів кореляційної матриці представлено в табл. 3.

Таблиця 3 – Розрахунок векторів кореляційної матриці

Variable	Eigenvector spreadsheet (KC-45)			
	Variable number	Component 1	Component 2	Component 3
x_1	1	-0,32	0,45	0,43
x_2	2	-0,3	0,48	0,4
x_3	3	0,42	0,15	0,21
x_4	4	0,3	-0,28	0,58
x_5	5	-0,41	-0,37	0,01
x_6	6	-0,37	-0,42	0,13
x_7	7	-0,38	0,25	-0,38
x_8	8	0,29	0,31	-0,32

Оскільки головні компоненти ортогональні, видалення останніх двох компонент не призводить

до змін власних векторів першої головної компоненти (PC1). Отримаємо математичну модель першої головної компоненти:

$$PC_1 = -0,317Z_1 - 0,301Z_2 + 0,416Z_3 + 0,304Z_4 - 0,412Z_5 - 0,374Z_6 - 0,384Z_7 + 0,294Z_8,$$

де $Z_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma_i}$ – стандартизоване значення

змінних x_i , \bar{x}_i – середнє значення змінних, σ_i – середньоквадратичне відхилення.

На рис. 3 представлено графік власних значень головних компонент.

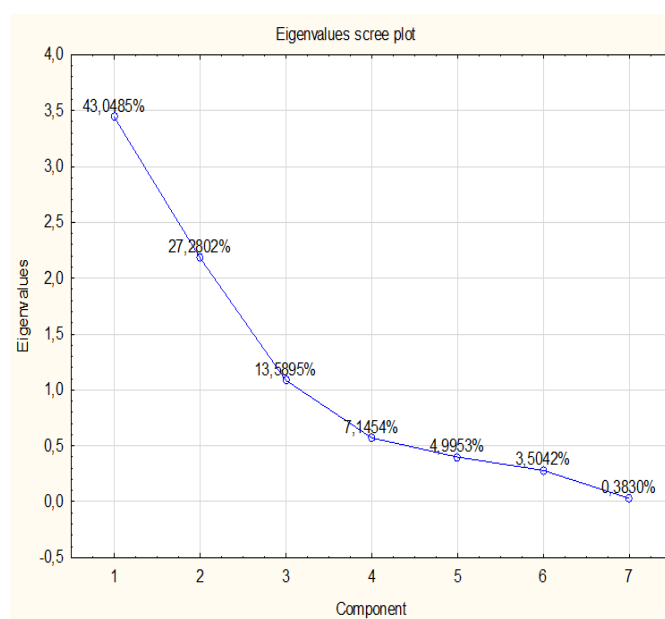


Рис. 3 – Власні значення головних компонент

Отже, перше власне значення першої головної компоненти охоплює 43,05 % мінливості даних. Однак ця тенденція зменшується в міру додавання до моделі додаткових компонент.

Виконаємо аналіз залежності споживання електроенергії від продуктивності сушарки. В результаті виконання аналогічних розрахунків, математична модель матиме вигляд:

$$y = 0,68 + 0,315Z_1 - 0,023Z_2 - 0,313Z_3 - 0,132Z_4 + 0,347Z_5 - 0,357Z_6 - 0,238Z_7 + 0,138Z_8.$$

На рис. 4 представлено результати в графічному вигляді.

На рис. 5 наведено графік порівняння спрогнозованих значень споживання електричної енергії за регресійним аналізом та методом головних компонент з фактичним

електроспоживанням карусельної сушарки за наступний період.

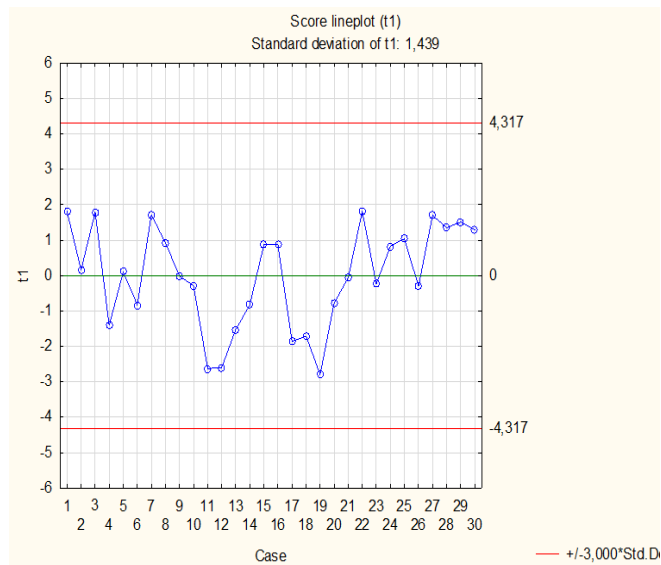


Рис. 4 – Залежність споживання електроенергії від продуктивності сушарки

Оцінювання точності побудованих математичних моделей може бути проведено за такими показниками:

- *MAPE* (mean absolute percentage error) середня відносна похибка:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|W_{act} - W_{mod}|}{W_{act}} \cdot 100\%; \quad (3)$$

- *PMSE* (root mean squared error) середньоквадратична похибка:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_{act} - W_{mod})^2}; \quad (4)$$

- *CV* (coefficient of variation) коефіцієнт варіації:

$$CV = \frac{RMSE}{\bar{W}_{act}}, \quad (5)$$

де W_{act} – фактична витрата електроенергії; W_{mod} – спрогнозована витрата електроенергії за таким же набором чинників впливу; \bar{W}_{act} – середнє значення фактичної витрати електроенергії; n – обсяг вибірки [1].

Отримані результати зведено в табл. 4.

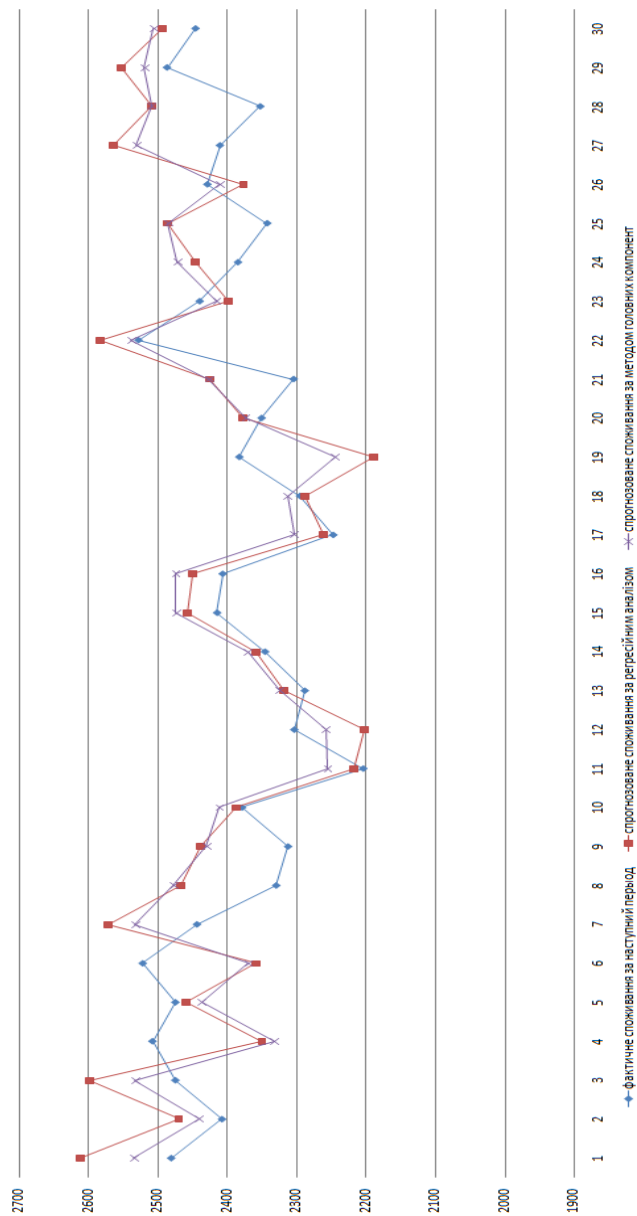


Рис. 5 – Порівняння фактичних та спрогнозованих значень споживання електроенергії

Таблиця 4 – Порівняння точності отриманих математичних моделей

Назва методу	MAPE, %	PMSE, кВт·год	CV
Регресійний аналіз	3,40	99,43	0,042
Метод головних компонент	3,06	88,17	0,037

Висновки

Результати аналізу застосування зазначених методів дали змогу оцінити, що математична модель базового рівня енергоспоживання для карусельної

сушарки солодового цеху більш точна у випадку її побудови за методом головних компонент, ніж за регресійним аналізом. Точність отриманих математичних моделей базових рівнів електроспоживання була оцінена на основі розрахунку середньої відносної похибки, середньоквадратичної похибки та коефіцієнта варіації. Крім того, більш доцільно застосовувати метод головних компонент для визначення найбільш суттєвих чинників, які впливають на обсяги споживання електроенергії карусельної сушарки, при встановленні її базового рівня енергоспоживання.

Список літератури

1. **Комяков, А. А.** Применение метода главных компонент для формирования математической модели процесса электропотребления на железнодорожном транспорте / **А. А. Комяков** // *Машиностроение: сетевой электронный журнал*. – 2016. – № 3. – С. 27-31.
2. Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання рівня досягнутої енергоефективності з використанням базових рівнів енергоспоживання та показників енергоефективності. Загальні положення і настанова» : DSTU ISO 50006:2014, IDT — DSTU ISO 50006:2016. — [Чинний від 2016-04-29]. — К. : Держспоживстандарт України, 2016. — 56 с. — (Національні стандарти України).
3. **Кендюхов, А. В.** Использование метода главных компонент для оценки конкурентоспособности машиностроительных предприятий / **А. В. Кендюхов, Д. О. Толкачѳ** // *Маркетинг и менеджмент инноваций*. – 2013. – № 4. – С. 219-225. URL: <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua>.
4. **Кузнецов, В. Г.** Прогнозирование месячных расходов электроэнергии электрифицированных участков на основе метода выделения главных компонент ряда / **В. Г. Кузнецов** // *Вестник Приазовского государственного технического университета*. – 2013. – Вып. 26. – С. 216-220.
5. **Тихонов, Э. Е.** Методы прогнозирования в условиях рынка : [учебн. пос.] / **Э. Е. Тихонов**. – Невинномыск : Северо-Кавказский государственный технический университет, 2006. – 221 с.
6. **Калинина, В. Н.** Введение в многомерный статистический анализ: [учебн. пос.] / **В. Н. Калинина, В. И. Соловьев**. – М. : ГУУ, 2003. – 66 с.
7. Principal Component Analysis (PCA) and Partial Least Squares (PLS) Technical Notes // *STATISTICA Help*. URL: <http://documentation.statsoft.com>.

Bibliography (transliterated)

1. **Komyakov, A. A.** Primenenie metoda glavnykh komponent dlya formirovaniya matematicheskoy modeli protsessa elektropotrebleniya na zheleznodorozhnom transporte. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy zhurnal*, 2016, 3, 27-31.
2. Systemy enerhetychnoho menedzhmentu. Vymiriuvannia rivnia dosiahnutoi enerhoefektyvnosti z vykorystanniam bazovykh rivniv enerhospozhyvannia ta pokaznykiv enerhoefektyvnosti. *Zahalni polozhennia i nastanova* : DSTU ISO 50006:2014, IDT — DSTU ISO 50006:2016. [Chynnyi vid 2016-04-29]. K. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2016, 56. (Natsionalni standarty Ukrainy).
3. **Kenduyhov, A. V., Tolkachyov, D. O.** Ispolzovanie metoda glavnykh komponent dlya otsenki konkurentosposobnosti mashinostroitelnykh predpriyatiy [Applied electronics]. *Marketing i menedzhment innovatsiy*, 2013, 4, 219-225. Available at: <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua>.
4. **Kuznetsov, V. G.** Prognozirovaniye mesyachnykh rashodov elektroenergii elektrifitsirovannykh uchastkov na osnove metoda vyideleniya glavnykh komponent ryada. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*, 2013, 26, 216-220.
5. **Tihonov, E. E.** Metody prognozirovaniya v usloviyakh ryinka : [uchebn. pos.]. Nevinnomysk : Publishing house Severo-Kavkazskiy gosudarstvennyy tehnikeskyy universitet, 2006, 221.
6. **Kalinina, V. N., Solovev, V. I.** Vvedeniye v mnogomernyy statisticheskiy analiz: [uchebn. pos.]. M. : Publishing house UU, 2003, 66.
7. Principal Component Analysis (PCA) and Partial Least Squares (PLS) Technical Notes [Applied electronics]. *STATISTICA Help*. Available at: <http://documentation.statsoft.com>.

Сведения об авторах (About authors)

Бориченко Олена Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри електропостачання; м. Київ, Україна; e-mail: borichenko_olena@ukr.net.

Olena Borychenko – Ph. D., Docent, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Docent of Department of Power Supply, Kyiv, Ukraine, e-mail: borichenko_olena@ukr.net.

Чернявський Анатолій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри електропостачання; м. Київ, Україна; e-mail: canatoliy1976@gmail.com.

Anatolii Cherniavskiy – Ph. D., Docent, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Docent of Department of Power Supply, Kyiv, Ukraine, e-mail: canatoliy1976@gmail.com.

Остачук Юлія Юрївна – магістрант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», магістрант кафедри електропостачання; м. Київ, Україна; e-mail: julyoss333@gmail.com.

Yuliia Ostapchuyk – master's degree, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, master's degree of Department of Power Supply, Kyiv, Ukraine, e-mail: julyoss333@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Бориченко, О. В. Застосування методу головних компонент для оцінювання рівня енергоефективності / **О. В. Бориченко, А. В. Чернявський, Ю. Ю. Остапчук** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ» Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2018. – № 16 (1292). – С. 9-15. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.02.

Please cite this article as:

Borychenko, O., Cherniavskiy, A., Ostapchuk, Y. Application of principal components method for evaluation of energy efficiency level. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 9-15 doi:10.20998/2413-4295.2018.16.02.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Бориченко, Е. В. Применение метода главных компонент для оценки уровня энергоэффективности / **Е. В. Бориченко, А. В. Чернявский, Ю. Ю. Остапчук** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018 – № 16 (1292). – С. 9-15. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.02.

АННОТАЦИЯ Данная статья посвящена анализу целесообразности использования метода главных компонент для формирования математической модели электропотребления карусельной сушилки для оценки уровня энергоэффективности. В результате применения метода главных компонент определены факторы, которые оказывают наибольшее влияние на потребление электроэнергии. Точность сложившихся регрессионных моделей электропотребления оценивалась на основе определения средней относительной погрешности, среднеквадратической погрешности и коэффициента вариации.

Ключевые слова: метод главных компонент; регрессионный анализ; математическая модель; потребление электроэнергии; базовый уровень энергоэффективности

Поступила (received) 04.05.2018

УДК 621.9.06

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.03

ОСНОВНІ ОСОБЛИВОСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ РОЗМІРІВ КООРДИНОВАНИХ ОТВОРІВ ПРИ РІЗНИХ ВИДАХ ОБРОБКИ

В. М. БУРДЕЙНА, С. М. АРТЮХ

кафедра Охорони праці, стандартизації та сертифікації, УІПА, Харків, УКРАЇНА

АНОТАЦІЯ Визначена функціональна залежність розмірів полів розсіювання від бази і позиційних відхилень осей з урахуванням питомих факторів. Розглянуто запропоновані залежності для визначення полів розсіювання розміру від бази і позиційного відхилення при обробці отворів в системах без спрямування ріжучого інструменту. Розглянуті статистичні характеристики розподілу процесу обробки отворів свердлінням в системах без спрямування від базової поверхні до осі отвору і розташування осей отворів. Запропоновані нормативні данні для розробки проекту стандарту забезпечення якості взаємозамінності розмірів координованих отворів.

Ключові слова: відхилення; характеристика; координовані отвори; взаємозамінність; фактор; ріжучий інструмент.

THE MAIN FEATURES OF OPTIMIZING THE SIZES OF COORDINATED HOLES FOR DIFFERENT TYPES OF PROCESSING

V. BURDEINA, S. ARTYUH

Department of labor protection, standardization and certification, UIPA, Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT The functional dependence of the size of the scattering fields on the basis and the positional deviations of the axes, taking into account the specific factors, is determined. The proposed dependences are considered for determining the fields of dispersion of size from the base and the positional deviation in the processing of openings in systems without the direction of the cutting tool. The statistical characteristics of the distribution of the process of hole drilling in systems without reference from the base surface to the axis of the opening and the location of the axes of the holes are considered. Proposed regulatory data for the development of a draft standard for quality assurance of interchangeability of the sizes of coordinated holes. For the visibility of the quality of ensuring the accuracy of coordinated holes, using the proposed dependencies, graphs of the change of scattering fields are constructed, taking into account the dependence on the elements of the instrument's tooling. The fields of dispersion of small diameter aperture processing are presented taking into account such factors as the diameters of the cutting tool, the length of the tool departure and for different hardness of the material in the form of tables to fully reflect the quality of the normative provision of production at the design stage. The tables with the reference material have been constructed to ensure the quality of the interchangeability of the coordinated holes and the main design standard. The change in diameters does not lead to a significant increase in stray field.

Keywords: deviation; characteristic; coordinated holes; interchangeability; factor; tool

Вступ

На сучасному етапі розвитку машинобудування показники якості виробів тісно пов'язані з точністю обробки деталей, оскільки отримані розміри, форма і розташування елементарних поверхонь визначають фактичні зазори і натяг в з'єднаннях, а, отже, не тільки технічні параметри, а й такі характеристики як надійність і довговічність.

Визначення загальної похибки обробки машинобудівних деталей, показала, що вона обумовлена дією великого числа факторів технологічного процесу, що проявляється у вигляді певної кількості відхилень параметрів деталей від допустимих величин, які можуть бути спостережувані на окремих проміжках процесу.

Дослідженнями, виконаними для багатопозиційних верстатів [1], було встановлено, що точність координованих розмірів між робочою отворами з урахуванням позиційного відхилення їх осей забезпечується не завжди. Крім того, іншими

дослідниками [2-4] констатується, що, незважаючи на значний досвід, накопичений в результаті досліджень технологічних процесів автоматизованого виробництва, питання технологічного забезпечення, якості їх роботи вивчені ще не в повній мірі. Відсутня також у проєктувальників нормативно - технічна документація, що встановлює взаємозв'язок між точносних характеристиками оброблюваних заготовок і точносних параметрами елементів оснащення верстатів, які забезпечують ці характеристики [5-6]. Тому з підвищенням вимог до точності координат і позиційних допусків осей отворів в оброблюваних заготовках виникає необхідність вже на стадії проєктування металорізального обладнання обґрунтовано застосовувати різні конструкції багатопиндельних насадок (коробок), кондукторів та пристроїв [7-8]. Особливу значущість проблема науково обґрунтованої регламентації точносних параметрів елементів технологічного оснащення набуває при створенні переналаджуваної обладнання, оскільки,

в основному, в точностних параметрах технологічного оснащення трансформуються похибки всієї технологічної системи [9].

Мета роботи

Визначення особливостей проведення планування експерименту для пошуку оптимальних умов при виготовленні отворів з використанням різних матеріалів. Визначення та аналіз залежностей для практичних полів розсіювання розмірів від бази і позиційних відхилень осей координованих розмірів отворів при різних видах обробки.

Оптимізація координованих розмірів отворів.

Як зазначалось раніше при різних видах обробки для проведення повного факторного експерименту прийняті основні фактори [10-11], що впливають на точність координованих розмірів: d_n - діаметр оброблюваного отвору, мм; HB - твердість оброблюваного матеріалу, МПа; ℓ_i - виліт інструменту за торець шпинделя, мм.

Точність обробки оцінювалася полями розсіювання розмірів від бази (ω_v) і позиційних відхилень осей отворів (ω_o).

Для простоти дослідження у загальному вигляді була прийнята наступна функціональна залежність для визначення практичних полів розсіювання розмірів від бази і позиційних відхилень:

$$\omega_{v,o} = f(d_n, HB, \ell_n) \quad (1)$$

Під час проведення експерименту оброблялися заготовки зі сталі 45, СЧ 15 і алюмінієвого сплаву Ал 9, ріжучим інструментом служили свердла $\varnothing 1$ мм, $\varnothing 2$ мм і $\varnothing 3$ мм короткої та середньої серії довжин. Товщина заготовки (в при дослідженнях будемо мати на увазі - довжину оброблюваного отвору) приймалася такою, що б виконувалася умова $\ell \setminus d > 3$ (де ℓ і d відповідно довжина і діаметр отвору). Результати вимірювань позиційних відхилень приводились відповідно до базової довжини $\ell = 10$ мм. Обсяг випробувань приймався рівним $N = 50$ шт у кожній точці плану експерименту типу 2^3 . Для оцінки достовірності та адекватності отриманих математичних залежностей була проведена додаткова серія дослідів ($n_o = 3$) в нульовій точці плану експерименту (обробка заготовок з сірого чавуну СЧ15).

Після свердління заготовок і вимірювань координованих розмірів за спеціально розробленою методикою були розраховані статистичні характеристики розподілів:

\bar{x} - середнє арифметичне відхилення досліджуваного фактора;
 σ - середньоквадратичне відхилення;
 ω - розмах;

λ і $\acute{\alpha}$ - відповідно коефіцієнт відносного розсіювання і коефіцієнт відносної асиметрії.

Оцінка узгодження експериментальних даних з теоретичними по кожному з 11 дослідів проводилася шляхом обчислення критеріїв Колмогорова і Пірсона [12-14]. Перевірка гіпотези однорідності дисперсій практичних полів розсіювання в кожній точці плану експерименту проводилася за критерієм Кохрена [3]. В якості незалежних змінних x_i ($i = 1, 2, 3$) були прийняті логарифми d_n , HB, ℓ_n .

Рівні та інтервали зміни даних змінних факторів приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Область зміни незалежних факторів під час свердління отворів силовий головкою без направлення ріжучого інструменту

Рівень варіювання	Незалежні фактори і їх алгоритми					
	Діаметр інструменту		Твердість оброблюваного матеріалу		Виліт ріжучого інструменту	
	\bar{X}_1	X_1	\bar{X}_2	X_2	\bar{X}_3	X_3
	d_n , мм	$\lg d_n$	HB, МПа	$\lg HB$	ℓ_n , мм	$\lg \ell_n$
Верхній (+1)	3,0	0,4771	1930	3,2856	30	1,4771
Нульовий (0)	2,0	0,301	1240	3,0934	23	1,3617
Нижній (-1)	1,0	0	550	2,7404	16	1,2041
Інтервал варіювання	-	0,2386	-	0,2726	-	0,1365

За результатами експерименту розраховано коефіцієнти регресії і отримані вихідні математичні моделі полів розсіювання розмірів від бази і позиційних відхилень.

В результаті статистичного аналізу отриманих рівнянь встановлено, що гіпотезу про адекватність представлення результатів дослідження точності обробки заготовок без направлення ріжучого інструменту можна вважати правильною тому перевірки за критерієм Фішера (F) і критерієм Стьюдента (t) показали, що значення цих критеріїв менше табличних (табл.2) [15].

Після перетворення кодових значень [2-4] рівнянь в логарифмічні і після потенціювання отримані залежності для практичних полів розсіювання розмірів від бази:

$$\omega_v = 19,6 \frac{HB^{0,36} \cdot \ell_n^{0,46}}{d_n^{0,451} \lg HB - 1,289} \quad (2)$$

і позиційних відхилень осей отворів

$$\omega_o = 0,863 \frac{HB^{1,06} \cdot \rho_n^{0,72}}{d_n^{0,91} HB-2,63} \quad (3)$$

Таблиця 2 – Параметри статистичного аналізу математичних моделей під час свердління отворів без направлення ріжучого інструменту

№ з/п	Параметри статистичного аналізу	Позначення параметра	Значення параметрів для моделей	
			у _в	у _о
1.	Дисперсія похибки дослідження	S _{оп}	25,9 × 10 ⁻⁴	9,4 × 10 ⁻⁴
2.	Дисперсія похибки визначення коефіцієнтів регресії	S ² _{ві}	3,1 × 10 ⁻⁵	1,2 × 10 ⁻⁵
3.	Довірчий інтервал для коефіцієнтів регресії	Δ ві	0,0239	0,034
4.	Дисперсія, яка характеризує неадекватність математичної моделі	S ² _{на}	1,01 × 10 ⁻³	2,46 × 10 ⁻³
5.	Критерій Фішера (F _{табл.} =99,0 при 3% рівні значимості)	F	4,11	26,12
6.	Критерій Стьюдента (t _{табл.} =9,925 при 1% рівні значимості)	t	9,49	6,626

Для наглядності нормативного забезпечення точності координованих отворів використовуючи залежності (16-17) побудовані графіки зміни полів розсіювання з урахуванням залежності від елементів оснастки в системах без направлення ріжучого інструменту. Як приклад наведений графік на рис. 1.

На етапі проектування для повного відображення якості нормативного забезпечення виробництва в системах без направлення ріжучого інструменту доцільно, використовуючи формули залежностей (2-3), представити поля розсіювання обробки отворів малого діаметру з урахуванням таких факторів як діаметри різального інструменту, довжини вильоту інструменту та для різної твердості матеріалу у вигляді таблиць. Таблиці 3-7 являються довідковим матеріалом для забезпечення взаємозамінності

глибоких координованих отворів та основою для розробки проекту стандарту.

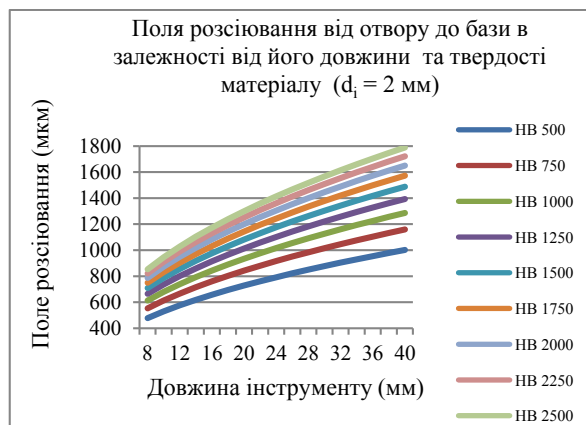


Рис. 1 - Залежності поля розсіювання ω_в від довжини свердла та твердості матеріалу

Таблиця 3 – Величини полів розсіювання координованих розмірів від отвору до в залежності від його діаметру та твердості матеріалу при глибині отвору l_i = 12 мм

HB	Діаметр інструменту (отвору)					
	1	1,2	2	2,2	3	3,2
500	576	584	606	611	625	628
750	666	666	664	664	663	663
1000	739	731	708	704	691	688
1250	801	786	745	737	714	709
1500	855	834	776	766	733	726
1750	904	876	803	790	750	742
2000	949	915	828	812	764	755
2250	990	951	850	832	778	767
2500	1028	984	870	851	790	777

Таблиця 4 – Величини полів розсіювання координованих позиційних розмірів в залежності від його довжини та твердості матеріалу (d_i = 1,6 мм)

HB	Довжина отвору (l _s мм.)					
	12	14	20	22	30	32
500	1139	1341	1956	2164	3004	3217
750	1415	1666	2429	2687	3731	3994
1000	1650	1943	2833	3134	4351	4658
1250	1859	2188	3192	3530	4902	5248
1500	2049	2412	3518	3892	5403	5785
1750	2225	2619	3820	4226	5867	6281
2000	2390	2813	4103	4538	6301	6746
2250	2545	2996	4369	4833	6710	7184
2500	2692	3169	4622	5113	7098	7600

Таблиця 5 – Величини полів розсіювання координованих позиційних розмірів в залежності від його довжини та твердості матеріалу ($d_i = 2$ мм)

HV	Довжина отвору (l_s мм.)					
	12	14	20	22	30	32
500	1185	1395	2034	2250	3124	3344
750	1420	1671	2437	2696	3743	4007
1000	1614	1900	2771	3065	4255	4556
1250	1783	2099	3061	3386	4701	5033
1500	1934	2277	3320	3673	5099	5459
1750	2072	2439	3557	3934	5462	5848
2000	2199	2588	3775	4176	5797	6207
2250	2317	2728	3979	4401	6110	6542
2500	2429	2859	4170	4613	6404	6857

Таблиця 6 – Величини полів розсіювання координованих позиційних розмірів в залежності від його довжини та твердості матеріалу ($d_i = 3$ мм)

HV	Довжина отвору (l_s мм.)					
	12	14	20	22	30	32
500	1272	1497	2183	2415	3353	3590
750	1428	1681	2452	2712	3765	4031
1000	1550	1825	2662	2944	4088	4377
1250	1653	1945	2837	3138	4357	4665
1500	1741	2049	2989	3306	4590	4914
1750	1819	2142	3123	3455	4797	5136
2000	1890	2225	3245	3589	4983	5335
2250	1955	2301	3356	3712	5154	5518
2500	2015	2371	3459	3826	5311	5687

Таблиця 7 – Величини полів розсіювання координованих позиційних розмірів без направлення інструменту в залежності від його діаметру та твердості матеріалу ($l_i = 30$ мм)

HV	Діаметр отвору (d_s мм.)					
	1	1,2	2	2,2	3	3,2
500	2767	2857	3124	3176	3353	3391
750	3706	3715	3743	3748	3765	3769
1000	4558	4477	4255	4215	4088	4062
1250	5353	5173	4701	4618	4357	4304
1500	6104	5822	5099	4975	4590	4514
1750	6820	6433	5462	5298	4797	4699
2000	7508	7015	5797	5595	4983	4865
2250	8173	7571	6110	5870	5154	5016
2500	8817	8106	6404	6128	5311	5156

Висновок

Аналізуючи проблему точності розмірів координованих отворів можна зробити висновок, що точність координування розмірів і позиційних відхилень залежить від сумарної геометричній точності елементів технологічної системи верстата, сумарних пружних деформацій та ін.. Дослідженнями встановлено, що розсіювання координованих розмірів підпорядковується нормальному закону розподілу, а позиційних відхилень - закону ексцентриситету або модуля різниці. Результати розрахунку впливу питомої ваги похибок на сумарну геометричну точність показує, що для систем без направлення ріжучого інструменту найбільш істотний вплив роблять похибки пристосувань.

Список літератури

1. **Іванов, В. В.** К вопросу точности обработки координированных отверстий на агрегатных станках. [Текст] / **В.В.Иванов, Э.А.Пащенко, В.А. Чепела** // 3 сб.: *Вест. харьк. политехн. ин-та, Машиностроение*, вып. 10. – Х.: Вища школа. – 1979 –№ 158. – С. 17-21.
2. **Beckwith, S. W.** Drilling, cutting, machining composite materials and structures [Text] / **S. W. Beckwith** // *BTD composites Inc., Sampe journal.* - 2009. -Vol. 45(2). - P. 49-52.
3. **Gurevich, V.** Electronic Devices on Discrete Components for Industrial and Power Engineering [Text] / **V. Gurevich.** – CRC Press, New York, 2008. – 418 p.
4. **Попов, С. А.** Заточка режущего инструмента / **С. А. Попов.** –М., 2012. –318 с.
5. **Campbell, F. C.** Manufacturing Processes For Advanced Composites [Text] / **F.C. Campbell;** Published by Elsevier Advanced Technology, USA, 2004. -533 p.7.
6. **Cong, W. L.** Rotary ultrasonic machining of carbon fiber reinforced plastic composites: An experimental study on cutting temperature [Text] / **W. L. Cong, Z. Xiatian, T. W. Deines** // *Journal of reinforced plastics and composites.*-2012. -№22. -Т. 31.-P. 1516-1525.
7. **Ettinger, W. J.** Basis for Determining Manufacturing Tolerances / **W. J. Ettinger, W. Bartky** // *The Machinist.* – 1936. - vol. 80. – № 36. – P. 23-28.
8. **Гугнін, В. П.** Метрологічне забезпечення та перевірка засобів вимірювальної техніки фізичних величин / **В. П. Гугнін, Г. О. Оборський.** – К.: Наука і техніка, 2011. – 220 с.
9. **Лугінін, О. С.** Статистика: Підручник / **О. С. Лугінін.** - К.: Центр учбової літератури, 2007. - 608с.
10. **Пащенко, Е. А.** Исследование факторов, определяющих точность обработки деталей на агрегатных станках ХПО. Отчет о НИР. / **Э. А. Пащенко, В. А. Чепела, Н. В. Латышев.** - *УЗПИ* // Инв. № 02840041668. – Харьков, 1983. – 90 с.
11. **Арпентьев, Б. М.** Оценка качества сборки соединений по критерию биения / **Б. М. Арпентьев, Н. Ю. Ламнауэр** // *Вісник НТУ“ХПІ”.* – Харків:

- НТУ "ХПІ". – 2005. – №9. – С. 48-54. – doi:10.20998/2413-4295.2005.10.09.
12. **Анурьев, В. И.** Справочник конструктора-машиностроителя / **В. И. Анурьев**; под ред. И. Н. Жестковой; 8-е изд., перераб. и доп. Т. 2. – 2001. – 912 с.
 13. **Пашченко, Е. А.** Исследование точности обработки деталей на агрегатных станках с применением различных технологических схем Отчет о НИР. / **Э. А. Пашченко, В. А. Чепела, Н. В. Латышев-УЗПИ** // Инв. № В 979436 – Харьков, 1980. – 132.
 14. **Draganescu, F.** Models of machine tool efficiency and specific consumed energy / **F.Draganescu, M. Gheorghe, C.V. Doicin** // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – Vol.141. – P. 9 –15. – doi: 10.1016/S0924-0136(02)00930-5.
 15. **Ламнауэр, Н. Ю.** Модель поля рассеивания погрешности геометрической формы и ошибки взаимного положения поверхностей / **Н.Ю. Ламнауэр, Р.М. Триш** // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2004. – №44. – С.106-110. – doi:10.20998/2413-4295.2004.04.05.
 16. **Кузнецова, Т. И.** О гашении автоколебаний при глубоком сверлении [Текст] / **Т. И. Кузнецова, Б. Г. Макаров, Б. А. Немцев** // *Межвузовский сб.: Колебания и устойчивость механических систем*. Вып. 5/Под ред. Н. Н. Поляхова. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. – С. 114-118.
 17. **Подураев, В. Н.** О влиянии скорости резания на уводы при глубоком сверлении/ [Текст] // **В. Н. Подураев, А. А. Суворов, А. А. Барзов** // *Изв. Вуз.: «Машиностроение»*. – 1976. – № 1. – С. 182-184.
 6. **Cong, W. L., Xiatian, Z., Deines, T. W.** Rotary ultrasonic machining of carbon fiber reinforced plastic composites: An experimental study on cutting temperature. *Journal of reinforced plastics and composites.*, 2012, **22**, 31, 1516-1525.
 7. **Ettinger, W. J., Bartky, W.** Basis for Determining Manufacturing Tolerances. *The Machinist*, 1936, **80**, **36**, 23-28.
 8. **Guginin, V. P., Oborsky, G. O.** Metrologichne zabezpechennya ta povirka zaobiv vimirjuvalnoy tehniki fizichnikh magnitudes. *Science and Technology*, 2011, **220**.
 9. **Luginin, O. S.** Statistics.: Textbook. Center for Educational Literature, 2007, 608.
 10. **Pashchenko, E. A., Chepela, V. A., Latyshev, N. V.** Investigation of the factors determining the accuracy of machining of parts on aggregate machine tools of CPE. Report on research. Inv. No. 02840041668. - Kharkov, 1983, 90 .
 11. **Arpent'ev, B. M., Lamnauer, N. Yu.** Assessment of the quality of assembly of compounds by the beat criterion. *Bulletine of NTU "KhPI"*, 2005, **9**, 48-54, doi: 10.20998/2413-4295.2005.10.09.
 12. **Anuryev, V. I., Zhestkova, I. N.** Handbook of the constructor-machine builder. 8 th ed., Revised. and additional. 2., Mechanical Engineering, 2001, 912 .
 13. **Pashchenko, E. A., Chepela, V. A., Latyshev, N. V.** Study of the accuracy of machining of parts on aggregate machines using various technological schemes. Report on research. В 979436. Kharkov, 1980, 132.
 14. **Draganescu, F., Gheorghe, M., Doicin, C. V.** Models of machine tool efficiency and specific consumed. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, **141**, 9 –15, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00930-5.
 15. **Lamnauer, N. Yu., Trisch, R. M.** Model of the field of dispersion of error of geometric shape and error of mutual position of surfaces. *Bulletine of the National Technical University "KhPI"*. – Kharkov: NTU "KhPI", 2004, **44**, 106-110, doi: 10.20998 / 2413-4295.2004.04.05.
 16. **Kuznetsova, T. I., Makarov, B. G., Nemtsev, B. A.** On suppression of autooscillations during deep drilling. *Interuniversity collection: Oscillations and stability of mechanical systems*. Issue. 5 / Ed. N. N. Polyakhova. - Leningrad: Publishing House of Leningrad State University, 1981, 114-118.
 17. **Poduraev, V. N. , Suvorov, A. A, Barzov A. A.** On the influence of the cutting speed on drifts during deep drilling. *Izv. Universities:Mechanical Engineering*, 1976, **1** ,182-184.

Bibliography (transliterated)

1. **Ivanov, V. V., Chepela, V. A., Latyshev, N. V.** On the accuracy of processing coordinated holes on aggregate machines. *Bulletine of Kharkov. polytechnical. Institute of Mechanical Engineering*, 1979, **10** , **158**, 17-21.
2. **Beckwith, S. W.** Drilling, cutting, machining composite materials and structures. *BTD composites Inc., Sampe journal*, 2009, **45(2)** , 49-52.
3. **Gurevich, V.** Electronic Devices on Discrete Components for Industrial and Power Engineering, CRC Press, New York, 2008, 418 .
4. **Popov, S. A.** Grinding of cutting tools , 2012, 318.
5. **Campbell, F. C.** Manufacturing Processes For Advanced Composites . Published by Elsevier Advanced Technology, USA, 2004, **533**, 7.

Сведения об авторах (About authors)

Бурдейна Виктория Михайлівна - Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри Охорони праці, стандартизації та сертифікації; м. Харків, Україна; e-mail: zamorskavika@ukr.net.

Vuktoryia Burdeina – Ukrainian engineering - pedagogical Academy, docent of the Department of labor Protection, standardization and certification; Kharkov, Ukraine; e-mail: zamorskavika@ukr.net.

Артюх Світлана Миколаївна- Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри Охорони праці, стандартизації та сертифікації; м. Харків, Україна; e-mail: zamorskavika@ukr.net.

Svetlana Artyuh - Ukrainian engineering - pedagogical Academy, docent of the Department of labor Protection, standardization and certification; Kharkov, Ukraine; e-mail: zamorskavika@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Бурдейна, В. М. Основні особливості оптимізації розмірів координованих отворів при різних видах обробки / **В. М. Бурдейна, С. М. Артюх** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 16-21. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.03.

Please cite this article as:

Burdeina, V., Artyuh, S. The main features of optimizing the sizes of coordinated holes for different types of processing. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 16-21, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.03.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Бурдейная, В. М. Основные особенности оптимизации размеров координированных отверстий при различных видах обработки / **В. М. Бурдейная, С. Н. Артюх** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 16-21. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.03.

АННОТАЦИЯ Определена функциональная зависимость размеров полей рассеяния от базы и позиционных отклонения осей с учетом удельных факторов. Рассмотрены предложенные зависимости для определения полей рассеяния размера от базы и позиционного отклонения при обработке отверстий в системах без направления режущего инструмента. Рассмотрены статистические характеристики распределения процесса обработки отверстий сверлением в системах без направления от базовой поверхности до оси отверстия и расположение осей отверстий. Предложенные нормативные данные для разработки проекта стандарта качества взаимозаменяемости размеров координированных отверстий. **Ключевые слова:** отклонения; характеристика; координированные отверстия; взаимозаменяемость; фактор; режущий инструмент.

Поступила (received) 01.05.2018

УДК 621.763-233.3

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.04

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ РОЗ'ЄМНОГО РІЗЬБОВОГО З'ЄДНАННЯ З ВЕЛИКИМ КРОКОМ В ДЕТАЛЯХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

А. Ю. ДОВГОПОЛОВ^{1*}, С. С. НЕКРАСОВ²

¹ кафедра ТМВІ, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА

² кафедра ОМ і ПМ, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА

*email: d_a_y_@ukr.net

АНОТАЦІЯ З метою дослідження міцності, запропонованого роз'ємного з'єднання для деталей з армованих композиційних матеріалів (АКМ), були проведені дослідження зі зміною основних параметрів що найбільше впливають на працездатність з'єднання. Для запропонованого з'єднання, круглої різьби з великим кроком, змінювалися такі основні параметри як крок різьби p та глибина профілю різьби t . Отримані значення сили, дозволили встановити, що запропоноване роз'ємне з'єднання за характеристиками міцності, при всіх встановлених параметрах наближається, за показниками міцності, до з'єднання з аналогічними параметрами виконаному в металі. За рахунок виконання повного факторного експерименту за класичною схемою його виконання, були встановлені основні параметри при яких показники міцності будуть найкращими, для нашого випадку значення кроку різьби складатиме $p = 4$ мм, а значення глибини профілю різьби $t = 0.9$ мм.

Ключові слова: армовані композиційні матеріали (АКМ); роз'ємні різьбові з'єднання; напруження; міцність; кругла різьба.

RESEARCH INTO STRENGTH OF THE THREAD DETACHED CONNECTION WITH A LARGE PITCH OF THREAD IN DESIGNS MADE OF REINFORCED COMPOSITE MATERIAL

A. DOVGOPOLOV^{1*}, S. NEKRASOV²

¹ Sumy State University, Sumy, UKRAINE

² Sumy State University, Sumy, UKRAINE

ABSTRACT With the purpose of research of durability, offered sectional connection for details from the reinforced composition materials (RCM), there were undertaken studies with the change of basic parameters that most influence on the capacity of connection. For the offered connection, round screw-thread with a stride, such parameters as step of screw-thread of p and depth of profile of screw-thread of t changed. These basic parameters varied within the following limits step of screw-thread p in the range from 1 to 4 mm, and depth of profile of screw-thread t is from 0.5 to 1 mm. Mechanical processing of this connection was carried out on the newly developed technology, the detailed processing technology described in [1]. For processing, a CNC milling machine was used. Experimental strength tests were carried out using special equipment, a universal rupture machine P20. The threaded connection was made in a plate of 190x107x16 mm, the material from which the specified plate was made of fiberglass (0.5 to 0.5 mm gratings) 0.2 mm thick and EPOXY-520 epoxy resin. Got values of force, allowed to set that sectional connection on descriptions of durability, at all set parameters approached, on the indexes of durability, to connection, with analogical parameters executed in a metal. Due to implementation of complete factor experiment on the classic chart of his implementation, basic parameters were set at that indexes of durability will be the best, for our case a step of screw-thread will be $p = 4$ mm, and value of depth of profile of screw-thread of $t = 0.9$ mm.

Keywords: CRM; detachable connections; voltages; strength; round screw-thread.

Вступ

Армовані композиційні матеріали (АКМ) такі як склопластик та вуглепластик з кожним роком, стають все більше і більше вживаними в аерокосмічній та автомобільній промисловості, оскільки дозволяють знизити вагу та підвищити ефективність, а в перспективі можуть і взагалі витіснити найбільш застосовувані в даних галузях метали такі як алюміній, титан та ін. Основні з'єднання деталей виготовлених з армованих композиційних матеріалів відбуваються між собою

або деталь виготовлена з АКМ приєднується до металевої деталі виготовленої з алюмінію сталі чи іншого металу [1-5]. У більшості реальних випадків приєднання АКМ до металевого каркасу вимагає формування закінченої структури, яка відіграє важливу роль в гібридному дизайні. Гібридний дизайн є процесом появи елементів конструкції, за рахунок приєднання різних матеріалів до металів, з бажаними і унікальними структурними особливостями, такими як більш висока міцність і жорсткість, опір фізичному ушкодженню через тріщини, протидії радіаційному ураженню і

різносторонності дизайну [6]. Отримання даних функціональних властивостей дозволить задовольнити поставлені вимоги до характеристик міцності з'єднань отриманих з металів та АКМ [7]. Саме тому дуже важливо зрозуміти проблеми, пов'язані з виготовленням, механічною обробкою і з'єднанням армованих композиційних матеріалів, а також дослідити конструкції з АКМ на міцність [8].

Останнім часом, питанням дослідження міцності конструкцій з армованих композиційних матеріалів в Україні та в усьому світі, приділяється досить значна увага. Найсвіжіші дослідження міцності різьбових з'єднань в армованих композиційних матеріалах провів Zemann Richard який досить детально встановив, міцність різьбового з'єднання виконаного у вуглепластиковому армованому композиті [11].

Завдяки своїм перевагам в вазі, та досить високим показникам міцності армовані композиційні матеріали такі як склопластик та вуглепластик досить часто використовуються в промисловості. Особливо зазначені матеріали використовуються у великій кількості для виготовлення, фюзеляжів літаків та космічних кораблів, а також в інших галузях промисловості таких як легке машинобудування та приладобудування. Також значне застосування знайшли дані армовані композиційні матеріали в модельному спорті.

Що ж стосується з'єднань представлених композитів то в основному використовуються не роз'ємні з'єднання деталей виготовлених з даних АКМ, такі як клеєві та заклепкові, оскільки завдяки своїм анізотропним властивостям досить складно отримати роз'ємне з'єднання яке б задовольняло необхідним показникам міцності.

У випадку з різьбовими з'єднаннями даних АКМ, все набагато складніше, оскільки як було сказано вище, дані композити мають анізотропні властивості, то класичні різьби такі як метрична, дюймова не задовольняють показники міцності для даних з'єднань, оскільки завдяки наявності гострих концентраторів напруг, вони не витримують необхідного навантаження. Все це зв'язано з тим що зазначені, армовані композиційні матеріали не досить добре витримують навантаження на розтяг та стискання, порівняно з деякими металами, а на зсув взагалі погано себе зарекомендували [9]. Саме тому потрібна зовсім інша геометрія профілю роз'ємного з'єднання, щоб уникнути поганих показників міцності, та не допустити виникнення гострих концентраторів напруг в роз'ємному з'єднанні.

Мета роботи

Дослідження міцності роз'ємного різьбового з'єднання з великим кроком в деталях з армованих композиційних матеріалів, та визначення основних параметрів при значеннях яких показники міцності будуть найбільшими.

Викладення основного матеріалу

Вирішити проблему отримання працездатного роз'ємного з'єднання для деталей виготовлених з АКМ, було запропоновано наступним чином, оскільки не допускається гострих концентраторів напруг, було вирішено виготовити круглу різьбу з великим кроком. Профіль даної різьби із зазначенням параметрів різьби представлений на рисунку 1.

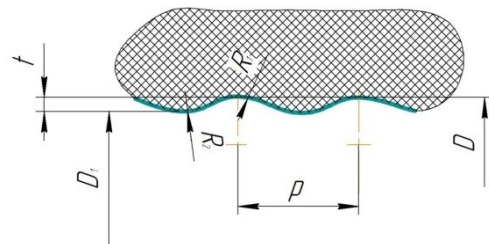


Рис. 1 – Профіль запропонованої різьби із зазначенням параметрів

Для практичної перевірки міцності запропонованого роз'ємного з'єднання були виготовлені металеві вставки з круглою різьбою, в даних вставках змінювалися основні параметри круглої різьби це p – крок різьби, та t – глибина профілю різьби. Параметри даних різьб та межі їх варіювання представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Параметри що змінювалися в ході експерименту

Параметри що змінювалися	Позначення	Межі варіювання
Глибина профілю різьби	t	0.5 – 1.0
Крок різьби	p	1.0 – 4.0

Зазначені металеві вставки виготовлялися раніше відомим способом [10], з конструкційної сталі, марка сталі «Сталь 45» ескіз даної вставки представлений на рисунку 2а, а фото вставки на рисунку 2б. Перед нарізанням різьби металеві вставки оброблялися на токарному верстаті до діаметру 6.2мм. потім відбувалося нарізування самої різьби.

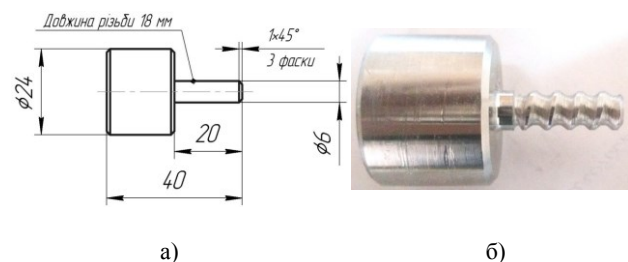


Рис. 2 – Металева вставка круглої зовнішньої різьби: а – ескіз металевої вставки; б – фото вставки

Внутрішня кругла різьба була виготовлена в склопластиковій пластині армованій в двох взаємно перпендикулярних напрямках схема армування представлена на рисунку 3а, а фото самої пластини на рисунку 3б.

Матеріал з якого було виготовлено зазначену пластину це склотканина(розміри решітки 0.5 – 0.5 мм) товщина 0.2 мм та епоксидна смола ЕРОХУ-520, розміри платини 190x107x16 мм. Технологія обробки круглої внутрішньої різьби в АКМ детально описана в [1].

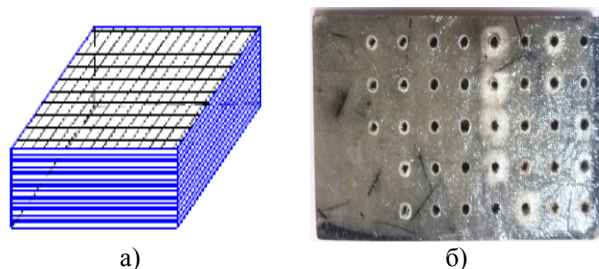


Рис. 3 – Склопластикова пластинка:
а – схема армування пластини;
б – фото пластини

Далі відбувалося виконання повного факторного експерименту за класичною схемою його виконання. В нашому випадку побудова матриці повного факторного експерименту була реалізована на двох рівнях по двом факторам. Таким чином була реалізована матриця типу 2². В таблиці 2 представлено кодування факторів які в нашому випадку змінювалися.

Таблиця 2 – Кодування факторів

Фактори що змінюються:	Позначення	Межі варіювання	Кодове позначення	Нижній рівень	Верхній рівень	Нульовий рівень
Глибина профілю різьби	t	0.5 – 1.0	x ₁	0.5	1.0	0.75
Крок різьби	p	1.0 – 4.0	x ₂	1.0	4.0	3.0

Умова яка обов'язково повинна виконуватися в процесі реалізації зазначеного експерименту

$$0.5 \leq x_1 \leq 1.0$$

$$1.0 \leq x_2 \leq 4.0$$

Матриця планування експерименту типу 2², представлена в таблиці 3

Таблиця 3 – Матриця планування експерименту типу 2²

№ експерименту	x ₁	x ₂	t	p
1	+	+	1	4
2	+	-	1	1
3	-	+	0.5	4
4	-	-	0.5	1
5	0	0	0.75	2.5

Далі виготовлялися круглі різьби із зазначеними параметрами, для кожного випадку виконувалось по 5 різьб.

Далі проводилося випробування даного різьбового з'єднання на міцність використовувалася універсальна розривна машина Р20. Фото експерименту представлено на рисунку 4.

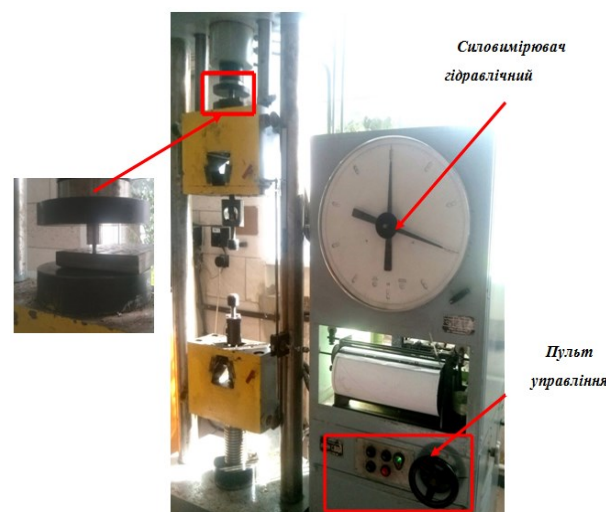


Рис. 4 – Фото експерименту з дослідження міцності різьбового з'єднання

На основі проведених досліджень були отримані значення сили для кожного випадку ці значення та середнє значення сили зведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Значення сили отримані для кожного випадку в процесі експерименту

№	F ₁ кН	F ₂ кН	F ₃ кН	F ₄ кН	F ₅ кН	F _{ср} кН
1	14.4	14	13.5	13.5	13.7	13.82
2	13	12	11.7	12	13	12.34
3	9.2	9	11	10.4	10.2	9.96
4	12.2	12.5	12.6	12.2	8	11.5
5	15	14.6	13	12.4	13.7	13.74

Розраховуємо коефіцієнти рівняння регресії, для нашого випадку. Рівняння регресії матиме наступний вигляд:

$$y = F = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot p + b_{12} \cdot t \cdot p + b_3 \cdot t^2 \quad (1)$$

Визначення коефіцієнтів рівняння 1 виконано методом найменших квадратів шляхом мінімізації функціоналу:

$$\Phi = \sum_{u=1}^n (F(b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_3)) \rightarrow \min \quad (2)$$

Розв'язавши рівняння 2 отримаємо залежність для F , та значення коефіцієнтів для нашого випадку вони будуть наступними: $b_0 = -2.49$, $b_1 = 43.68$, $b_2 = -1.52$, $b_{12} = 2.0$, $b_3 = -29.34$.

Згідно отриманих нами значень отримуємо рівняння для перевірки адекватності моделі, для нашого випадку рівняння матиме наступний вигляд:

$$y = F = -2.49 + 43.68 \cdot t - 1.52 \cdot p + 2.0 \cdot t \cdot p - 29.34 \cdot t^2 \quad (3)$$

Перевірка адекватності лінійної моделі виконується за допомогою критерію Фішера.

Критерій Фішера приймає значення при $s_{aa}^2 = 6.2 \cdot 10^{-7}$, $F = \frac{6.2 \cdot 10^{-7}}{0.145} = 4.29 \cdot 10^{-6} \leq 6.6079$, модель є адекватною.

Похибка отриманих значень для визначення допустимої сили для даного з'єднання сягає менше 1%.

Знайшовши екстремуми отриманої нами функції, знаходимо значення наших параметрів при яких показники міцності будуть найвищими. У нашому випадку для нашої функції значення кроку різьби складатиме $p = 4 \text{ мм}$, а значення глибини профілю різьби $t = 0.9 \text{ мм}$.

Висновки

У результаті проведеного дослідження, з визначення характеристик міцності для запропонованого роз'ємного різьбового з'єднання з великим кроком, було встановлено що запропоноване з'єднання виконане в АКМ за показниками міцності наближається до аналогічних роз'ємних з'єднань виконаних в металах. На основі експериментальних даних, та за рахунок виконання повного факторного експерименту за класичною схемою його виконання, були отримані значення основних параметрів при яких показники міцності будуть найбільшими а саме значення кроку різьби складатиме $p = 4 \text{ мм}$, а значення глибини профілю різьби $t = 0.9 \text{ мм}$. На основі проведеного дослідження міцності, можна зробити висновок, що запропоноване різьбове з'єднання з великим кроком, найкраще підходить для

армованих композиційних матеріалів. Дане твердження було підтверджено дослідним шляхом.

Список літератури

1. **Messler, R. W.** Joining composite materials and structures: Some thought-provoking possibilities / **R. W. Messler** // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. – 2004. – 17 (1). – P. 51-75. – doi: 10.1177/0892705704033336.
2. **Jung, K. W.** Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel / **K. W. Jung, Y. Kawahito, M. Takahashi, S. Katayama** / *Mater. Des.* – 2013. – 47. – p. 179–188. – doi: 10.1016/j.matdes.2012.12.015.
3. **Esteves, J. V.** Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly (phenylene sulfide): effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength / **S. M. Goushegir, J. F. Dos Santos, L. B. Canto, E. Hage, S.T Amancio-Filho** / *Mater. Des.* – 2015. – 66. – P. 437–445. – doi: 10.1016/j.matdes.2014.06.070.
4. **Lambiase, F.** Joinability of different thermoplastic polymers with aluminium AA6082 sheets by mechanical clinching / **F. Lambiase** // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2015. – 80(9–12). – P. 1995–2006. – doi: 10.1007/s00170-015-7192-1.
5. **Goushegir, S. M.** Friction spot joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly (phenylene sulfide) composite single lap joints: microstructure and mechanical performance / **S. M. Goushegir, J. F. Dos Santos, L. B. Canto, E. Hage, S.T Amancio-Filho** / *Mater. Des.* – 2014. – 54. – P. 196–206. – doi: 10.1016/j.matdes.2013.08.034.
6. **Johnson, T.** History of composites. The evolution of lightweight composite materials / **T. Johnson**. – 2014. URL: <http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/a/HistoryofComposites.htm>.
7. **Proctor, B. A.** Composite materials / **B. A. Proctor**. – 1990. URL: <http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/Inspiration/resources/4.3.1.pdf>.
8. **Pramanik, A.** Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites / **A. Pramanik** // *Int. J. Mach. Tools. Manuf.* – 2014. – 86. – P. 44–61. – doi: 10.1016/j.ijmactools.2014.07.003.
9. **Довгополов, А. Ю.** Технологія обробки гвинтової поверхні роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів / **А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов** // *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях = Bulletin of National Technical University "KhPI" : coll. of sci. papers. Ser. : New solutions in modern technologies*. – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – № 42 (1214). – С. 38-42. – doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.06.
10. Пат. UA 115892. Спосіб обробки круглої зовнішньої різьби / **Некрасов С. С., Довгополов А. Ю.** МПК В23С 3/32 (2006.01), В23В 1/00. - No u201612668 заявл. 12.12.2016; 25.04.2017, бюл. No 8.
11. **Richard, Zemann.** Manufacturing of threads direct into a carbon fibre reinforced polymer / **Zemann Richard** // *Materials Today: Proceedings*. – 2016. – 3. – P. 1226 – 1229. – doi: 10.1016/j.matpr.2016.03.001.

Bibliography (transliterated)

1. **Messler, R. W.** Joining composite materials and structures: Some thought-provoking possibilities. *Journal of*

- Thermoplastic Composite Materials*, 2004, **17** (1), 51-75, doi: 10.1177/0892705704033336.
- Jung, K. W., Kawahito, Y., Takahashi, M., Katayama, S.** Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel. *Mater. Des.*, 2013, **47**, 179–188, doi: 10.1016/j.matdes.2012.12.015.
 - Esteves, J. V., Goushegir, S. M., Dos Santos, J. F., Canto, L., Hage, B. E., Amancio-Filho, S. T.** Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly (phenylene sulfide): effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength. *Mater. Des.*, 2015, **66**, 437–445, doi: 10.1016/j.matdes.2014.06.070.
 - Lambiase, F.** Joinability of different thermoplastic polymers with aluminium AA6082 sheets by mechanical clinching. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2015, **80**(9–12), 1995–2006, doi: 10.1007/s00170-015-7192-1.
 - Goushegir, S. M., Dos Santos, J. F., Canto, L., Hage, B. E., Amancio-Filho, S. T.** Friction spot joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly (phenylene sulfide) composite single lap joints: microstructure and mechanical performance. *Mater. Des.*, 2014, **54**, 196–206, doi: 10.1016/j.matdes.2013.08.034.
 - Johnson, T.** History of composites. The evolution of lightweight composite materials, 2014. Available at: <http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/a/HistoryofComposites.htm>.
 - Proctor, B. A.** Composite materials, 1990. Available at: <http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/Inspiration/resources/4.3.1.pdf>.
 - Pramanik, A.** Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites. *Int. J. Mach. Tools. Manuf.*, 2014, **86**, 44–61, doi: 10.1016/j.ijmactools.2014.07.003.
 - Dovgopolov, A. Y., Nekrasov, S. S.** Technology of processing of screw surface of a splice connection in details from reinforced composite materials. *Bulletin of the National Academy of Sciences. tech Un-th "KhPI": Sb. sciences pr sir : New Solutions in Modern Technologies = Bulletin of National Technical University "KhPI": coll. of sciences papers. Ser : New solutions in modern technologies.* - Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **42** (1214), 38–42, doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.06.
 - Pat.UA 115892. Method of processing of a round external thread / **Nekrasov S. S., Dovgopolov A. Y.** IPC B23C 3/32 (2006.01), B23B 1/00. - No u201612668 application. 12.12.2016; 04/25/2017, bulletin No 8.
 - Richard, Zemann.** Manufacturing of threads direct into a carbon fibre reinforced polymer. *Materials Today: Proceedings*, 2016, **3**, 1226 – 1229, doi: 10.1016/j.matpr.2016.03.001.

Сведения об авторах (About authors)

Довгополов Андрій Юрійович – аспірант, Сумський державний університет, аспірант кафедри ТМБІ; м. Суми, Україна; e-mail: d_a_y_@ukr.net.

Andriy Dovgopolov – postgraduate, Sumy State University, postgraduate Department of Mechanical Engineering Technology machines and tools, Sumy, Ukraine, e-mail: d_a_y_@ukr.net.

Некрасов Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент Сумський державний університет, доцент кафедри Опру матеріалів та машинознавства, м. Суми, Україна. e-mail: nekrasovss@gmail.com.

Sergiy Nekrasov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Resistance materials and mashinoznnavstva, Sumy Ukraine e-mail: nekrasovss@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Довгополов, А. Ю. Дослідження міцності роз'ємного різьбового з'єднання з великим кроком в деталях з армованих композиційних матеріалів / **А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 22-26. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.04.

Please cite this article as:

Dovgopolov, A., Nekrasov, S. Research into strength of the thread detached connection with a large pitch of thread in designs made of reinforced composite material. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 22-26, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.04.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Довгополов, А. Ю. Исследование прочности разъемного резьбового соединения с большим шагом в деталях з армированных композиционных материалов / **А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 22-26. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.04.

АННОТАЦІЯ С целью исследования прочности, предложенного разъемного соединения для деталей из армированных композиционных материалов (АКМ), были проведенные исследования с изменением основных параметров, которые больше всего влияют на работоспособность соединения. Для предложенного соединения, круглой резьбы с большим шагом, изменялись такие параметры как шаг резьбы r и глубина профиля резьбы t . Полученные значения силы, позволили установить, что предложенное разъемное соединение по характеристикам прочности, при всех установленных параметрах приближается, по показателям прочности, к соединению, с аналогичными параметрами выполненному в металле. За счет выполнения полного факторного эксперимента по классической схеме его выполнения, были установлены основные параметры при которых показатели прочности будут наилучшими, для нашего случая шаг резьбы будет $r = 4$ мм, а значение глубины профиля резьбы $t = 0.9$ мм.

Ключевые слова: армированные композиционные материалы (АКМ); разъемные резьбовые соединения; напряжения; прочность; круглая резьба.

Надійшла (received) 07.05.2018

УДК 622.834:622.862.3

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.05

О ВЛИЯНИИ ИЗГИБНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА СОСТОЯНИЕ КРОВЛИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ОБРУШЕНИЯХ ПОРОДНОЙ ТОЛЩИ*

И. В. ИОРДАНОВ¹, Д. А. ЧЕПИГА^{1*}, В. А. КОЛОМИЕЦ², Е. С. ПОДКОПАЕВ³,
А. В. КОРОЛЬ⁴, В. Ю. ДОВГАЛЬ⁵

¹ ГВУЗ «ДонНТУ» МОН Украины, г.Покровск, УКРАИНА

² ШУ «Южнодонецкое №1», г.Угледар, УКРАИНА

³ Силезский технический университет, г.Гливице, ПОЛЬША

⁴ ПСП «Шахтоуправление «Добропольское» ООО «ДТЭК Добропольеуголь»», г.Доброполье, УКРАИНА

⁵ Шахтоуправление «Мирноградуголь», г.Мирноград, УКРАИНА

* email daria.chepiha@donntu.edu.ua

АННОТАЦИЯ Экспериментально установлено, что демпфирующая способность закладочного массива, который является податливым основанием для кровли угольного пласта при его разработке, оказывает существенное влияние на поведение боковых пород в окрестности горной выработки при внезапных обрушениях расслоившейся толщи или посадках основной кровли. В результате действия на кровлю внешней силы, при пустотности закладочного массива $M \leq 20\%$, когда обеспечивается его минимальная жесткость, амплитуда колебаний рассматриваемой системы становится максимальной. Доказано, что при увеличении жесткости закладочного массива в 5 раз, когда его пустотность уменьшается, а насыпная плотность увеличивается, рассматриваемая система максимально поглощает энергию деформирования. В таких условиях увеличивается ее добротность, число фиксированных колебаний и уменьшается промежуток времени, между моментом приложения внешней силы и достижением максимального прогиба кровли, а сама система становится более чувствительной к воздействию такой силы и разрушению. Коэффициент демпфирования при этом, характеризует темп относительного затухания колебаний в единицу времени и зависит от амплитуды колебаний. Более жесткое основание закладочного массива, пустотность которого $M \leq 6\%$, ухудшает устойчивость рассматриваемой системы, а для нормального ее функционирования необходимо, чтобы закладочный массив состоял из неоднородных по размеру частиц разрыхленной горной породы или имел пустотность $M = (9-20)\%$ при уменьшении насыпной плотности.

Ключевые слова: демпфирующая способность; обрушение; пустотность; закладочный массив; податливая опора.

ON THE INFLUENCE OF BENDING DEFORMATIONS ON THE CONDITION OF THE ROOF OF A COAL PLAST WITH EXTREMELY BREAKS OF BROWN THICKNESS*

I. IORDANOV¹, D.CHEPIGA^{1*}, V. KOLOMIIEC², Y. PODKOPAIEV³, A. KOROL⁴, V. DOVHAL⁵

¹ Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, UKRAINE

² Shakhtoupravlenie "Yuzhnodonbasskoye №1", Ugledar, UKRAINE

³ Silesian University of Technology, Gliwice, POLAND

⁴ Production structure of the enterprise "Mine management "Dobropolskoe" LLC "DTEK Dobropolyeugol", Dobropole, UKRAINE

⁵ Mine management "Mirnogradugol", Mirnograd, UKRAINE

ABSTRACT It has been experimentally established that the damping capacity of the filling massif, which is a compliant base for the roof of the coal seam in its development, has a significant effect on the behavior of the lateral rocks in the vicinity of the mine workings during sudden collapse of the stratified strata or plantings of the main roof. Experimental studies of its bending deformations on models of equivalent materials were carried out. As a result of the action on the roof of the external force, with the voiding of the filling massif $M \leq 20\%$, when its minimum rigidity is ensured, the amplitude of the oscillations of the system under consideration becomes maximum. It is proved that when the stiffness of the filling massif is increased 5 times, when its cavitation decreases, and the bulk density increases, the system under consideration absorbs the deformation energy as much as possible. Under such conditions, its Q-factor, the number of fixed oscillations, and the time interval between the application of the external force and the maximum deflection of the roof are increased, and the system becomes more sensitive to such force and destruction. The damping coefficient in this case characterizes the rate of relative damping of the oscillations per unit time and depends on the amplitude of the oscillations. A more rigid base of the backfill array, whose cavitation $M \leq 6\%$, worsens the stability of the system under consideration, and for its normal functioning it is necessary that the packing array consist of uneven particle-sized loosened rock or has a cavitation $M = (9-20)\%$ with decreasing bulk density.

Keywords: shock absorption; caving; cavitation; filling mass; foil bearing.

Введение

Опыт работы шахт украинского Донбасса показывает, что с ростом глубины горных работ в

углепородном массиве, вмещающем горные выработки, начинает проявляться такой природный фактор как расслоение толщи, оказывающий

*Работа выполняется под научно-методическим руководством докт.техн.наук, проф. Подкопаева С.В. и канд. физ.-мат. наук, доц. Конопелько Е.И., ГВУЗ «ДонНТУ» МОН Украины

существенное влияние на последующее поведение боковых пород. Особенно это прослеживается при разработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях и тогда, при принятии ошибочных технических решений, обрушения боковых пород, приводят к завалу горных выработок и возможному травматизму горнорабочих.

Как показало изучение процесса сдвижений и деформаций боковых пород [1,2], при выемке угля в нарушенной толще, происходит образование характерных зон сдвижения, на параметры которых в значительной степени влияет способ управления кровлей в лаве и охраны штреков. Известно [3], что наиболее эффективно на состояние боковых пород, а, следовательно, и горных выработок, оказывает способ управления кровлей закладкой выработанного пространства. Но в силу различных причин, этот способ в настоящее время не применяется, хотя в результате его использования, при внезапных обрушениях и посадках пород кровли, горные выработки находились в эксплуатационном состоянии в течении всего срока их службы [4].

В зависимости от горно-геологических и горно-технических условий разработки угольных пластов, на практике приходится встречаться с различным видом нагружения боковых пород. В большинстве случаев, в качестве параметрического обеспечения геомеханических расчетов устойчивости пород кровли, как основного грузонесущего элемента угленосного массива, используются ситуации, определяемые статическим методом приложения нагрузки. Однако ряд событий, к которым следует относить внезапные посадки кровли или обрушения расслоившейся толщи, характеризуются приложением динамических нагрузок, которые следует рассматривать как ударные явления и которые иначе, чем статические нагрузки, действуют на боковые породы.

Анализ исследований и публикаций

При изучении ударных явлений, к динамическому воздействию на кровлю угольного пласта следует относить удар, который представляет собой совокупность явлений в результате столкновения двух тел, когда осуществляется как упругое, так и пластическое их деформирование [5,6]. Механическая энергия к концу удара обычно восстанавливается лишь частично, вследствие потерь на образование остаточных напряжений и деформаций. Эти частичные потери энергии при расчетах учитываются введением коэффициента восстановления при ударе, зависящего от физико-механических свойств материала [7]. Отличие значений коэффициента восстановления от единицы, обусловлено вызванными пластическими

деформациями на основе предположения локализации деформаций вблизи поверхности взаимодействующих объектов [5,8].

Характерной особенностью динамических нагрузок является то, что в результате ударного воздействия на боковые породы, в них возникают колебания. В динамических задачах, в частности в задачах о колебаниях, положение точек рассматриваемой системы изменяется с течением времени, а установленные координаты являются функциями времени [8,9,10]. Основная задача такого исследования состоит в определении этих функций, т.е. в нахождении закона движения изучаемой системы, что позволит определить характер напряженно-деформированного состояния боковых пород, а, следовательно, состояние кровли угольного пласта и горных выработок.

Учитывая то, что ударные явления представляют собой динамический процесс и являются частью аварийных ситуаций, необходимо изучить природу и поставить пороговые условия возникновения и протекания этого процесса.

В динамическом поведении сооружений, огромную роль играет наличие податливого основания и его демпфирующая способность, которая приводит к сглаживанию напряжений при ударе [11,12]. Тем не менее, необходимо оценить эту способность, предварительно изучив природу поглощения энергии при колебаниях.

Многие практические задачи о колебаниях систем могут быть сформулированы как динамические задачи теории упругости. Однако, уравнения теории упругости описывают поведение системы в реальных условиях приближенно. Но при малых колебаниях, как об этом свидетельствуют исследования [8,13,14,15], наблюдается удовлетворительное соответствие между данными экспериментов и теорией.

Постановка задачи

С целью изучения состояния кровли угольного пласта, представленной в виде породной консольной балки, которая опирается на закладочный массив различной жесткости, при действии в таких условиях на балку ударных нагрузок в виде обрушений породного блока, нами были проведены экспериментальные исследования ее изгибных деформаций на моделях из эквивалентных материалов.

Изложение основного материала

В реальных условиях при изучении изгибных деформаций кровли разрабатываемого угольного пласта, которая поддерживается закладочным массивом – податливой опорой, в результате внезапных посадок основной кровли или обрушений

боковых пород, из-за труднодоступности выполнения замеров для получения экспериментальных данных, исследуемые объекты заменяются моделями. Исследования на моделях из эквивалентных материалов были проведены на специальном стенде (рис.1), в лаборатории горного давления ДонНТУ, когда породы кровли угольного пласта были представлены в виде породной балки длиной $L_6=0,6$ м, толщиной $h=0,02$ м и шириной $B=0,04$ м. Масса балки соответствовала $m_6=1,37$ кг, модуль упругости $E=8747$ МПа, плотность $\rho=2095$ кг/м³. Балка была изготовлена из песчано-цементной смеси, согласно рекомендаций [16,17,18,19,20] и нагружалась внешней силой F , (Н) и собственным весом G , (Н). Один конец балки был жестко защемлен, другой опирался на закладочный массив различной жесткости C , (Н/м).

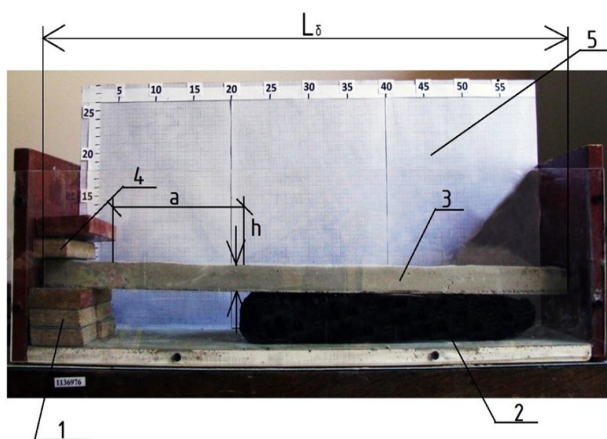


Рис. 1 – Общий вид стенда из эквивалентных материалов для изучения изгибных деформаций пород кровли при обрушении породного блока: 1 – угольный пласт; 2 – закладочный массив; 3 – балка из песчано-цементной смеси; 4 – жесткое защемление; 5 – стенд с координатными сетками; L_6 – длина балки, м; a – ширина призабойного пространства, м; h – толщина балки, м

Изгибные деформации пород кровли угольного пласта определяют устойчивость балки, а безразмерная величина y , в рассматриваемой системе, является ее прочностной характеристикой и зависит от основных параметров, т.е.

$$y = f(h, B, L_6, G, F, E). \quad (1)$$

Используя π -теорему [17] и значимость каждого из перечисленных в (1) параметров, когда в качестве независимых размерностей выбраны (н) и (м), параметрическое уравнение в безразмерном виде приобретает вид

$$y = f\left(\frac{B}{L_6}; \frac{h}{L_6}; \frac{E}{\rho g L_6}; \frac{F}{EL^2}\right), \quad (2)$$

из которого следует, что в рассматриваемой модели, определяющим является линейный масштаб. Остальные масштабы вычислялись через линейный масштаб на основе известных физических закономерностей [23,24,25].

При изготовлении и испытании моделей все критерии подобия были выбраны с учетом рекомендаций [25]. Масштаб моделирования соответствовал 1:100. Всего было отработано 80 моделей с различными вариантами жесткости закладочного массива (табл.1).

Число наблюдений n , необходимых для получения достаточно надежных и достоверных результатов, с показателем точности $\varepsilon = 5\%$, было установлено в соответствии с [21], по выражению

$$n = \frac{V_c^2 t_{cm}^2}{\varepsilon^2}, \quad (3)$$

где V_c – коэффициент вариации, используется для определения однородности балки по прочности, $V_c = 80\%$; t_{cm} – критерий Стьюдента, $t=1,96$.

и соответствовало $n \approx 10$.

Таблица 1 – Гранулометрический состав закладочного материала для податливой опоры

Вариант	Размер частиц, мм				
	4,0	3,0	2,0	1,0	<1,0
Базовый	17%	21%	24%	19%	19%
№1	100%	-	-	-	-
№2	50%	-	-	-	50%
№3	30%	-	30%	-	40%
№4	50%	50%	-	-	-
№5	-	50%	50%	-	-
№6	-	-	40%	40%	20%
№7	-	-	-	-	100%

Для определения гранулометрического состава используемой в моделях разрыхленной горной породы, использовали ситовой метод [21,22], позволяющий определить содержание фракций диаметром более 0,1мм. Закладочный массив был представлен разрыхленной породой с частицами различных размеров. Гранулометрический состав такого закладочного материала, который приняли за базовый вариант податливой опоры, представлен в табл.1.

Податливая опора, состоящая из разрыхленной горной породы, характеризуется насыпной массой ρ_n , (кг/м³) и пустотностью M , (%). Эти параметры были определены в соответствии с [27, 28].

В табл.2 представлены экспериментальные данные насыпной массы ρ_n , (кг/м³) разрыхленной горной породы, используемой для податливой опоры в моделях. Из полученных данных (табл.2) видно, что разница между максимальным и минимальным значениями ρ_n , (кг/м³) составляет 16%.

Таблица 2 – Данные экспериментальных исследований определения насыпной массы ρ_n , (кг/м³) разрыхленной горной породы, используемой для закладочного массива – податливой опоры в моделях

Значение	Варианты моделирования							
	Базовый	1	2	3	4	5	6	7
ρ_n , (кг/м ³)	1845	1678	1752	1745	1870	1875	1882	1988

На рис.2 представлена зависимость, отражающая изменение пустотности M , (%) закладочного материала от величины его насыпной массы ρ_n , (кг/м³).

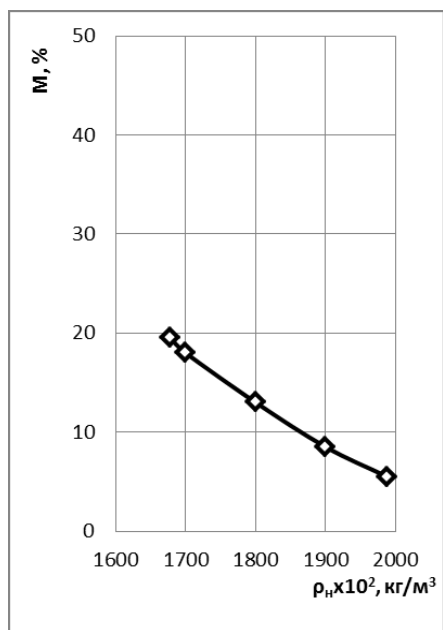


Рис. 2 – Изменение пустотности закладочного материала M , (%) от величины его насыпной массы ρ_n , (кг/м³)

Из приведенной зависимости видно, что насыпная масса ρ_n , (кг/м³) разрыхленной горной породы, увеличивается по мере уменьшения ее пустотности M , (%) (рис.2). Чем меньше размеры частиц породы и чем больше их в общей массе закладочного материала, тем больше жесткость податливой опоры. Очевидно, увеличение насыпной массы происходит за счет уменьшения

доли межзерновых пустот в насыпном объеме закладочного материала, что способствует изменению жесткости податливой опоры. Тем не менее, при проведении экспериментов учитывались результаты проведенных ранее исследований изучения пустотности песка [29]. Тогда было установлено, что пустотность материала, размер зерен которого $d < 0,1$ мм, растет за счет тонкого воздушного сольватного слоя, окружающего зерна. Такой подход определил выбор гранулометрического состава закладочного массива для определения его жесткости C , (Н/м) и диссипативных свойств при испытании моделей (табл.1).

На рис.3 представлены зависимости, отражающие изменение пустотности закладочного массива M , (%) и величины насыпной массы ρ_n , (кг/м³) разрыхленной горной породы от жесткости C , (Н/м) податливой опоры.

При проведении экспериментальных исследований было установлено, что гранулометрический состав закладочного массива влияет на пустотность M , (%) и жесткость C , (Н/м) податливой опоры. Так, наличие 100% в закладочном массиве зерен с размерами частиц $d < 1,0$ мм, обеспечивает жесткость податливой опоры $C=15695$ Н/м при пустотности массива $M=6\%$. Величина насыпной массы при этом соответствует $\rho_n=1988$ кг/м³ (рис.3).

Добавка 20% мелких фракций $d < 1,0$ мм и 40% фракций $d=1,0$ мм к 40% фракций $d=2,0$ мм обеспечивает минимальную жесткость податливой опоры $C=3018$ Н/м при ее пустотности $M=10\%$. Наличие в податливой опоре 100% частиц, размер которых $d=4,0$ мм обеспечивает ее максимальную пустотность $M=20\%$ при жесткости $C=7818$ Н/м и насыпной массе $\rho_n=1678$ кг/м³ (рис.3).

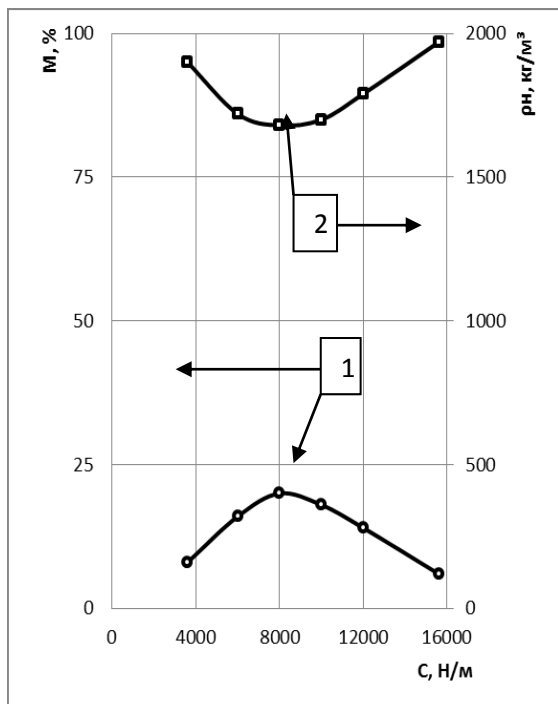


Рис. 3 – Изменение пустотности закладочного массива M , (%) и величины насыпной массы ρ_n , ($кг/м^3$) разрыхленной горной породы от жесткости C , ($Н/м$) податливой опоры: 1 – M , %; 2 – ρ_n , ($кг/м^3$)

Очевидно, это происходит в результате изменения коэффициента внутреннего трения между частицами разрыхленной горной породы в закладочном массиве при различном гранулометрическом составе.

Известно [5,7,24], что задача об ударе тела о шероховатую поверхность при контакте падающего тела с этой поверхностью, имеет решение в пределах теории удара Ньютона. В этом случае необходимо корректно определить величину ударного импульса реакции поверхности удара. Величину такого импульса для рассматриваемой системы, предлагается определять по выражению [7]

$$S = \frac{m_{\delta} \cdot m}{m_{\delta} + m} \cdot V, \quad (4)$$

где V – скорость падения породного блока, м/с; когда с увеличением массы m , (кг) падающего блока на балку, масса которой m_{δ} , (кг) величина ударного импульса S , ($\frac{кг \cdot м}{с}$) увеличивается.

Особенностью ударных нагрузок является то, что при их действии, рассматриваемая система переходит в состояние движения. По этой причине, исследуя ударное воздействие на моделируемую породную балку, с высоты $h=0,3м$ на модель

одноразово сбрасывали груз массой m , (кг), в результате чего балка испытывала перемещения и изгибные деформации. Масса падающего груза изменялась и соответствовала $m=0,192кг$, $m=0,55кг$, $m=0,63кг$, $m=0,92кг$, $m=1,37кг$. Эти перемещения и деформации регистрировались цифровой фотокамерой по фотографическим изображениям с помощью пиксельных координат точек. При этом, с использованием основных принципов фотограмметрии [30], определялись форма, размеры и положение исследуемой модели в пространстве.

Следует отметить, что при испытании моделей, в результате увеличения массы m , (кг) падающего груза, материал балки испытывал изгибные деформации, когда $m \leq 0,55кг$ (рис.4а) или значительные необратимые деформации и разрушался при $m \geq 0,63кг$ (рис.4б). Исходя из этого, научный и практический интерес представляли исследования изгибных колебаний балки массой $m_{\delta}=1,37кг$, когда на нее падал породный блок массой $m=0,55кг$. При этом фиксировался неупругий удар, в процессе которого при соударении твердых тел, имели место изгибные деформации без нарушения целостности балки.

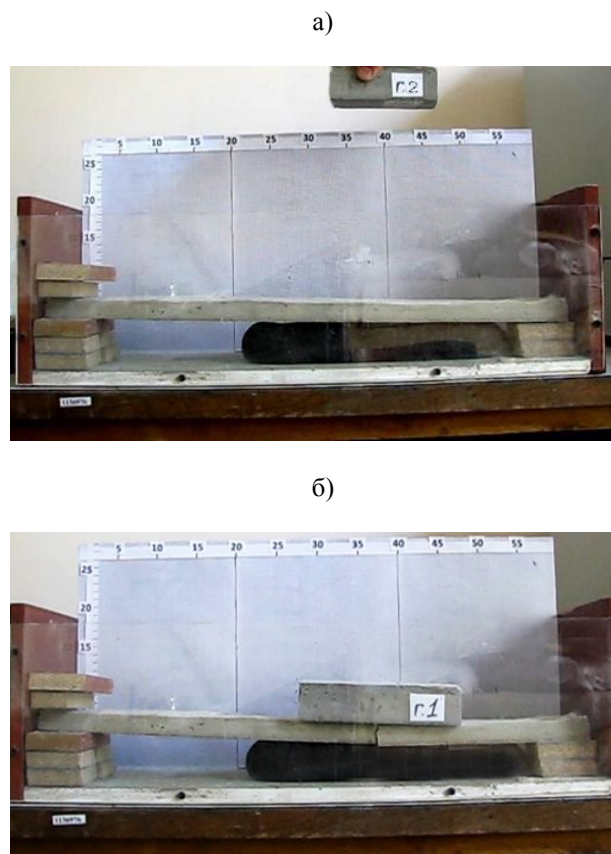


Рис. 4 – Характер взаимодействия на моделях из эквивалентных материалов падающего породного блока различной массы m , (кг) с балкой на податливой опоре жесткостью $C=15695 Н/м$; а) $m=0,55кг$; б) $m=0,92кг$

При испытании моделей, в результате действия внешней силы, нами экспериментально была установлена величина прогиба балки x_0 , (м), которая опиралась на закладочный массив – податливую опору различной жесткости C , (Н/м). Экспериментальные данные по вариантам моделирования представлены в табл.3.

С учетом коэффициента восстановления при ударе, когда $k_v=0$, по экспериментальным данным

была получена зависимость, отражающая изменение величины смещений балки x_0 , (м) от жесткости C , (Н/м) податливой опоры (рис.5).

Из приведенной зависимости видно, что при неупругом ударе с увеличением жесткости закладочного массива с $C=3018$ Н/м до $C=15695$ Н/м, смещения балки уменьшаются в 5,2 раза (рис.5).

Таблица 3 – Экспериментальные данные, полученные в результате падения груза массой $m=0,55$ кг на консольную балку при испытании моделей

Установленные параметры	Ед. изм.	Варианты моделирования							
		Базовый	1	2	3	4	5	6	7
Смещение балки при ударе, x_0	м	0,0042	0,0025	0,0037	0,0036	0,005	0,0058	0,0065	0,00125
Жесткость закладочного массива, C	Н/м	4671	7848	5303	5450	3924	3383	3018	15695

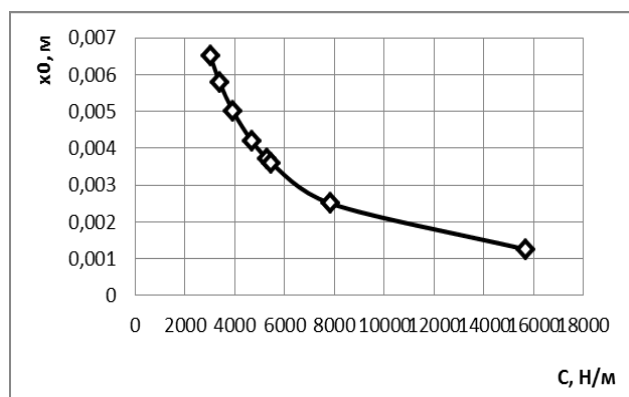


Рис. 5 – Зависимость величины смещений балки x_0 , (м) опирающейся на закладочный массив различной жесткости C , (Н/м) при падении на нее породного блока массой $m=0,55$ кг

При решении задачи о действии динамических нагрузок на систему с податливой опорой, возникает необходимость в определении не только перемещений балки и самой податливой опоры, но и определении амплитуды и частоты собственных колебаний моделируемой системы.

Амплитуда собственных колебаний системы, в таких случаях, определяется как в [8] по выражению

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{k^2}}, \quad (5)$$

где k - круговая частота собственных колебаний системы с учетом затухания, 1/с.

и зависит от величины смещения балки x_0 , (м), скорости падения породного блока $v_0 = \sqrt{2gh}$ и частоты колебаний k , (1/с).

Нами установлено, что в случае неупругого удара, когда $k_v=0$, с увеличением жесткости закладочного массива C , (Н/м), круговая частота колебаний балки k , (1/с) увеличивается (рис.6,а), а амплитуда колебаний A , (м) – уменьшается (рис.6,б). В случае уменьшения величины k , (1/с) перемещения защищаемого объекта стали больше, т.е. больше величина прогиба балки x_0 , (м).

Физический процесс собственных колебаний системы характеризуется ее добротностью D , величина которой определяется по выражению [8,31]

$$D = \pi N_e,$$

где N_e - число полных колебаний, совершаемых системой за время, в течение которого продолжаются собственные колебания.

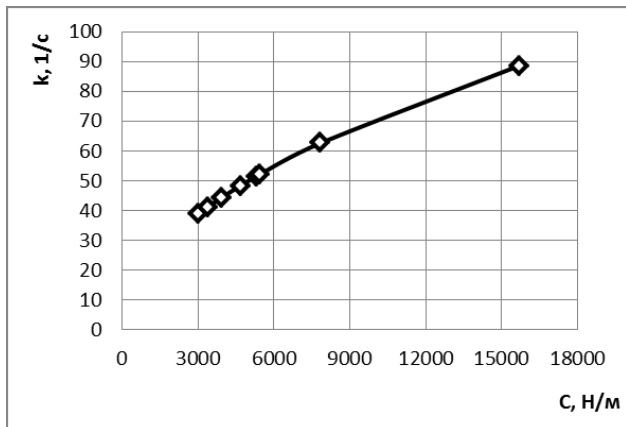
На рис.7 приведена зависимость отражающая изменение величины добротности системы D от жесткости закладочного массива C , (Н/м), из которой видно, что с увеличением C , (Н/м) в 5,2 раза, величина D увеличивается в 2,5 раза. Чем больше добротность колебательной системы D , тем чувствительнее она к воздействию внешней силы и тем больше вероятность появления бифуркации.

Добротность, равная или меньше 0,5 соответствует неколебательному движению, а при $D < 100$ система, с точки зрения изучения колебаний, считается неэффективной [8,32,33].

Модель удара Ньютона не позволяет определить такой важный параметр удара при

обрушении породного блока на балку, как продолжительность контакта между соударяющимися телами.

а)



б)

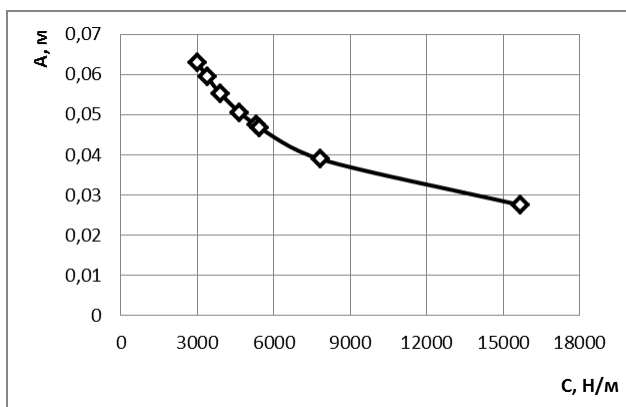


Рис. 6 – Зависимость а) круговой частоты k , (1/с) и б) амплитуды A , (м) колебаний балки от жесткости закладочного массива C , (Н/м)

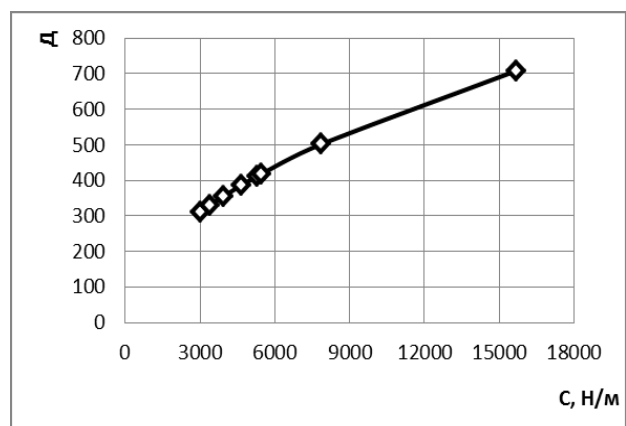


Рис. 7 – Зависимость добротности D рассматриваемой системы от жесткости закладочного массива C , (Н/м)

Тем не менее, промежуток времени $t_{y\delta}$, (с), между моментом приложения действующей силы и достижением максимального прогиба балки в рассматриваемой системе, можно определить по выражению [6]

$$t_{y\delta} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{x_0}{g}}$$

На рис.8а,б представлены экспериментальные зависимости, отражающие изменение промежутка времени $t_{y\delta}$, (с), между моментом приложения внешней силы и достижением максимального прогиба балки x_0 , (м) с учетом амплитуды колебаний A , (м) и жесткости закладочного массива C , (Н/м).

Установлено, что с увеличением жесткости закладочного массива C , (Н/м) промежуток времени $t_{y\delta}$, (с), уменьшается (рис.8а). Однако, при увеличении $t_{y\delta}$, (с), амплитуда колебаний A , (м) растет (рис.8б), а это значит, что наличие податливого основания, с минимальным значением жесткости, способствует смягчению удара.

Известно [34], что в колеблющихся системах при колебаниях, кроме восстанавливающих сил, проявляются силы трения. Последние, совершают необратимую работу, что приводит к диссипации механической энергии, т.е. способности закладочного массива максимально поглощать энергию деформирования.

В качестве количественного показателя оценки демпфирующей способности рассматриваемой системы, предлагается использовать коэффициент диссипации ψ , который определяется по выражению, как в [35]

$$\psi = \frac{W}{E_p}, \quad (7)$$

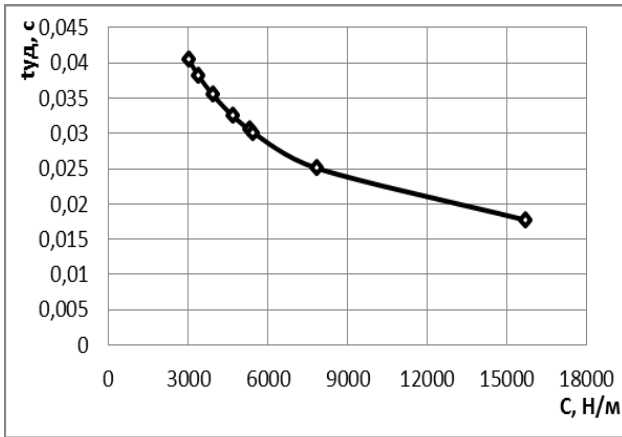
где W - рассеянная за цикл колебания энергия, Дж; E_p - потенциальная энергия системы, Дж.

На рис.9 представлена зависимость, отражающая изменение коэффициента диссипации ψ от жесткости закладочного массива C , (Н/м).

Установлено, что минимальные значения исследуемой нами величины, отмечены при максимальной жесткости C , (Н/м) закладочного массива, когда доля межзерновых пустот в насыпном объеме разрыхленного материала минимальная (рис.9). Очевидно, причиной уменьшения значений коэффициента ψ являются силы, обусловленные внутренним трением в закладочном массиве, когда более мелкая (менее 1,0 мм) и однородная порода, лучше проявляет

демпфирующие свойства опоры. Из этого следует, что значения этого коэффициента зависят от гранулометрического состава закладочного материала.

а)



б)

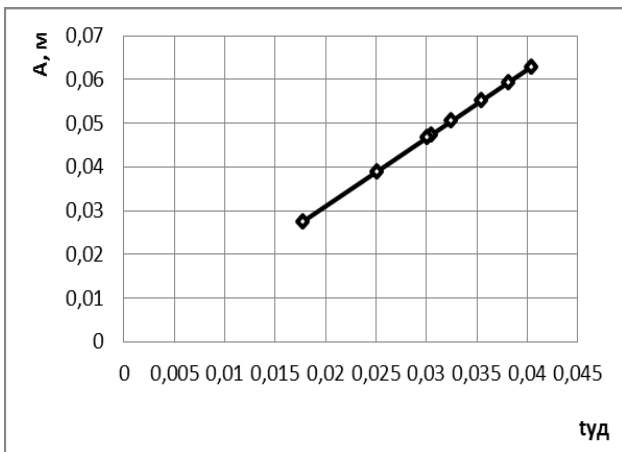


Рис. 8 – Зависимость а) промежутка времени t , (с) между моментом приложения действующей силы и достижением максимального прогиба балки от жесткости закладочного массива C , (Н/м) и б) амплитуды колебания системы A , (м) от промежутка времени t , (с)

Демпфирующая способность закладочного массива приводит к ослаблению собственных колебаний системы, т.е. существенному уменьшению амплитуды и, соответственно, сглаживанию напряжений в зоне их концентрации, т.е. в месте соударения породного блока с балкой, но при определенных значениях жесткости C , (Н/м).

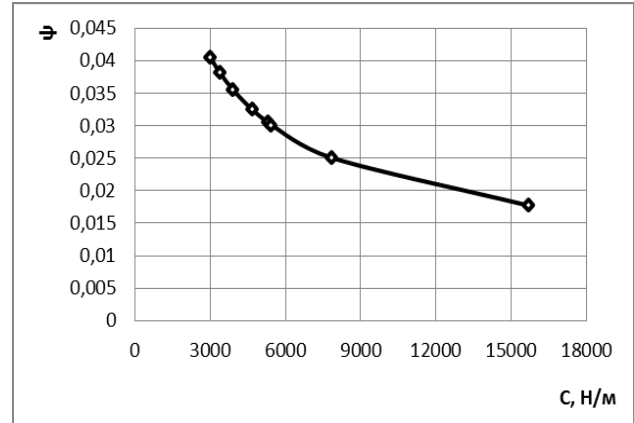


Рис. 9 – Зависимость коэффициента диссипации ψ от жесткости закладочного массива C , (Н/м)

При решении динамических задач, часто используется параметр – коэффициент неупругого сопротивления γ , который представляет собой отношение амплитуды неупругой деформации к величине упругой деформации [11] и определяется по выражению

$$\gamma = \frac{\psi}{2\pi}. \tag{8}$$

Нами установлено, что с увеличением жесткости закладочного массива C , (Н/м), значения коэффициента неупругого сопротивления γ уменьшаются, т.е. при минимальных его значениях демпфирующие свойства податливой опоры улучшаются.

Физической величиной, определяющей характер колебаний при демпфировании, является коэффициент демпфирования, определяемый как в [36,37]

$$\xi = \frac{r}{2mk}, \tag{9}$$

где r - коэффициент силы сопротивления движения, $r=0,3-0,5$ кг/с; m – масса системы, кг.

На рис.10а,б представлены зависимости, отражающие изменение коэффициента демпфирования ξ от жесткости закладочного массива C , (Н/м) и числа заметных колебаний n в рассматриваемой системе.

Из рисунка 10а видно, что с увеличением жесткости опоры C , (Н/м), коэффициент демпфирования ξ уменьшается. Во всех случаях, связанных с изменением жесткости податливой опоры, его значение существенно меньше $\xi < 1$, что свидетельствует о плавном затухании колебаний в рассматриваемой системе. При испытании моделей и

таких значениях коэффициента, колебания массы продолжались с уменьшающейся амплитудой до их полного прекращения. Отмечено, что с увеличением жесткости опоры C , (Н/м), в 5,2 раза увеличивалось количество колебаний в единицу времени ν , (с) и в 2,3 раза число n заметных колебаний (рис.10б).

Так, при испытании моделей, при увеличении жесткости опоры, когда уменьшается ξ за время существования заметных колебаний $t_k=37,17$ с, их число изменялось от $n=230$ до $n=529$. Следовательно, чем меньше значение коэффициента ξ , тем дольше длятся колебания рассматриваемой системы.

Важным показателем демпфирующих свойств закладочного массива является коэффициент потерь η , величина которого зависит от логарифмического декремента затухания колебаний δ и определяется согласно [11], по выражению

$$\eta = \frac{2\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}}. \quad (10)$$

На рис.11а,б представлены зависимости, отражающие изменение коэффициента потерь, с учетом добротности рассматриваемой системы и промежутка времени, между ударом породного блока о балку и достижением ее максимального прогиба.

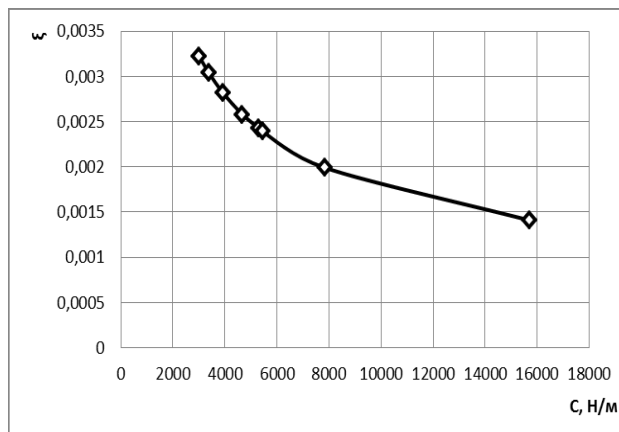
Установлено, что потери энергии в системе будут минимальными в том случае, когда балка опирается на жесткий массив, т.е. при $C=15969$ Н/м. Для данных условий добротность системы принимает максимальные значения $D=708$ (рис.11а). Максимальное значение $\eta=0,0067$ отмечено нами при испытании моделей, когда податливая опора имела жесткость $C=3018$ Н/м. При такой жесткости, промежуток времени, между ударом породного блока о балку и достижением ее максимального прогиба, составляет $t_{уд}=0,04$ с, т.е. для рассмотренных вариантов моделирования является максимальным (рис.11б). Очевидно, чем больше значение $t_{уд}$, (с), тем больше прогиб балки, а, следовательно, система способствует смягчению действия внешней силы (удара).

Движение рассмотренной нами системы в результате испытания моделей происходило с начальной колебательной скоростью $\nu=2,43$ м/с при относительно малой силе сопротивления, которой соответствовал коэффициент затухания колебаний $\beta < k$.

Уравнение движения системы, с учетом затухания колебаний во времени $t=37,17$ с, согласно [8] имеет вид

$$x = Ae^{-\beta t}. \quad (11)$$

а)



б)

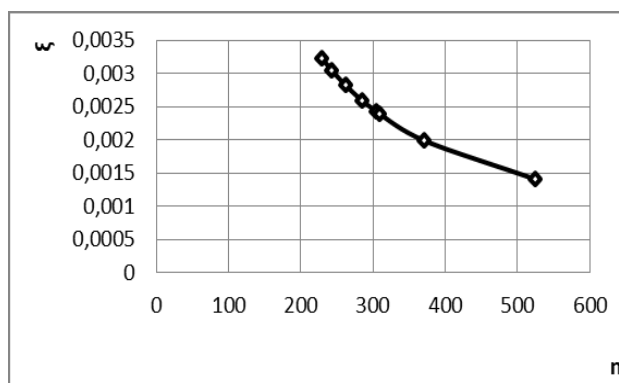


Рис. 10 – Зависимость коэффициента демпфирования ξ от жесткости закладочного массива C , (Н/м) (а) и числа n заметных колебаний (б) в рассматриваемой системе

Графически это выражение можно представить в виде зависимостей, изображенных на рис.12, с учетом минимальной $C=3018$ Н/м (зависимость 1) и максимальной $C=15695$ Н/м (зависимость 2) жесткости закладочного массив. Во всех рассматриваемых случаях зависимость амплитуды колебаний балки от координаты имеет вид убывающей функции.

В случае, когда $x \leq \Delta x$, система попадает в застойную зону и движение прекращается. Величину этой зоны, которая обозначается Δx , (м), в которой реакция податливой опоры равна максимальной силе сопротивления, можно определить по выражению [38]

$$\Delta x = \frac{f \cdot Q}{C},$$

где f – коэффициент сцепления между частицами;

Это отрезок, удаленный от оси O_t на определяемую величину Δx , (м).

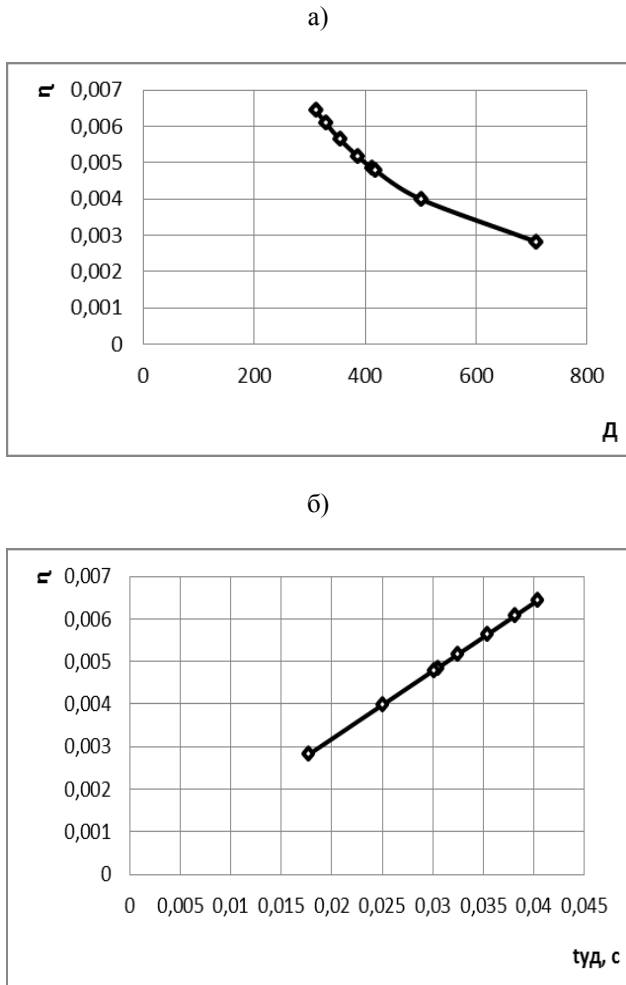


Рис. 11 – Зависимость величины коэффициента потерь η от добротности D рассматриваемой системы (а) и промежутка времени t , (с) между моментом обрушения породного блока и достижением максимального прогиба балки (б)

Из приведенной зависимости видно, чем больше жесткость закладочного массива, тем меньше размеры зоны застоя, а значит больше число заметных колебаний в системе.

Таким образом, система, состоящая из консольной породной балки, которая имеет основание в виде податливой опоры, т.е. закладочный массив и возбужденная начальным толчком при падении на балку породного блока, а затем представленная самой себе, совершает затухающие колебания с частотой, зависящей от жесткости податливой опоры и массы системы. Геометрический параметр x_0 , (м), характеризующий перемещение балки в рассматриваемой системе, определяет ее напряженно-деформированное состояние. При изменении величины этого параметра во времени, вместе с ним изменяются напряжения и деформации. Сопротивляемость системы этим перемещениям оказывает жесткость опоры C , (Н/м), на которую опирается породная балка.

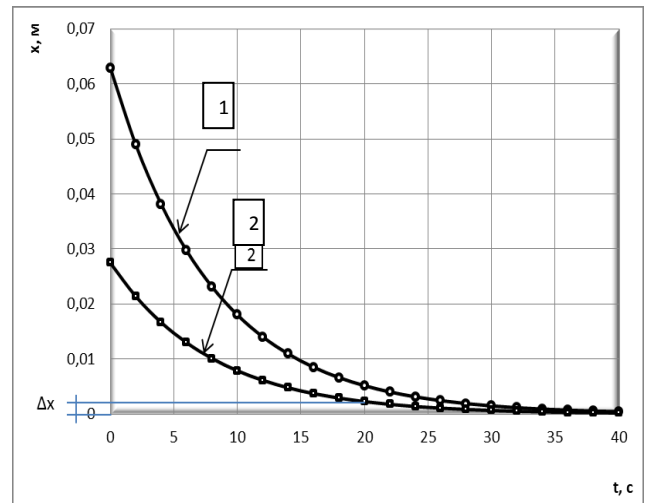


Рис. 12 – Зависимость координаты точки тела x , (м) для консольной балки длиной $L=0,6$ м, опирающуюся на закладочный массив различной жесткости C , (Н/м) при падении породного блока $t=0,55$ с: $\beta=0,12$; 1 – $C=3018$ Н/м; 2 – $C=15695$ Н/м, Δx – размер зоны застоя, м

Эффект ударного воздействия в значительной мере зависит от жесткости основания в рассматриваемой системе и чем она жестче, тем система чувствительнее реагирует на ударные нагрузки и более склонна к разрушению. Максимальная амплитуда колебаний в такой системе, соответствует минимальному значению жесткости закладочного массива, когда насыпная плотность уменьшается, что способствует смягчению удара при падении породного блока.

Диссипативные свойства закладочного массива определяются его гранулометрическим составом и пустотностью, и отражают способность податливой опоры поглощать колебания, вызванные воздействием внешней силы на балку. Это происходит за счет сил внутреннего трения, возникающих в податливой опоре и балке в результате преобразования механической энергии в энергию деформирования или разрушения. Рассматривая закладочный массив как демпфер, при испытании моделей было установлено, что более жесткое основание, пустотность которого менее 6%, при максимальной насыпной плотности ухудшает, а не улучшает условия работы рассматриваемой системы, особенно с точки зрения устойчивости боковых пород при действии на них ударных нагрузок. С увеличением жесткости податливой опоры, рассматриваемая система максимально поглощает энергию деформирования.

Выводы

При изучении изгибных деформаций пород кровли разрабатываемого угольного пласта при способе управления горным давлением в очистном забое закладкой выработанного пространства, обеспечивается ее устойчивое состояние за счет демпфирующей способности податливой опоры, поддерживающей породы кровли позади очистной выработки. Демпфирующая способность закладочного массива играет огромную роль в поведении пород кровли при внезапных обрушениях расслоившейся толщи и посадках основной кровли. Наличие такой способности способствует ослаблению колебаний и сглаживанию напряжений в боковых породах. Для нейтрализации ударных нагрузок к закладочному массиву предъявляются определенные требования, среди которых величина усадки, зависящая от его гранулометрического состава. Гранулометрический состав закладочного массива, его насыпная плотность, определяют диссипативные свойства податливой опоры, обеспечивая при этом устойчивость рассматриваемой системы. Использование податливых опор для поддержания боковых пород позволит сохранить горные выработки в эксплуатационном состоянии весь период их службы, уменьшить вероятность травматизма от обвалов и обрушений расслоившейся породной толщи и сохранить ее сплошность.

Список литературы

1. Андрушко, В. Ф. Управление кровлей в сложных горно-геологических условиях / В. Ф. Андрушко, С. А. Саракитянец, Ю. Г. Спицын – К.: Техника, 1985. – 372 с.
2. Викторов, С. Д. Сдвигение и разрушение горных пород / С. Д. Викторов, М. А. Иофис, С. А. Гончаров. – М.: Наука, 2005. – 277 с.
3. Зборщик, М. П. Механизм повышения устойчивости кровли в лавах при применении закладки выработанного пространства / М. П. Зборщик, С. В. Подкопаев // *Уголь Украины*. – 1992. – № 5. – С. 20-23.
4. Жуков, В. Е. Малоотходная технология добычи угля / В. Е. Жуков, В. В. Выстороп, А. М. Колчин и др. – К.: Техника, 1984. – 144 с.
5. Лапшин, В. В. Удар о поверхность тела с дополнительной опорой / В. В. Лапшин // *Вестник Московского гос.техн.ун-та им Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки*. – 2006. – С. 45-53.
6. Кильчевский, Н. А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар / Н. А. Кильчевский. – К.: Наукова думка, 1976. – 311 с.
7. Тригуб, А. М. Приближенные способы оценки коэффициента восстановления при соударении твердых тел / А. М. Тригуб, Е. В. Штагер // *Современные наукоемкие технологии*. – 2014. - №5. – 1. – С. 91-93.
8. Стрелков, С. П. Введение в теорию колебаний / С. П. Стрелков. – СПб.: Изд-во «Лань», 2005. – 440 с.
9. Meirovitch, L. Fundamentals of Vibrations. Mc Graw-Hill / L. Meirovitch. – 2001. – 806 p.
10. Baddour, N. Recent Advances in Vibration Analysis / N. Baddour. - In Tech., Rijeka, Croatia, 2011. – 236 p.
11. Шакирзянов, Р. А. Динамика и устойчивость сооружений / Р. А. Шакирзянов, Ф. Р. Шакирзянов. – Казань: Изд-во Казанс. гос. архит-стр. ун-та, 2005. – 120 с.
12. Нашиф, А. Демпфирование колебаний / А. Нашиф, Д. Джоунс, Дж. Хендерсон. – М.: Мир, 1988. – 448 с.
13. (Ed.) Advances in Vibration Analysis Research. – In Tech. / F. Ebrahimi. – 2011. – 456 p.
14. Agarwal, R. P. Discrete Oscillation Theory / R. P. Agarwal, M. Bohner, S. R Grace, D. O'Regan. – Hindwai Publishing Corporation, 2005. – 961 p.
15. Мелешко, В. В. Изгибные колебания упругих прямоугольных пластин со свободными краями: от Хладни (1809) и Ритца (1909) до наших дней / В. В. Мелешко, С. О. Попков // *Акустический вестник*. – 2009. – №4, т.12. – с. 34-51.
16. Національний стандарт України. Методи випробування цементу. Частина 1. Визначення міцності (EN 196-1:2005, IDT) ДСТУ EN196-1:2007. Київ, Мінбуд України, 2007. – 30 с.
17. Назаров, А. Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел / А. Г. Назаров. – Ереван, Изд-во АН Арм.ССР, 1965. – 218 с.
18. Борщ-Компониц, В. И. Практическая механика горных пород / В. И. Борщ-Компониц. – М.: Изд-во «Горная книга», 2013. – 322 с.
19. Зубков, А. А. Определение прочности бетона / А. А. Зубков. – М.: Изд-во АСВ, 1998 – 120 с.
20. Дворкин, Л. И. Испытания бетонов и растворов. Проектирование их составов / Л. И. Дворкин, В. И. Гоц, О. Л. Дворкин. – М.: Инфра-Инженерия. 2015. – 418 с.
21. Подкопаев, С. В. Лабораторный практикум по курсу «Механика горных пород» / С. В. Подкопаев, Н. Н. Гавриш, Б. М. Деглин, В. И. Каменец. – Донецк: ДонНТУ, 2012. – 48 с.
22. Порцевский, А. К. Основы физики горных пород, геомеханики и управления состоянием массива / А. К. Порцевский, Г. А. Катков. – М.: Моск.гос. открытый ун-т, 2004. – 120 с.
23. Шенк, Х. Теория Инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 382 с.
24. Чепига, Д. А. О внезапных обрушениях боковых пород при эксплуатации горных выработок / Д. А. Чепига, И. В. Иорданов, А. Э. Кипко и др. // *World Science*. – 2017. - №3(19). Vol.1. – p. 33-37.
25. Бриджмен, П. В. Анализ размерностей / П. В. Бриджмен. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 148 с.
26. Кутателадзе, С. С. Анализ подобия и физические модели / С. С. Кутателадзе. – Новосибирск, Наука, 1982. – 304 с.
27. Механіка гірських порід / Під заг.ред. С. С. Гребьонкіна, М. М. Гавриша. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – 169 с.
28. Ильницкая, Е. И. Свойства горных пород и методы их определения / Е. И. Ильницкая. – М.; Недра, 1969. – 392 с.

29. **Коробкин, В. И.** Инженерная геология и охрана окружающей среды / **В. И. Коробкин, Л. В. Передельский.** – Ростов-на-Дону: Изд-во Рос. ун-та, 2013. – 348 с.
30. **Обиралов, А. И.** Фотограмметрия / **А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Н. А. Гаврилова.** – М.: Колос С, 2004. – 240 с.
31. *Vibration and Shok Handbook*.L.; Hutchinson, 2000. – 240 p.
32. **Bottega, W. J.** Engineering Vibrations / **W. J. Bottega.** – CRC Press, Taylor&Francis Group, 2006. – 727 p.
33. **Butikov, E. I.** Physic of Oscillation. Useris Manual. American Institute of Physics, Physics Academic Software / **E. I. Butikov.** – New York, 1996. – 120 p.
34. **Ginsberg, I.** Engineering Dynamics. Cambridge University Press / **I. Ginsberg.** – 2008. – 726 p.
35. **Палочкин, С. В.** Экспериментальные исследования демпфирования колебаний в текстильных паковках с крестовой намоткой нити / **С. В. Палочкин, Н. Ю. Лабай, П. Н. Рудовский** // *Технология текстильной промышленности.* – 2015. – №3 (357). – С. 141-145.
36. **Баженов, В. А.** Численные исследования динамических процессов в виброударных системах при моделировании удара силой контактного взаимодействия / **В. А. Баженов, О. С. Погорелова, Т. Г. Постникова и др.** // *Проблемы прочности.* – 2008. – №6. – С. 82-90.
37. **Ковалева, Н. В.** Определение оптимальных параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции / **Н. В. Ковалева, Ю. Л. Рутман, Г. В. Давыдова** // *Инженерно-строительный Журнал. Magazine of Civil Engineering.* – 2013. – №5. – с. 107-115.
38. **Яблонский, С. А.** Курс теории колебаний / **С. А. Яблонский, С. С. Нореико.** – М.: Изд-во ВВУ, 2007. – 336 с.
7. **Trigub, A. M., Shtager, E. V.** Priblizhennyye sposoby ocenki koefficienta vosstanovleniya pri soudarenii tverdyh tel [Approximate methods for estimating the recovery coefficient for a collision of solids]. *Sovremennyye naukoemkie tehnologii*, 2014, 5(1), 91-93.
8. **Strelkov, S. P.** Vvedenie v teoriyu kolebanij [Introduction to the theory of oscillations]. - SPb.: Izd-vo «Lan», 2005, 440.
9. **Meirovitch, L.** Fundamentals of Vibrations. Mc Graw-Hill, 2001, 806.
10. **Baddour, N.** Recent Advances in Vibration Analisic. - In Tech., Rijeka, Croatia, 2011, 236.
11. **Shakirzjanov, R. A., Shakirzjanov, F. R.** Dinamika i ustojchivost' sooruzhenij [Dynamics and stability of structures]. Kazan': Izd-vo Kazans. gos. arhit-str. un-ta, 2005, 120.
12. **Nashif, A., Dzhouns, D., Henderson, Dzh.** Dempfirovanie kolebanij [Oscillation damping]. M.: Mir, 1988, 448.
13. **Ebrahimi, F.** Advances in Vibration Analisic Research. - In Tech, 2011, 456.
14. **Agarwal, R. P., Bohner, M., Grace, S. R., O'Regan, D.** Discrete Oscillation Theory. Hindwai Publishing Corporation, 2005, 961.
15. **Meleshko, V. V., Popkov S. O.** Izzibnye kolebanija uprugih prjamougol'nyh plastin so svobodnymi krajami: ot Hladni (1809) i Ritca (1909) do nashih dnei [Bending oscillations of elastic rectangular plates with free edges: from Hladni (1809) and Ritz (1909) to the presen], *Akusticheskij vestnik*. 2009, 4(12), 34-51.
16. Nacional'nij standart Ukraïni. Metodi viprobuvannya cementu. Chastina 1. Viznachennja micnosti [The national standard of Ukraine. Methods viprobuvannya cement. Part 1. Viznachennya micnostnosti] (EN 196-1:2005, IDT) DSTU EN196-1:2007. Kiïv, Minbud Ukrïni, 2007, 30.
17. **Nazarov, A. G.** O mehanicheskom podobii tverdyh deformiruemyyh tel [On the mechanical similarity of solid deformable bodies]. Erevan, Izd-vo AN Arm.SSR, 1965, 218.
18. **Borshh-Komponiec, V. I.** Prakticheskaja mehanika gornah porod [Practical mechanics of rock formations]. M.: Izd-vo «Gornaja kniga», 2013, 322.
19. **Zubkov, A. A.** Opređenje prochnosti betona [Determination of strength of concrete]. M.; Izd-vo ASV, 1998, 120.
20. **Dvorkin, L. I., Goc, V. I., Dvorkin, O. L.** Ispytanija betonov i rastvorov. Proektirovanie ih sostavov [Tests of concrete and mortar. Designing their compositions]. M.: Infra-Inzhenerija, 2015, 418.
21. **Podkopaev, S. V., Gavrish, N. N., Deglin, B. M., Kamenev, V. I.** Laboratornyj praktikum po kursu «Mehanika gornyyh porod» [Laboratory workshop on the course "Mechanics of rocks"]. Doneck: DonNTU, 2012, 48.
22. **Porcevskij, A. K., Katkov, G. A.** Osnovy fiziki gornyyh porod, geomehaniki i upravlenija sostojaniem massiva [Fundamentals of rock physics, geomechanics and array state management] – M.: Mosk.gos. otkrytyj un-t, 2004, 120.
23. **Shenk, H.** Teorija Inzhenernogo jeksperimenta [Theory of Engineering experiment]. M.: Mir, 1972, 382.
24. **Chepiga, D. A., Iordanov, I. V., Kipko, A. Je.** O vnezapnyh obrushenijah bokovyh porod pri jekspluatácii gornyyh vyrabotok [On the sudden collapse of lateral

Bibliography (transliterated)

1. **Andrushko, V. F., Sarakitjanc, S. A., Spicyn, Ju. G.** Upravlenie krovlej v slozhnyh gorno-geologicheskikh uslovijah [Control of the roof in difficult mining and geological conditions]. K.: Tehnika, 1985, 372.
2. **Viktorov, S. D., Iofis, M. A., Goncharov, S. A.** Sdvizhenie i razrushenie gornyyh porod [Shift and destruction of rocks]. M.: Nauka, 2005, 277.
3. **Zborshhik, M. P., Podkopaev, S. V.** Mehanizm povyshenija ustojchivosti krovli v lavah pri primenenii zakladki vyrabotannogo prostranstva [The mechanism of increasing the stability of the roof in lavas with the use of a bookmark of worked-out space]. *Ugol' Ukrainy*, 1992, 5, 20-23.
4. **Zhukov, V. E., Vystorop, V. V., Kolchin, A. M.** Maloothodnaja tehnologija dobychi uglja [Low-waste coal mining technology]. K.: Tehnika, 1984, 144.
5. **Lapshin, V. V.** Udar o poverhnost' tela s dopolnitel'noj oporoy [Impact on the surface of the body with an additional support] *Vestnik Moskovskogo gos.tehn.un-ta im N.Je. Baumana. Serija: Estestvennyye nauki*, 2006, 45-53.
6. **Kil'chevskij, N. A.** Dinamicheskoe kontaktnoe szhatie tverdyh tel. Udar [Dynamic contact compression of solids. Strike]. K.: Naukova dumka, 1976, 311.

- rocks during the exploitation of mine workings]. *World Science*, 2017, 3(19),1, 33-37.
25. **Bridzhmen, P. V.** Analiz razmernostej [Analysis of dimensions]. Izhevsk: NIC «Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika», 2001, 148.
26. **Kutateladze, S. S.** Analiz podobija i fizicheskie modeli [Similarity analysis and physical models]. Novosibirsk: Nauka, 1982, 304.
27. Pid zag.red. **Greb'onkina, S. S., Gavrisha. M. M.** Mehanika girs'kih porid [Mechanics of rocks]. Donec'k: DonNTU, 2004, 169.
28. **Il'nickaja, E. I.** Svojtva gornyh porod i metody ih opredelenija [Properties of rocks and methods for their determination]. M.: Nedra, 1969, 392.
29. **Korobkin, V. I., Peredel'skij, L. V.** Inzhenernaja geologija i ohrana okruzhajushhej sredy [Engineering geology and environmental protection]. Rostov-na-Donu: Izd-vo Ros. un-ta, 2013, 348.
30. **Obiralov, A. I., Limonov, A. N., Gavrilova, N. A.** Fotogrammetrija [Photogrammetry]. M.: Kolos S, 2004, 240.
31. Vibration and Shok Handbook.L.; Hutchinson, 2000, 240p.
32. **Bottega, W. J.** Engineering Vibration. CRC Press, Taylor&Francis Group, 2006, 727.
33. **Butikov, E. I.** Physic of Oscillation. Useris Manual. American Institute of Physics, Physics Academic Software. New York, 1996, 120.
34. **Ginsberg, I.** Engineering Dynamics. Cambridge University Press, 2008, 726.
35. **Palochkin, S. V., Labaj, N. Ju., Rudovskij, P. N.** Jeksperimental'nye issledovanija dempfirovanija kolebanij v tekstil'nyh pakovkah s krestovoj namotkoj niti [Experimental studies of vibration damping in textile packages with cross winding of filaments]. *Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti*, 3(357), 2015, 141-145.
36. **Bazhenov, V. A., Pogorelova, O. S., Postnikova, T. G.** i dr. Chislennye issledovanija dinamicheskikh processov v vibroudarnyh sistemah pri modelirovanii udara siloj kontaktного vzaimodejstvija [Numerical studies of dynamic processes in vibro-impact systems in the simulation of impact by the force of contact interaction]. *Problemy prochnosti*, 2008, 6, 82-90.
37. **Kovaleva, N. V., Rutman, Ju. L., Davydova, G. V.** Opredelenie optimal'nyh parametrov dempfirovanija v sistemah sejsmoizoljacji [Determination of optimal damping parameters in seismic isolation systems] *Inzhenerno-stroitel'nyj Zhurnal. Magazine of Civil Engineering*, 5, 2013, 107-115.
38. **Jablonskij, S. A., Norejko, S. S.** Kurs teorii kolebanij [Course of the theory of oscillations]. M.: Izd-vo BHV, 2007, 336.

Сведения об авторах (About authors)

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 Jordanov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Applicant, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: gendir@eme.kiev.ua.

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.

Коломиец Владимир Алексеевич – инженер, директор шахтоуправления «Южнодонбасское №1», г.Угледар, Украина; e-mail: ugnodon1@gmail.com.

Volodymyr Kolomiets – engineer, director of mine management "Yuzhnodonbasskoe №1", Ugleдар, Ukraine; e-mail: ugnodon1@gmail.com.

Подкопаев Евгений Сергеевич – инженер кафедры горного дела и геологии, Силезский технический университет, г.Гливице, Польша; e-mail: podkopaev_evgeniy@mail.ru.

Yevhen Podkopaiev – engineer of the Department of Mining and Geology, Silesian Technical University, Gliwice, Poland; e-mail: podkopaev_evgeniy@mail.ru.

Король Антон Витальевич – инженер, ПСП «Шахтоуправление «Добропольское» ООО «ДТЭК Добропольеуголь»», г.Доброполье, Украина; e-mail: akorolv2017@gmail.com.

Anton Korol – engineer, Municipal Enterprise "Mine management "Dobropolskoe", LLC "DTEK Dobropolyeugol", Dobropole, Ukraine; e-mail: akorolv2017@gmail.com.

Довгаль Виталий Юрьевич – инженер, Шахтоуправление «Мирноградуголь», г.Мирноград, Украина; e-mail: vud007007@gmail.com.

Vyalyi Dovhal – engineer, Mine management "Mirnogradugol", Mirnograd, Ukraine; e-mail: vud007007@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Иорданов, И. В. О влиянии изгибных деформаций на состояние кровли угольного пласта при внезапных обрушениях породной толщи / **И. В. Иорданов, Д. А. Чепига, В. А. Коломиец, Е. С. Подкопаев, А. В. Король, В. Ю. Довгаль** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 27-40. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.05.

Please cite this article as:

Iordanov, I., Chepiga, D., Kolomiets, V., Podkopaiev, Y., Korol, A., Dovhal, V. On the influence of bending deformations on the condition of the roof of a coal plast with extremely breaks of brown thickness. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 27-40, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.05.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Иорданов, И. В. Про вплив згибних деформацій на стан покрівлі вугільного пласта при різких обваленнях породної товщі / **И. В. Иорданов, Д. А. Чепіга, В. А. Коломієць, Є. С. Подкопась, А. В. Король, В. Ю. Довгаль** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 16 (1292). – С. 27-40. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.05.

АНОТАЦІЯ Експериментально встановлено, що демпфуюча здатність закладного масиву, який є піддатливою основою для покрівлі вугільного пласта при його розробці, робить істотний вплив на поведінку бічних порід в околиці гірничої виробки при раптових обваленнях розширеної товщі або посадках основної покрівлі. В результаті дії на покрівлю зовнішньої сили, при порожнистості закладного масиву $M \leq 20\%$, коли забезпечується його мінімальна жорсткість, амплітуда коливань розглянутої системи стає максимальною. Доведено, що при збільшенні жорсткості закладного масиву в 5 разів, коли його порожнистість зменшується, а насипна щільність збільшується, розглянута система максимально поглинає енергію деформування. В таких умовах збільшується її добротність, число фіксованих коливань і зменшується проміжок часу, між моментом докладання зовнішньої сили і досягненням максимального прогину покрівлі, а сама система стає більш чутливою до впливу такої сили і руйнування. Коефіцієнт демпфування при цьому, характеризує темп відносного загасання коливань в одиницю часу і залежить від амплітуди коливань. Більш жорстка основа закладного масиву, порожнистість якого $M \leq 6\%$, погіршує стійкість даної системи, а для нормального її функціонування необхідно, щоб закладний масив складався з неоднорідних за розміром частинок розпушеної гірської породи або мав порожнистість $M = (9-20)\%$ при зменшенні насипної щільності.

Ключові слова: демпфуюча здатність; обвалення; порожнистість; закладний масив; піддатлива опора.

Поступила (received) 24.04.2018

УДК 621.039.56

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.06

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСТИРАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ИОНИЗИРУЮЩЕМ ИЗЛУЧЕНИИ

А. И. КОМИР¹, Н. П. ОДЕЙЧУК¹, В. И. ТКАЧЕНКО^{1,2*}

¹ НПК «ВИЭРТ», Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, УКРАИНА

² ФЭФ, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, УКРАИНА

*email: tkachenko@kipt.kharkov.ua

АННОТАЦИЯ Для анализа пылеобразования при истирании однотипных углеродных материалов выполнены их трибологические испытания при температурах 400-600 °С в окислительной среде под воздействием ионизирующего излучения. Показано, что скорость увеличения массы порошка графита в логарифмическом масштабе пропорциональна температуре испытаний. Определено, что при температурах испытаний и под воздействием электронного пучка графиты марки МПГ подвержены истиранию в большей степени, чем графиты марок АРВ, ГСП, УУКМ. Установлено, что для пор диаметром порядка микрона износ меньше, чем для наноразмерных пор. Показано, что для наноразмерных пор истираемость пропорциональна их размеру. Предложена физическая модель истирания углеродных материалов.

Ключевые слова: ядерный графит; трибологические испытания; окисление; электронные пучки; истирание

TRIBOLOGICAL TESTS AND PHYSICAL MODEL OF ERASING OF CARBON MATERIALS IN THE OXIDATIVE MEDIUM AT HIGH TEMPERATURES AND IONIZING RADIATION

А. КОМИР¹, А. ОДЕЙЧУК¹, В. ТКАЧЕНКО^{1,2*}

¹ SPE «RESST», National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology», Kharkiv, UKRAINE

² School of Physics and Energy, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT In this paper, we describe the tribological tests of carbon materials at high temperatures (400-600 °C), in an oxidizing medium and under the influence of ionizing radiation. The aim of the study is to analyze the dust formation during erasing of the same type of graphite samples. In experiments used the method developed earlier, a rapid analysis of the dependence of the change in mass of graphite powder on attrition time was carried out. It is shown that, on a logarithmic scale, the rate of change in mass of the graphite powder can be considered as linear dependence on temperature. It has been experimentally determined that with increase of experiments temperature, and under the influence of the electron beam, the graphite of MPG grade is most vulnerable to erasing wear. Grades of graphite ARV, GSP, UUKM have less wear compared to grade of graphite MPG. It is concluded that for pores of large diameters (of the order of a micron) wear is less than for nanoscale pores. It is shown that in nano-sized range of pores the smaller the pore size, the less the erasing. On the basis of the experimental data obtained, a physical model is proposed for describing the time dynamics of reactor graphites erasing at different temperatures and under the influence of an electron beam. The physical model of nuclear graphite erasing is based on a simplified scheme of reactor graphite attrition process, which considers the process of destruction of graphites in contact boundary layer with a thickness of order of the double mean diameter of the prevailing pores. Under the assumption of an insignificant change in temperature as a result of friction, as well as the effect of an electron beam, an equation for the change in the mass of the graphite powder in time is obtained.

Keywords: nuclear graphite; tribological tests; oxidation; electron beams; erasing

Введение

Проблема истирания ядерного графита привлекает пристальный интерес исследователей в связи с необходимостью обеспечения длительного, безаварийного его использования в конструктивных материалах ядерной энергетики. К настоящему времени эта проблематика является актуальной, но недостаточно хорошо изученной [1, 2].

Для определения истираемости реакторных графитов в активной зоне ядерного реактора предпочтительным методом исследования являются реакторные испытания, т.к. они являются наиболее объективными и приближенными к реальным условиям. Однако, в то же время, они являются и

самыми дорогостоящими. Поэтому перед исследователями стоит задача проведения экспрессных исследований трибологических свойств реакторных графитов на более доступной, и экономически выгодной основе. В качестве методики, и способной замедлить реакторные испытания предложена методика, в которой исследуемые образцы подвергаются истиранию при высоких температурах в окислительной среде и при воздействии электронного пучка [3]. Роль электронного пучка заключается в обеспечении эффектов, связанных, например, с уменьшением энергии активации окислительных процессов, а также с увеличением скорости диффузии дефектов.

Разработанный и описанный в [3] стенд позволяет проводить трибологические испытания с одновременным воздействием на исследуемые образцы высокой температуры, окислительной среды и ускоренных электронов.

Цель работы

Целью работы является проведение трибологических испытаний и создание модели истирания углеродных материалов при высоких температурах (400-600 °С), в условиях окислительной среды и при воздействии ионизирующего излучения.

Экспериментальная установка и результаты опытов

Трибологические испытания углеродных материалов проводились в потоке кислорода при давлении 0,1 МПа при нагрузке 29,4 Н, которая осуществлялась с помощью калиброванного груза. Скорость вращения истирающего образца составляла 30 об./мин (47,1 мм/с пройденного пути).

Точность измерения температуры при использовании термопар хромель-алюмель составляла $\pm 2,5$ °С. Термопары помещены в истираемый и истирающий образцы и закреплены вблизи области облучения. Такая схема размещения термопар обеспечивает достаточный контроль температуры образцов, в том числе и температуры вблизи площади контакта, на которую был сфокусирован электронный пучок. Температура испытаний образцов охватывает интервал от 400 °С до 600 °С.

Взвешивание образцов производилось с помощью аналитических весов АД-200, точность взвешивания – 0,5 мг. Линейные размеры образцов измерялись с помощью штангельциркуля 0-200 мм, точность измерения – 0,05 мм, микрометра 0-25 мм, точность измерения – 0,01 мм.

Исследование коррозионных и трибологических свойств углеродных материалов проводилось в потоке кислорода в течение 1 и 3 часов при параметрах пучка электронов: энергия электронов – 2,5 МэВ, ток пучка электронов – до 1000 мкА.

Для исследования коррозионных и трибологических свойств углеродных материалов по описываемой методике использовались экспериментальные образцы (размер 2х3х40 мм) следующих марок графитов и композиционных материалов: АРВ (плотность 1,63 г/см³), МПГ (плотность 1,69 г/см³), ГСП (плотность 1,77 г/см³) и УУКМ (плотность 1,49 г/см³).

В Таблице 1 приведены результаты по износу указанных углеродных материалов в кислороде без облучения и при облучении электронами при температуре 400 °С и 600 °С в течение 1 часа.

Как видно из данных Таблицы 1, облучение электронами увеличивает скорость износа углеродных материалов в кислороде при температуре

400 °С в 3-4 раза в режиме «трение со скольжением», а при температуре 600 °С – на один-два порядка в режиме «трение с большим износом», по сравнению со скоростью износа при 400 °С без облучения. Это обусловлено, как влиянием окислительной среды (кислород), так и структурными изменениями в углеродных материалах, обусловленные влиянием ионизирующего излучения (электроны).

Наличие структурных изменений, связанных с воздействием ионизирующего излучения, подтверждено рентгеноструктурными исследованиями, проведенными на исходных и облученных образцах [4].

Таблица 1 – Удельная скорость износа графитовых образцов при облучении электронами в кислородной среде при разных температурах

Материал / ρ - плотность (г·см ⁻³)	Удельная скорость износа, $\times 10^{-5}$ мг/(мм ² ·с)		
	$T_{\text{экспер.}} \sim$ 400 °С	$T_{\text{экспер.}} \sim$ 400 °С	$T_{\text{экспер.}} \sim$ 600 °С
МПГ / 1,69	0,12	0,45	35,6
АРВ / 1,63	0,69	2,60	3,70
ГСП / 1,77	3,39	10,2	36,6
УУКМ / 1,49	2,81	11,7	176,8

* Без облучения

Площадь контакта истираемого образца равна $S_0 = 3 \times 2 = 6$ мм², где первая и вторая цифры соответствуют длине и ширине образца. При радиусе цилиндрического истирающего тела 60 мм, испытание на истирание можно рассматривать в плоской геометрии, т.е. границу контакта считать плоской.

Плоская граница контакта истираемого и истирающего графитов характеризуется существенной неровностью отдельных ее участков.

Упрощенная схема и физическая модель истирания реакторного графита

Для простоты рассмотрения полагаем, что высота и расстояние таких отклонений от плоскости сравнимы и определяются максимальной величиной диаметра преобладающих пор, т.е. размером макропор [5].

Например, для реакторных графитов АХФ, IG - 50, АТJ преобладающий максимальный размер пор составляет величину $d = 0,55$ мкм, $d = 1,04$ мкм, $d = 4,71$ мкм соответственно [6].

По данным [7], при давлении прессования 1 МПа средний радиус преобладающих пор, в зависимости от гранулометрического состава, составляет величину от 5,8 мкм (непрерывный гранулометрический состав) до 11,2 мкм (монофракция).

Процесс разрушения графитов при трении с образованием порошка происходит в контактном пограничном слое (КПС) толщиной порядка двойного среднего диаметра преобладающих пор. Обобщая данные [6, 7], будем считать толщину КПС равной нескольким микронам.

В контактном слое трущихся участков реакторного графита, несмотря на малое приложенное давление P : $P \ll E$, где E – модуль продольной упругости реакторного графита, наблюдается процесс его деформации и разрушения. Такое разрушение трущихся поверхностей графита может быть объяснено, по-видимому, эффектом, аналогичным квазиплавлению малых металлических частиц [8].

Упрощенная схема процесса истирания реакторного графита приведена на Рис. 1.

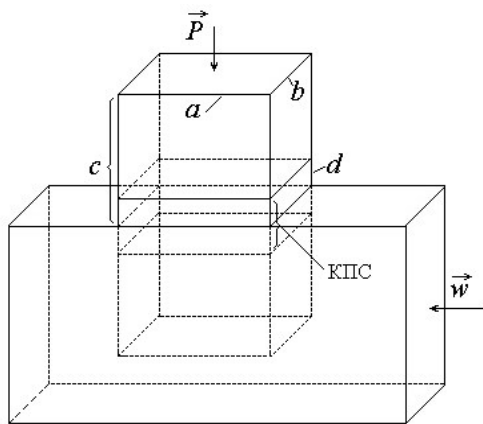


Рис. 1 – Схематическое изображение процесса истирания реакторного графита

Исходя из приведенной на Рис. 1 схемы, сформулируем физическую модель истирания реакторного графита. Для этого определим изменение в единицу времени массы истираемых образцов объема V_0 :

$$\frac{dm}{dt} = \frac{M}{V_0} w S_{\perp}, \quad (1)$$

где $M = 2(M_0 - m)$ – масса двух одинаковых истираемых образцов графита с общим объемом $V_0 = 2abc$, M_0 – начальная масса истираемого образца, m – масса порошка графита, образуемого одним образцом, $S_{\perp} = 2bd$ – поперечная к направлению скольжения площадь образцов графитов, $b = 2$ мм – ширина истираемого образца графита, c – высота истираемого образца графита, $d (d \ll c)$ – преобладающий максимальный диаметр пор, $w = 47,1$ мм/с – скорость истирающего образца графита.

Из (1) получим уравнение изменения массы порошка во времени:

$$\frac{dm^*}{dt^*} = 2(1 - m^*) \frac{wt_0 d}{ac}, \quad (2)$$

где $m^* = \frac{m}{M_0}$ – безразмерная масса порошка графита, $t^* = \frac{t}{t_0}$ – безразмерное время, $t_0 = 1$ с. Решение уравнения (2) имеет вид:

$$m^* = (1 - \exp(-\lambda t^*)), \quad (3)$$

$$\lambda = 2 \frac{wt_0 d}{ac}$$

Из (3) следует, что масса порошка графита с течением времени изменяется от нуля, и стремится к начальной массе образца, т.е. исходные образцы графита истираются полностью.

Скорость изменения массы порошка графита определяется выражением:

$$\frac{dm^*}{dt^*} = 2(1 - m^*) \frac{wt_0 d}{ac} = \lambda \exp(-\lambda t^*). \quad (4)$$

Используем выражение (4) для интерпретации приведенных выше результатов трибологических испытаний графитовых образцов при облучении электронами в кислородной среде при температуре 400 °С и 600 °С в течение 1 часа.

При этом необходимо отметить следующие два фактора.

Первый фактор. При трибологических испытаниях температура поверхности соприкосновения может отличаться в большую сторону от поддерживаемой в эксперименте из-за работы силы трения поверхностей, а также экзотермичности реакции окисления углерода [9].

Однако это отличие по температуре во всех опытах являлось малым и одного порядка. Поэтому в дальнейших расчетах его можно не учитывать.

Второй фактор. Влияние сфокусированного на поверхность истирания электронного пучка может приводить также к отклонению заданной температуры в большую сторону. Однако и это отклонение мало в силу высокой теплопроводности реакторного графита, и отсутствия, в рамках допустимых погрешностей, отклонения температуры опытов от заданной.

Учтем влияние температуры опыта на истираемость исследуемых образцов.

В выражении (4) единственным, зависящим от температуры опыта параметром, является средний диаметр преобладающих пор $d = d(T)$. Поэтому переопределим параметр λ , выделив в нем

зависимость от температуры в виде:

$\lambda = 2 \frac{wt_0 d_{T_0}}{ac} \frac{d}{d_{T_0}} = \lambda_{T_0} \frac{d}{d_{T_0}}$, где d_{T_0} – средний характерный диаметр преобладающих пор.

Будем интересоваться в первую очередь случаем, когда масса образованного порошка значительно меньше массы исходного графита. Это означает, что в правой части исходного уравнения (4) можно пренебречь m^* по сравнению с единицей. Тогда (4) принимает вид:

$$\frac{dm^*}{dt^*} = 2 \frac{wt_0 d}{ac} = \lambda_{T_0} \frac{d}{d_{T_0}}. \quad (5)$$

Прологарифмируем выражение (5), и выделим зависимость от температуры:

$$\ln\left(\frac{dm^*}{dt^*}\right) = \ln(\lambda_{T_0}) + \ln\left(\frac{d}{d_{T_0}}\right). \quad (6)$$

Известно, что средний коэффициент линейного расширения увеличивается с ростом температуры [10]. Поэтому полагаем, что средний диаметр пор также увеличивается с ростом температуры по закону $d(T) = d_{T_0} \exp\left(\alpha \frac{T - T_0}{T_0}\right)$, где α – константа, T_0 – температура опыта.

С учетом сделанного предположения, выражение (6) принимает вид:

$$\ln\left(\frac{dm^*}{dt^*}\right) = \ln(\lambda_{T_0}) + \ln\left(\frac{d}{d_{T_0}}\right) = \ln(\lambda_{T_0}) + \alpha \frac{T - T_0}{T_0} = \beta + \alpha \frac{T}{T_0}. \quad (7)$$

где $\beta = \ln(\lambda_{T_0}) - \alpha$.

Из (7) следует, что в логарифмическом масштабе скорость изменения массы порошка графита линейно зависит от температуры.

Обсуждение полученных результатов

Вывод о линейной зависимости от температуры изменения массы порошка графита хорошо согласуется с изображенными на Рис. 2 экспериментальными данными, взятыми из Таблицы 1.

На Рис. 2 разными маркерами показаны экспериментально полученные данные зависимости скорости изменения массы порошка графита от температуры для разных марок графитов.

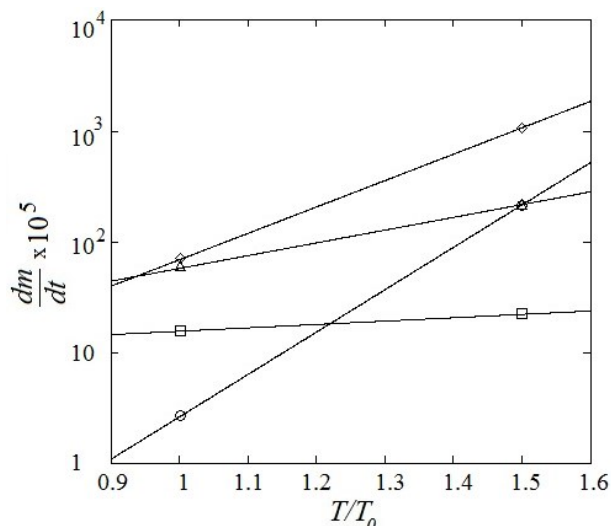


Рис. 2 – Зависимость скорости изменения массы порошка графита для марок графитов: \circ – МПГ; \square – АРВ; Δ – ГСП; \diamond – УУКМ

Прямые линии на Рис. 2 соответствуют определяемой выражением (7) аналитической интерпретации экспериментальных данных. Методом подгонки прямых линий к экспериментальным точкам определены константы, задающие расположение прямых на плоскости (см. Таблицу 2).

Из Рис. 2 следует, что с увеличением температуры опытов, и при воздействии электронного пучка, из указанных марок графитов наиболее подвержены износу на истирание графиты марки МПГ. Остальные марки графитов (АРВ, ГСП, УУКМ) имеют износ, меньший по сравнению с маркой графита МПГ. С повышением температуры опыта увеличение износа для тестируемых марок графитов, как показано в [11], связано с изменением режима трения со скольжением на режим трения с большим износом.

В абсолютном измерении, как это следует из Рис. 2, скорость износа марок графитов на истирание с увеличением температуры возрастает в порядке следования: АРВ, ГСП, УУКМ.

Таблица 2 – Параметры аналитической аппроксимации зависимости скорости изменения массы порошка графита от температуры опыта

Материал	Аналитическая аппроксимация: $\frac{dm}{dt} \times 10^5 = 2w\rho b d_{T_0} e^{-\alpha} e^{\alpha \frac{T}{T_0}}$ (мг/с)	
	α	d_{T_0} (мкм)
МПГ	8,8	$8,3 \cdot 10^{-2}$
АРВ	0,7	0,508
ГСП	2,65	$1,726 \cdot 10^{-3}$
УУКМ	5,48	$2,458 \cdot 10^{-3}$

Из Таблицы 2 следует, что для пор больших диаметров (порядка микрона) износ меньше, чем для наноразмерных пор. В наноразмерном диапазоне пор наблюдается следующая зависимость истираемости графитов от температуры: чем меньше размер пор, тем меньше истираемость.

Выводы

Исследование направлено на анализ пылеобразования при истирании однотипных графитовых образцов. В качестве истираемого тела использовался графитовый параллелепипед с линейными размерами 2x3x40 мм, а в качестве истирающего тела - цилиндр из того же материала, в котором выполнены технологические углубления для размещения датчиков температуры. В экспериментах по разработанной ранее методике проводился экспресс-анализ изменения массы графитового порошка за время истирания при воздействии высоких температур, ионизирующего излучения и окислительной среды. Проведенные экспериментальные исследования показали, что в логарифмическом масштабе скорость изменения массы порошка графита можно рассматривать, как линейно зависящую от температуры. Экспериментально определено, что с увеличением температуры опытов, и при воздействии электронного пучка наиболее подвержены износу на истирание графиты марки МПГ. Остальные марки исследуемых графитов (АРВ, ГСП, УУКМ) имеют меньший износ по сравнению с маркой графита МПГ. Сделан вывод о том, что для пор больших диаметров (порядка микрона) износ меньше, чем для наноразмерных пор. Показано, что в наноразмерном диапазоне пор истираемость тем меньше, чем меньше размер пор. На основании полученных экспериментальных данных предложена физическая модель, которая описывает временную динамику истирания реакторных графитов при разных температурах и при воздействии электронного пучка.

Список литературы

1. **Burchell, T.** Milestone Report on the "Workshop on Nuclear Graphite Research" / **T. Burchell, N. Gallego, M. Srinivasan** // *Oak Ridge National Laboratory*. – 2009. – 20 p.
2. **Hiruta, M.** Experimental study of dust generation from nuclear grade graphite spheres in frictional contact under a pressurized inert atmosphere at elevated temperatures, Master's Thesis / **M. Hiruta** // *University of Idaho, Idaho Falls, ID*. – 2013.
3. **Комир, А. И.** Методика и результаты трибологических испытаний углеродных материалов при воздействии ионизирующего излучения и окислительной среды / **А. И. Комир, Н. П. Одейчук, В. К. Яковлев** // *Вестник НТУ «ХПИ», серия «Новые решения в современных технологиях»*. – 2018. – №9 (1285). – С. 62-69. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.09.

4. **Komir, A. I.** X-ray diffraction analysis of irradiated ARV and MPG nuclear grade graphite / **A. I. Komir, M. P. Odeychuk, A. A. Nikolaenko** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2015. – № 6/5 (78). – P. 12-16. – doi:10.15587/1729-4061.2015.55465.
5. **Lawrence, R.** Porosity, pore size distribution, microstructure / **R. Lawrence, Y. Jiang** // *Bio-aggregates Based Building Materials. RILEM State-of-the-Art Reports*. – 2017. – Vol 23. – P. 39-71. – doi:10.1007/978-94-024-1031-0_2.
6. **Mays, T. J.** Gaseous diffusion and pore structure in nuclear graphite. Graphite moderator lifecycle behavior / **T. J. Mays, B. McEnaney, B. T. Kelly** // *Proceedings of a specialists meeting held in Bath, United Kingdom*, 24-27 September 1995. – P. 329-335.
7. **Островский, В. С.** Искусственный графит / **В. С. Островский, Ю.С. Виргильев, В.И. Костиков, Н.Н. Шипков** // *М.: Металлургия*. – 1986. – 272 с.
8. **Нагаев, Э.Л.** Малые металлические частицы / **Э.Л. Нагаев** // *УФН*. – 1992. – Т. 162. – № 9. – С. 49-124. – doi:10.3367/UFN.0162.199209b.0049.
9. **Канторович, Б. В.** Основы горения и газификации твердого топлива / **Б. В. Канторович** // *М.: Изд-во АН СССР*. – 1958. – 600 с.
10. **Чиркин, В. С.** Тепло-физические свойства материалов ядерной техники / **В. С. Чиркин** // *Справочник. Атомиздат. М.* – 1968. – 484 с.
11. **Tokuhiro, A.** Experimental study and computational simulations of key pebble bed thermomechanics issues for design and safety / **A. Tokuhiro** // *Nuclear Energy University Programs*. – 2013. – 83 p. – doi:10.2172/1157564.

Bibliography (transliterated)

1. **Burchell, T., Gallego, N., Srinivasan M.** Milestone Report on the "Workshop on Nuclear Graphite Research" *Oak Ridge National Laboratory*, 2009, 20 p.
2. **Hiruta, M.** Experimental study of dust generation from nuclear grade graphite spheres in frictional contact under a pressurized inert atmosphere at elevated temperatures, Master's Thesis. *University of Idaho, Idaho Falls, ID*, 2013.
3. **Komir, A. I., Odeychuk, N. P., Yakovlev, V. K.** Metodika i rezultaty tribologicheskikh ispytaniy uglerodnykh materialov pri vozdeystvii ioniziruyushogo izlucheniya i oksidatnoy sredy. *Vestnik NTU «HPI», seriya «Novye resheniya v sovremennykh tehnologiyah»*, 2018, **9** (1285), 62-69, doi:10.20998/2413-4295.2018.09.09.
4. **Komir, A. I., Odeychuk, M. P., Nikolaenko, A. A.** X-ray diffraction analysis of irradiated ARV and MPG nuclear grade graphite. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, **6/5** (78), 12-16, doi:10.15587/1729-4061.2015.55465.
5. **Lawrence, R., Jiang, Y.** Porosity, pore size distribution, micro-structure. *Bio-aggregates Based Building Materials. RILEM State-of-the-Art Reports*, 2017, **23**, 39-71, doi:10.1007/978-94-024-1031-0_2.
6. **Mays, T. J., McEnaney, B., Kelly, B. T.** Gaseous diffusion and pore structure in nuclear graphite. Graphite moderator lifecycle behavior. *Proceedings of a specialists meeting held in Bath, United Kingdom*, 24-27 September 1995, 329-335.
7. **Ostrovskij, V. S., Virgilev, Yu.S., Kostikov, V.I., Shipkov, H.H.** Iskusstvennyj grafit. *М.: Metallurgiya*, 1986, 272.

8. **Nagaev, E.L.** Malye metallicheskie chasticy. *UFN*, 1992, **162** (9), 49-124, doi: 10.3367/UFNr.0162.199209b.0049
9. **Kantorovich, B. V.** Osnovy goreniya i gazifikacii tverdogo topliva. *M.: Izd-vo AN SSSR*, 1958, 600.
10. **Chirkin, V. S.** Teplo-fizicheskie svojstva materialov yadernoj tehniky. *Spravochnik. Atomizdat*, 1968, 484.
11. **Tokuhiro, A.** Experimental study and computational simulations of key pebble bed thermomechanics issues for design and safety. *Nuclear Energy University Programs*, 2013, 83, doi:10.2172/1157564.

Сведения об авторах (About authors)

Комір Антон Ігоревич – младший научный сотрудник, НПК «ВИЭРТ», Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: anton.komir@gmail.com.

Anton Komir – junior researcher, SPE «RESST», National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology», Kharkiv, Ukraine; e-mail: anton.komir@gmail.com.

Одейчук Николай Петрович – старший научный сотрудник, кандидат технических наук, НПК «ВИЭРТ», Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина, e-mail: odeychuk@kipt.kharkov.ua.

Mykola Odeychuk – Senior Scientist, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), SPE «RESST», National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology», Kharkiv, Ukraine; e-mail: odeychuk@kipt.kharkov.ua.

Ткаченко Виктор Иванович – доктор физ.-мат наук, профессор, директор НПК «ВИЭРТ», ННЦ «Харьковский физико-технический институт»; Физико-энергетический факультет, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, зав. кафедрой Нетрадиционных энерготехнологий и экологии, г. Харьков, Украина; e-mail: tkachenko@kipt.kharkov.ua.

Viktor Tkachenko – Doctor of Science, Professor, Director of SPE RESST, NSC “Kharkiv Institute of Physics and Technology”; Head of the Department of Physics of Innovation Energy and Technology and Ecology, School of Physics and Energy, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: tkachenko@kipt.kharkov.ua.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Комір, А. І. Трибологічні випробування та модель истирання вуглецевих матеріалів при впливі високих температур, іонізуючого випромінювання та окислювальної середовища / **А. І. Комір, Н. П. Одейчук, В. І. Ткаченко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 41-46. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.06.

Please cite this article as:

Komir, A., Odeychuk, M., Tkachenko, V. Tribological tests and physical model of erasing of carbon materials in the oxidative medium at high temperatures and ionizing radiation. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 41-46., doi:10.20998/2413-4295.2018.16.06.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Комір, А. І. Трибологічні випробування та фізична модель стирання вуглецевих матеріалів в окислювальному середовищі при високих температурах та іонізуючому випромінюванні / **А. І. Комір, М. П. Одейчук, В. І. Ткаченко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 16 (1292). – С. 41-46. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.06.

АНОТАЦІЯ Для аналізу пилоутворення при стиранні однотипних вуглецевих матеріалів виконано їх трибологічні випробування при температурах 400-600 °С в окислювальному середовищі під впливом іонізуючого випромінювання. Показано, що швидкість збільшення маси порошку графіту в логарифмічному масштабі пропорційна температурі випробувань. Визначено, що при температурах випробувань та під впливом електронного пучка графіти марки МПГ схильні до стирання в більшій мірі, ніж графіти марок АРВ, ГСП, УУКМ. Встановлено, що для пір діаметром близько мікрона знос менше, ніж для нанорозмірних пір. Показано, що для нанорозмірних пір стирання пропорційне їх розміру. Запропоновано фізичну модель стирання вуглецевих матеріалів.

Ключові слова: ядерний графіт; трибологічні випробування; окислення; електронні пучки; стирання

Поступила (received) 02.05.2018

УДК 004.051

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.07

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА ПАНОРАМНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ ДЛЯ СЛЕПЫХ

В. Л. КОСТЕНКО¹*, С. Б. КОНДРАТЬЕВ², М. В. ЯДРОВА³, Д. А. ПОПОВ⁴

¹ кафедра металлорежущих станков, метрологии и сертификации, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, УКРАИНА

² кафедра информационных систем, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, УКРАИНА

³ кафедра информационных систем, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, УКРАИНА

⁴ кафедра электронных средств и информационно-компьютерных технологий, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, УКРАИНА

*email: kvl777@ukr.net

АННОТАЦИЯ Разработана энергоэффективная система ультразвукового обнаружения препятствий для слепых. Показана возможность повышения эффективности системы – расширения угла обзора, снижения энергопотребления, повышения времени автономной работы от элемента питания без подзарядки, за счет использования современной элементной базы, выбора оптимальной тактовой частоты и алгоритма работы микроконтроллера. Приведены результаты разработки программной модели и кода программы работы микроконтроллера. На основе данных исследований был собран и испытан макет устройства. Наличие трех ультразвуковых датчиков позволяет расширить угол обзора и определять наличие препятствий прямо перед человеком, а также слева и справа от него.

Ключевые слова: ультразвуковой датчик; микроконтроллер; звуковой излучатель; программные коды; энергопотребление.

ENERGY EFFICIENT SYSTEM OF PANORAMIC ULTRASONIC OBSTRUCTION OBSTACLES FOR THE BLIND

V. KOSTENKO¹, S. KONDRATYEV², M. YADROVA³, D. POPOV⁴

¹department of Metal-cutting machines Metrology and Certification, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

²department information systems, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

³department information systems, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

⁴department electronic means and information-computer systems, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

ABSTRACT The analysis of ultrasonic obstacle detection devices for the blind was carried out. An energy efficient detection system has been developed. The possibility of increasing the efficiency of the system is shown - the expansion of the viewing angle, the reduction of power consumption, the increase in the battery life from the battery without recharging due to the use of a modern element base, the selection of the optimal clock frequency and the microcontroller operation algorithm. The results of the development of the program model and the program code of the microcontroller program in the C language are presented. The program is based on two main fragments that provide the definition of obstacles and distances to them. Programmatically creates a sequential survey of sensors and the possibility of moving the inactive sensor into silence mode, which allows to realize the energy saving mode of the device and reducing power consumption, while its battery life without recharging the battery is increased 4–5 times compared to analogues.

Based on the research data, a model of the device based on a microcontroller designed specifically for battery-powered products was assembled and tested. The device includes three ultrasonic sensors HC-SR04, a microcontroller STM8L, three sound emitters Piezo Buzzer 17855 and a standard small-sized 3-volt power supply. The presence of three ultrasonic sensors and three sound emitters allows to expand the viewing angle and provide a panoramic view – the ability to determine the presence of obstacles right in front of the person, as well as to the left and right of him. By the frequency of the sound signal, you can determine the distance to the object by ear, and by the number of the sound emitter – the direction to the obstacle.

Keywords: ultrasonic distance sensor; microcontroller; sound emitter; program codes; energy consumption.

Введение

Реабилитация слабовидящих и незрячих людей, количество которых по данным Всемирной организации здравоохранения составляет около 1 % во многом основана на разработке новых и совершенствовании известных средств обнаружения препятствий, их позиционирования и определения навигационных характеристик [1, 2]. Вместе с тем, при ориентации в пространстве незрячих людей все

большее применение получают мобильные ультразвуковые устройства, работа которых основана на цифровой обработке с помощью современных микроконтроллеров информации, полученной в результате взаимодействия я ультразвуковых волн с препятствиями, при этом устройства обнаружения препятствий для слепых превращаются в высокотехнологичные системы, включающие интегрированные на одной плате устройства получения, обработки и индикации информации [3].

Учитывая, что при оценке качества мобильных автономных систем обнаружения препятствий наряду с такими важными факторами, как мощность центрального процессора, количество портов, память, большое значение отводится также гарантированной длительности работы в автономном режиме и угол обзора пространства перед слепым, актуальными являются исследования по снижению энергопотребления таких систем и обеспечения панорамности «зрения».

Из анализа литературы следует, что в настоящее время наибольшую популярность для ориентации слепых получили ультразвуковые устройства обнаружения препятствий. Так, например, в работе [4] описано бюджетное устройство для обнаружения препятствий для незрячих на базе микроконтроллера семейства Arduino. При эффективном угле наблюдения до 15° и дальности до 1,5 м, устройство потребляет ток до 140 мА, при этом расстояние до препятствия не определяется, а среднее время автономной работы на одном заряде элемента питания составляет 8 часов. В работе [5] показано, что снижение энергопотребления ультразвукового фонаря можно решить путем автоматического отключения питания при отсутствии воздействия на внешние органы управления при обнаружении препятствий. Устройство обеспечивает обнаружение при дальности до 7 м в довольно широком эффективном секторе наблюдения – не менее 90° градусов, однако не позволяет определять расстояние до препятствия и может работать в автономном режиме не более 4 часов. Для повышения локальности обнаружения, в работе [6] предлагаются ультразвуковые перчатки для слепых, пригодные для обнаружения объектов на расстоянии до 3,5 м с эффективным сектором наблюдения не менее 30° градусов и с интегрированным процессором Arduino Pro Mini 328. При энергопотреблении от 33 мВт до 100 мВт, время автономной работы устройства составляет 4–8 часов в зависимости от используемой платы. Устройство удобно для использования внутри помещений, однако не оптимально на улице из-за необходимости постоянно направлять руки с перчатками в сторону предполагаемых препятствий. Для обнаружения препятствий на уровне подстилающей поверхности в [7] предлагается ультразвуковая «умная трость» для незрячих на базе микроконтроллера семейства Arduino. Измеряя разницу во времени между моментом генерации импульса и моментом приёма отражённого эхо-сигнала, можно определить расстояние до препятствия и преобразовать его в звуковой сигнал. Устройство также обнаруживает воду, позволяет слепым обнаруживать, есть ли свет или темнота в комнате, а также имеет еще одну расширенную функцию, позволяющую слепым найти свою трость. Обладая расширенными функциональными возможностями, данное устройство вместе с тем обеспечивает невысокий эффективный угол обзора перед собой – порядка 14–

30 градусов и обладает недостаточно большим сроком автономной работы. Это объясняется тем, что энергопотребление устройства во многом определяется энергопотреблением используемого микроконтроллера, в данном случае микроконтроллера семейства Arduino, а угол наблюдения – диаграммой направленности одного датчика. С целью повышения информативности обнаружения, в работе [8] предлагается использование системы обнаружения и позиционирования с применением трех ультразвуковых сенсоров для определения препятствия на пути слепых в трех различных направлениях, GPS и система сообщения СМС, микроконтроллер Arduino, зуммер и генератор вибраций. Недостатком систем обнаружения препятствий для слепых на базе этих плат является их сравнительно высокое энергопотребление и, соответственно, малое время работы на одном заряде элемента питания, необходимость частого заряда устройства. Потребление мощности микроконтроллеров Arduino меняется от 33 мВт (плата Arduino LilyPad USB, питание от аккумулятора 3,7 В) до 105 мВт (плата Beetle leonardo, при питании от аккумулятора 5 В) [9].

Для обеспечения стереоскопического эффекта и локализации препятствия, в [10] исследовалась возможность обнаружения препятствий с помощью микроконтроллера PIC16F87 и датчиков, расположенных на левом и правом плечах человека. Несмотря на то, что массовое производство микроконтроллера PIC16F87 обеспечивает низкую цену устройства, энергопотребление его достаточно высокое – 0,2 Вт, поэтому устройство может автономно работать с использованием энергии от стандартной батареи не более 5 часов.

В тоже время, нами ранее были исследованы особенности использования специализированного программного обеспечения [11], а также микроконтроллеров семейства STM [12] для снижения энергопотребления и расширения функциональных возможностей малогабаритных информационно-измерительных систем, в том числе систем обнаружения препятствий для слепых со звуковой индикацией [13]. В результате этих исследований было установлено, что появление на рынке современной элементной базы с минимальным энергопотреблением на основе микроконтроллеров STM, а также отсутствие сведений по их использованию в энергоэффективных системах обнаружения препятствий для слепых и особенностях их программного обеспечения обуславливают перспективность работ в этом направлении.

Цель и задачи работы

Целью данной работы является повышение качества пространственного ориентирования незрячих людей за счет усовершенствования устройств обнаружения препятствия для слепых, в

частности, увеличения угла обзора, снижения энергопотребления, повышения времени их автономной работы от элемента питания без подзарядки за счет применения энергоэффективной элементной базы и современного программного обеспечения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- анализ известных устройств обнаружения препятствий для слепых;
- выбор элементной базы с позиции обеспечения минимального энергопотребления;
- разработка структурной схемы системы панорамного ультразвукового обнаружения препятствий на основе микроконтроллера STM8L;
- разработка программной модели и кода программы работы микроконтроллера STM8L на базе

языка C;

- реализация аппаратной и программной частей системы.

Разработка аппаратной части системы панорамного ультразвукового обнаружения препятствий для слепых

С учетом проведенных исследований, была составлена общая структурная схема системы панорамного ультразвукового обнаружения препятствий для слепых, которая включает три ультразвуковых датчика расстояния, микроконтроллер, три звуковых излучателя и стандартный малогабаритный элемент питания на 3 В (рис. 1).



Рис. 1 – Структурная схема системы панорамного ультразвукового обнаружения препятствий для слепых

В отличие от системы обнаружения, описанной в [8], в представленную систему, с целью снижения энергопотребления и стоимости, не включен блок GPS, так как практическое применение таких систем показало, что в большинстве случаев преимущество отдается экономичным и недорогим системам.

При выборе датчиков нами анализировались результаты применения в системах позиционирования для слепых инфракрасного датчика приближения, лазерного дальномера и ультразвукового дальномера [2]. С учетом соотношения цены, энергопотребления и функциональных возможностей был выбран ультразвуковой датчик HC-SR04 [14] со следующими параметрами: напряжение питания 5 В, ток потребления в режиме тишины 2 мА, ток потребления в рабочем режиме 15 мА, рабочий диапазон обнаружения 0,2–4 м, рабочий угол наблюдения 30°.

При выборе микроконтроллера было проанализировано энергопотребление целого ряда микроконтроллеров, таких как Raspberry pi B+, Arduino MEGA 2560, Arduino UNO R3, Arduino NANO 3.0, STM32F0, STM32F1, STM8S, STM8L. Ток потребления ряда микроконтроллеров в активном режиме при различных тактовых частотах приведен в табл. 1 [15–18]. На основании сравнительного анализа, был выбран микроконтроллер с самым низким

энергопотреблением STM8L [18], разработанный специально для изделий с батарейным питанием, на частоте 16 МГц его ток потребления составляет 3,54 мА. Важным моментом является также выбор оптимальной тактовой частоты, которая сильно влияет на ток потребления микроконтроллера. Проведен анализ зависимости потребляемого тока от тактовой частоты микроконтроллера и выбрана частота 1 МГц, при этом ток потребления снижается до 0,54 мА (табл. 1).

С учетом минимизации энергозатрат в качестве звукового излучателя был выбран излучатель Piezo Buzzer 17855 с током потребления не более 2 мА [19].

Рассмотрим принцип работы устройства. Микроконтроллер формирует короткий запускающий импульс, который подается поочередно на вход каждого из трех ультразвуковых датчиков. На выходе датчиков получаем импульс, длительность которого прямо пропорциональна расстоянию до объекта. На рис. 2 отображены осциллограммы работы датчиков, на рис. 2, а виден короткий запускающий импульс и выходной сигнал датчика при близком расстоянии до препятствия, на рис. 2, б – короткий запускающий импульс и выходной сигнал при далеком расстоянии до препятствия.

Таблиця 1 – Ток потребления микроконтроллеров

Тип микроконтроллера	Тактовая частота, МГц	Ток потребления, мА
STM32F100	16	9,3
	8	5,1
	4	3,2
	1	1,55
	0,125	1,1
Arduino UNO R3	16	18
Arduino NANO 3.0	16	20
STM8S	16	4,3
	8	2,1
	4	1,4
	1	0,8
	0,125	0,72
STM8L	16	3,54
	8	1,97
	4	1,16
	1	0,54
	0,125	0,35



а



б

Рис. 2 – Осциллограммы работы датчиков: а – близкое расстояние до препятствия; б – далекое расстояние до препятствия

Микроконтроллер преобразует полученный импульс в серию импульсов, длительность которых постоянна, а частота следования обратно пропорциональна расстоянию до объекта (рис. 3), верхняя диаграмма отображает серию импульсов при близком расстоянии до препятствия, нижняя диаграмма – при далеком расстоянии до препятствия. При расстоянии до препятствия 3 м частота следования импульсов составляет 1 Гц, при расстоянии – 0,02 м, частота следования импульсов увеличивается до 10 Гц. Эти импульсы поступают на один из трех звуковых излучателей, смонтированных на плате совместно с соответствующим датчиком. По частоте следования звукового сигнала можно ориентировочно определить удаленность до объекта на слух, а по номеру звукового излучателя – направление на препятствие.

На основе структурной схемы был собран и испытан макет устройства (рис. 4).

Устройство может находиться на груди незрячего человека и определять наличие препятствия прямо перед человеком, а также слева и справа от него.



Рис. 3 – Осциллограммы серии импульсов на выходе микроконтроллера

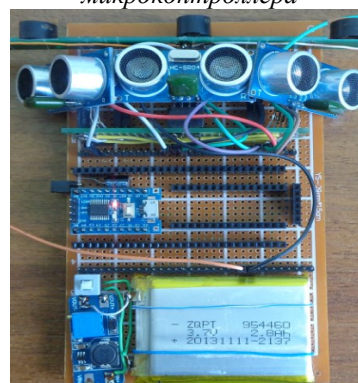


Рис. 4 – Макет устройства панорамного ультразвукового обнаружения препятствий для слепых

Разработка программной части системы

Последовательный опрос датчиков формируются программным путем. Схема алгоритма работы микроконтроллера для одного канала представлена на рис. 5.

На рис. 5, а изображена схема алгоритма в режиме измерения, т.е. формирования импульса,

длительность которого прямо пропорциональна расстоянию до препятствия, причем, если расстояние превысило 3 м, микроконтроллер переходит на работу со вторым датчиком. На рис. 5, б изображена схема алгоритма в режиме звуковой индикации, т.е. формирования звукового сигнала звуковым излучателем 1, на который микроконтроллер подает последовательность

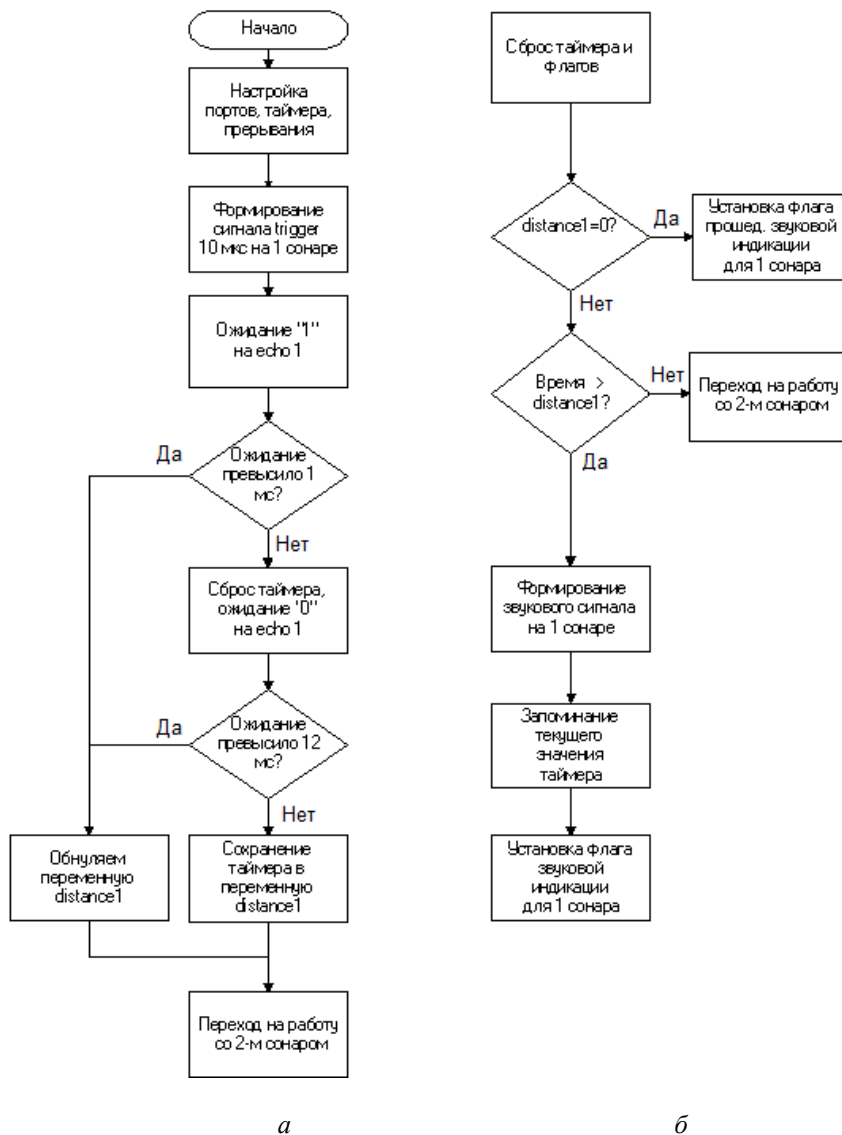


Рис. 5 – Схема алгоритма работы микроконтроллера для одного канала: а – режим измерения; б – режим звуковой индикации

импульсов, частота которых обратно пропорциональна расстоянию до препятствия, причем, если расстояние до препятствия больше 3 м, на звуковой излучатель 1 сигнал вообще не подается, переходим на работу со вторым датчиком.

Код программы написан на языке С. Программа базируется на двух основных фрагментах, которые обеспечивают определение препятствий и расстояний до них.

Основной фрагмент кода программы в режиме измерения представлен на рис. 6.

Основной фрагмент кода программы в режиме звуковой индикации представлен на рис. 7.

Три звуковых излучателя индицируют расстояние до препятствия паузами между звуковыми сигналами. Индикация заканчивается в тот момент, когда индикация самого длинного расстояния будет произведена, после этого программа производит переход на начало измерений.

```

// Сонар 1 измерение
// Запускаем Trig
GPIO_WriteBit(GPIOC, Trigger_1,
Bit_SET); //Установка вывода 9 в "1"
Delay_10us(2); // 1 - 10 us
GPIO_WriteBit(GPIOC, Trigger_1,
Bit_RESET); //Установка вывода 9 в "0"
TimingCounter = 0;
/*ждем передний фронт и находимся
в While до тех пор, пока ECHO в "0"
и таймер не превысил 1 мс*/

while(GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC,
Echo_1) == Bit_RESET && TimingCounter <= 100);
if(TimingCounter >= 100) //1ms –
защита, если нет ответа датчика по ECHO
{
    goto error_sonar_1;
}
TimingCounter = 0;
tempCounter = 0;
/*ждем задний фронт, и находимся в
While до тех пор, пока ECHO в "1" и
таймер не превысил 12 мс*/
while(GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC,
Echo_1) == Bit_SET && TimingCounter <= 1200);
tempCounter = TimingCounter;
// Если ожидание больше 12ms -
препятствие не найдено
if(tempCounter >= 1200)
{
    /*Если таймер нахождения в "1"
превысил 12мс, то датчик отключен,
переходим ко второму датчику*/
    goto error_sonar_1;
}
distance1 = tempCounter * 200;
goto sonar2;
error_sonar_1:

```

distance1=0;

Рис.6 – Основной фрагмент кода программы в режиме измерения

Анализ результатов исследования

Разработана система панорамного ультразвукового обнаружения препятствий для слепых, которая содержит три ультразвуковых датчика расстояния, микроконтроллер, три звуковых излучателя и стандартный малогабаритный элемент питания на 3 В.

На основании сравнительного анализа, был выбран микроконтроллер с низким энергопотреблением STM8L [18], разработанный специально для изделий с батарейным питанием, на частоте 16 МГц его ток потребления составляет 3,54 мА. Проведен анализ зависимости потребляемого

тока от тактовой частоты микроконтроллера и выбрана частота 1 МГц, при этом ток потребления снижается до 0,54 мА.

```

/* Работа с 1-м звуковым
излучателем. Если дистанция не
нулевая, то проверяем текущее
время индикации */
if (distance1 != 0)
{
    timing_counter_now_1 =
TimingCounter -
timing_counter_was_1;
if (timing_counter_now_1 >=
distance1)
{
    GPIO_WriteBit(GPIOC,
Beeper_1, Bit_SET); // Установка вывода 8 в "1"
Delay_10us(2000); // 20 ms
GPIO_WriteBit(GPIOC,
Beeper_1, Bit_RESET); // Установка
вывода 8 в "0"
beep_one_1 = 1;
timing_counter_was_1 =
TimingCounter;
}
}
if (distance1 == 0)
{
    beep_one_1 = 1; // Установка
флага звуковой индикации для 1
сонара
}

```

Рис. 7 – Основной фрагмент кода программы в режиме звуковой индикации

С учетом соотношения цены, энергопотребления и функциональных возможностей выбран ультразвуковой датчик HC-SR04 [14] со следующими параметрами: напряжение питания 5 В, ток потребления в режиме тишины 2 мА, ток потребления в рабочем режиме 15 мА, рабочий диапазон обнаружения 0,2–4 м, рабочий угол наблюдения 30°.

С учетом минимизации энергозатрат в качестве звукового излучателя выбран излучатель Piezo Buzzer 17855 с током потребления не более 2 мА [19].

Программным путем формируется последовательный опрос датчиков и возможность перехода неактивного датчика в режим тишины до следующего акта измерений.

В результате, суммарный ток потребления устройства составляет 17,7 мА (рис. 8). При использовании литий-полимерного аккумулятора емкостью 2800 мАч, время работы в автономном режиме без подзарядки элемента питания составляет 80 часов, т.е. не менее 10 дней, при этом

обеспечивается уверенная фиксация препятствий в диапазоне расстояний от 0,02 до 3 м в пределах диаграммы направленности ультразвуковых датчиков. Предусмотрена возможность заряда элемента питания через USB интерфейс.

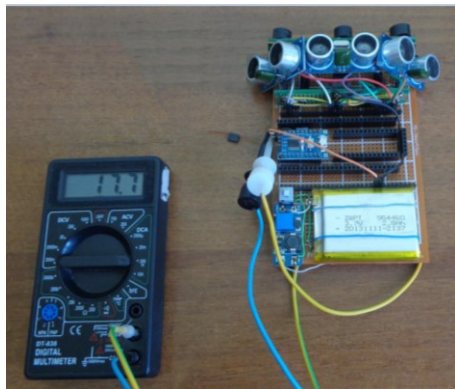


Рис. 8 – Устройство ультразвукового обнаружения препятствий для слепых с измерителем тока потребления

На основании анализа результатов исследований установлено, что энергопотребление системы по сравнению с аналогами снижено, а время работы без подзарядки элемента питания увеличено в 4–5 раз.

Наличие трех ультразвуковых датчиков и трех звуковых излучателей позволяет расширить угол обзора и обеспечить панорамность «зрения», т.е. возможность определять наличие препятствий прямо перед человеком, а также слева и справа от него. По частоте следования звукового сигнала можно ориентировочно определить удаленность до объекта на слух, при расстоянии до препятствия 3 м частота следования импульсов составляет 1 Гц, при расстоянии – 0,02 м, частота следования импульсов увеличивается до 10 Гц.

Выводы

Проведен анализ устройств ультразвукового обнаружения препятствий для слепых.

Разработана структурная схема и показана возможность снижения энергопотребления, повышения времени автономной работы за счет использования современной элементной базы, в том числе микроконтроллера STM8L с минимальным энергопотреблением, разработанного специально для изделий с батарейным питанием, выбора оптимальной тактовой частоты микроконтроллера.

Разработан алгоритм работы микроконтроллера STM8L и программа работы микроконтроллера на языке C. Приведены результаты разработки программной модели и кода программы. Программа базируется на двух основных фрагментах, которые обеспечивают определение препятствий и расстояний

до них. Программным путем формируется последовательный опрос датчиков и возможность перехода неактивного датчика в режим тишины до следующего акта измерений.

На основе данных исследований был собран и испытан макет устройства, которое включает три ультразвуковых датчика HC-SR04, микроконтроллер STM8L, три звуковых излучателя Piezo Buzzer 17855 и стандартный малогабаритный элемент питания на 3 В. Наличие трех ультразвуковых датчиков и трех звуковых излучателей позволяет расширить угол обзора и обеспечить панорамность «зрения», т.е. возможность определять наличие препятствий прямо перед человеком, а также слева и справа от него.

На основании анализа результатов исследований установлено, что энергопотребление системы по сравнению с аналогами снижено, а время работы в автономном режиме без подзарядки элемента питания увеличено в 4–5 раз, при этом обеспечивается уверенная фиксация препятствий в диапазоне расстояний от 0,02 до 3 м в пределах диаграммы направленности ультразвуковых датчиков.

Список литературы

1. **Ершов, С. О.** Системы технического зрения с не визуальным представлением пространственной информации / **С. О. Ершов, П. Майер** // *Известия вузов. Приборостроение.* – 2008. – Т. 51, № 1. – С. 42–47. – doi: 10.1109/ICDSC.2007.4357528.
2. **Ершов, С. О.** Локальные и глобальные программно-аппаратные средства позиционирования и навигации для слепых / **С. О. Ершов, П. Майер, Е. Л. Баки-Бородов** // *Информатизация и связь.* – 2011. – № 1. – С. 58–62.
3. **Jayant, Sakhardande.** Arduino Based Mobility Canel / **Jayant Sakhardande, Pratik Pattanayak, Mita Bhowmick** // *International Journal of Scientific & Engineering Research.* – 2013. – Vol. 4, Issue 4. – p. 1163–1166.
4. Бюджетное устройство на базе Arduino для незрячих. URL: <https://future.d3.ru/biudzhetnoe-ustroistvo-na-baze-arduino-dlia-nezriachikh-open-hardware-750859>.
5. Ультразвуковые фонарики «Сонар-5УФ». URL: <https://www.sites.google.com/site/tehnikesredstvada/slepyh/1-ultrazvukovoj-fonar-sonar-5uf>.
6. Сонар для слепых на базе Arduino Mini Pro. URL: <http://meandr.org/archives/21701>.
7. **Shubham, Adhe.** Ultrasonic Smart Stick for Visually Impaired People / **Shubham Adhe, Sachin Kunthewad, Preetam Shinde, Mrs.V.S.Kulkarni** // *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE).* – 2015. – P. 11–15. – doi: 10.14257/ijunesst.2015.8.5.05.
8. **Osama, Bader.** 3D Ultrasonic Stick for Blind / **Osama Bader, AL-Barrm, Jeen Vinouth** // *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET).* – 2014. – Vol. 3, No. 3. – p. 108–114. – doi: 10.21172.
9. Энергопотребление Arduino. URL: https://www.arduino.md/arduino_power_consumption.
10. **Sylvain, Cardin.** Wearable Obstacle Detection System for visually impaired people / **Sylvain Cardin, Daniel Thalmann and Frederic Vexo** // *VR Workshop on Haptic and Tactile Perception of Deformable Objects.* – 2005. – P.

- 50 - 55.
11. **Костенко, В. Л.** Информационно-измерительная система контроля нормированных параметров производственных факторов / **В. Л. Костенко, А. А. Николенко, Е. Д. Поперека, М. В. Ядро, К. С. Тьманюк** // *Східно-європейський журнал передових технологій. Серія «Інформаційно-управляючі системи»*. – 2014. – Т. 3, № 9 (69). – С. 51–56. – doi: 10.15587/1729-4061.2014.25419.
 12. **Костенко, В. Л.** Інформаційна система вимірювання та контролю параметрів повітряного середовища / **В. Л. Костенко, С. Б. Кондратьєв, М. В. Ядро, Д. О. Попов** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ»*. – 2017. – № 23 (1245). – С. 117-122. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.19.
 13. **Костенко, В. Л.** Ультразвуковой дальномер со звуковой индикацией на основе микроконтроллера STM32F100. / **В. Л. Костенко, С. Б. Кондратьев, А. А. Николенко, М. В. Ядро.** // *Тр. 18-й Междун. научно-практ. конференции «Современные информационные и электронные технологии» СИЭТ-2017*. – 2017, ОНПУ, С. 61–62.
 14. Ultrasonic Ranging Module HC-SR04. URL: www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf.
 15. STM32F100. URL: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f100rb.pdf>.
 16. Энергопотребление arduino – ARDUINO.MD. URL: https://www.arduino.md/arduino_power_consumption/arduino.md.
 17. STM8S. URL: http://www.st.com/resource/en/reference_manual/cd00190271.pdf.
 18. STM8L. URL: http://www.st.com/resource/en/reference_manual/cd00184503.pdf.
 19. 12.5 mm Piezo Buzzer 17855. URL: <https://solarbotics.com/product/17855>.
 4. Bjudzhetnoe ustrojstvo na baze Arduino dlja nezrjachih. Alaliable at: <https://future.d3.ru/bjudzhetnoe-ustrojstvo-na-baze-arduino-dlja-nezriachikh-open-hardware-750859>.
 5. Ul'trazvukovye fonariki «Sonar-5UF». Alaliable at: <https://www.sites.google.com/site/tehniceskiesredstvavla-slepyh/1-ultrazvukovoj-fonar-sonar-5uf>.
 6. Sonar dlja slepyh na baze Arduino Mini Pro. Available at: <http://meandr.org/archives/21701>.
 7. **Shubham, Adhe, Kunthwad, Sachin, Shinde, Preetam, Kulkarni, V. S.** Ultrasonic Smart Stick for Visually Impaired People. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, 2015, 11–15 - doi: 10.14257/ijunesst.2015.8.5.05.
 8. **Osama, Bader, Barrm, A. L., Vinouth, Jeen.** 3D Ultrasonic Stick for Blind. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET)*, 2014, 3, No. 3, 108–114. – doi: 10.21172.
 9. Jenergotreblenie Arduino. Available at: https://www.arduino.md/arduino_power_consumption.
 10. **Sylvain, Cardin, Thalmann, Daniel, Vexo, Frederic.** Wearable Obstacle Detection System for visually impaired peopl. *VR Workshop on Haptic and Tactile Perception of Deformable Objects*, 2005, 50 - 55.
 11. **Kostenko, V. L., Nikolenko, A. A., Popereka, E. D., Yadrova, M. V., Tymanjuk, K. S.** Informacionno-izmeritel'naja sistema kontrolja nomirovannyh parametrov proizvodstvennyh faktorov. *Shidno-evropejskij zhurnal peredovih tehnologij. Serija «Informacionno-upravljajushhie sistemy»*, 2014, 3, № 9 (69), 51–56. – doi: 10.15587/1729-4061.2014.25419.
 12. **Kostenko, V., Kondratyev, S., Yadrova, M., Popov, D.** Information system of measurement and control parameters of the air framework. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, 23 (1245), 117-122. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.19.
 13. **Kostenko, V. L., Kondrat'ev, S. B., Nikolenko, A. A., Yadrova, M. V.** Ul'trazvukovoj dal'nomer so zvukovoj indikaciej na osnove mikrokontrollera STM32F100. *Tr. 18-j Mezhdun. nauchno-prakt. konferencii «Sovremennye informacionnye i jelektronnye tehnologii» SIET-2017*, 2017, ONPU, 61–62.

Bibliography (transliterated)

1. **Ershov, S. O., Majer, P.** Sistemy tehničeskogo zrenija s nevizual'nym predstavleniem prostranstvennoj informacii. *Izvestija vuzov. Priborostroenie*, 2008, 51, № 1, 42–47. – doi:10.1109/ICDSC.2007.4357528.
2. **Ershov, S. O., Mejer, P., Baki-Borodov, E. L.** Lokal'nye i global'nye programmno-apparatnye sredstva pozicionirovanija i navigacii dlja slepyh. *Informatizacija i svjaz'*, 2011, № 1, 58–62.
3. **Jayant, Sakhardande, Pattanayak, Pratik, Bhowmick, Mita.** Arduino Based Mobility Canel. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2013, 4, Issue 4, 1163–1166.
14. Ultrasonic Ranging Module HC-SR04. Available at: www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf.
15. STM32F100. Available at: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f100rb.pdf>.
16. Jenergotreblenie arduino – ARDUINO.MD. Available at: https://www.arduino.md/arduino_power_consumption/arduino.md.
17. STM8S. Available at: http://www.st.com/resource/en/reference_manual/cd00190271.pdf.
18. STM8L. Available at: http://www.st.com/resource/en/reference_manual/cd00184503.pdf.
19. 12.5 mm Piezo Buzzer 17855. Available at: <https://solarbotics.com/product/17855>.

Сведения об авторах (About authors)

Костенко Виталий Леонидович – доктор технических наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет; кафедра металлорежущих станков, метрологии и сертификации, г. Одесса, Украина; e-mail: kv1777@ukr.net.

Vitaliy Kostenko – doctor of Technical Sciences, Professor, Odessa National Polytechnic University, department of Metal-cutting machines Metrology and Certification, Odessa, Ukraine; e-mail: kv1777@ukr.net.

Кондратьев Сергей Борисович – старший преподаватель, Одесский национальный политехнический университет, кафедра информационных систем, г. Одесса, Украина; e-mail: kv1777@ukr.net.

Sergey Kondratyev – major teacher, Odessa National Polytechnic University, department of Information Systems, Odessa, Ukraine; e-mail: kv1777@ukr.net.

Ядрова Марина Васильевна – кандидат технических наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет, кафедра информационных систем, г. Одесса, Украина; e-mail: yadrova@onu.ua.

Marina Yadrova – Associate Professor, Odessa National Polytechnic University, Department of Information Systems, Odessa, Ukraine; e-mail: yadrova@onu.ua.

Попов Дмитрий Александрович – аспирант, Одесский национальный политехнический университет, кафедра электронных средств и информационно-компьютерных технологий, г. Одесса, Украина; e-mail: popov.d@ukr.net.

Dmitry Popov – graduate student, Odessa National Polytechnic University, Department electronic means and information-computer technology, Odessa, Ukraine; e-mail: popov.d@ukr.net.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Костенко, В. Л. Энергоэффективная система панорамного ультразвукового обнаружения препятствий для слепых / **В. Л. Костенко, С. Б. Кондратьев, М. В. Ядрова, Д. О. Попов** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 47-55. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.07.

Please cite this article as:

Kostenko, V., Kondratyev, S., Yadrova, M., Popov, D. Energy efficient system of panoramic ultrasonic obstruction obstacles for the blind. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 47-55, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.07.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Костенко, В. Л. Энергоэффективна система панорамного ультразвукового виявлення перешкод для сліпих / **В. Л. Костенко, С. Б. Кондратьєв, М. В. Ядрова, Д. О. Попов** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 47-55. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.07.

АННОТАЦІЯ Розроблена енергоефективна система ультразвукового виявлення перешкод для сліпих. Показана можливість підвищення енергоефективності системи – розширення кута огляду, зниження енергоспоживання, підвищення часу автономної роботи від елемента живлення без підзарядки, за рахунок використання сучасної елементної бази, вибору оптимальної тактової частоти та алгоритму роботи мікроконтролера. Наведені результати розробки програмної моделі та коду програми роботи мікроконтролера. На основі даних досліджень був зібраний і випробуваний макет пристрою. Наявність трьох ультразвукових датчиків відстані дозволяє розширити кут огляду і визначити наявність перешкоди прямо перед людиною, а також зліва і праворуч від неї.

Ключові слова: ультразвуковий датчик; мікроконтролер; звуковий випромінювач; програмні коди; енергоспоживання.

Поступила (received) 28.04.2018

УДК 621.43:533.6

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.08

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ПОТОКА ГАЗОВ В СИСТЕМЕ ПОРШЕНЬ-ЦИЛИНДР

В. П. ЛИТВИНЕНКО

кафедра «Эксплуатации судовых энергетических установок», Азовский морской институт Национального университета «Одесская морская академия», Мариуполь, УКРАИНА
email: jltinski@gmail.com

АННОТАЦИЯ В современных условиях все более актуальным оказывается вопрос поиска оптимизационных решений работы судовых дизелей. К такому выводу можно прийти, если рассматривать тенденцию их развития с позиций оценки методов проектирования, технического и технологического совершенствования, а также характера исследований, проводимых в этом направлении. В особенности это свойственно теоретическим подходам, используемым в сложившихся методиках отображения цилиндрических термодинамических процессов. Большею частью здесь реализуются квазистатические подходы в описании характера изменения параметров, подразумевая, что эти процессы равновесны и обратимы во всем периоде их протекания. Однако, как это следует из результатов современных исследований, принимаемые допущения не в полной мере отображают реальные процессы и по этой причине их использование оказывается в определенной мере сдерживающим развитие дизелей фактором. В исследовании обращено внимание на возможность описания работы двигателей внутреннего сгорания с позиций газовой динамики, при условии оценки скорости потока газов, как фактора влияющего на эффективность термодинамических процессов. Установлена недостаточность информации в части учета потока газов при вынужденных возмущениях, свойственных работе дизеля, что привело к необходимости изготовления экспериментальной установки, позволившей выявить закономерности влияния перемещаемого в цилиндре поршня на характер изменения скорости потока газов. Предложен алгоритм расчета скорости потока газов посредством допущения о равенстве скорости распространения газов движущихся под воздействием избыточного давления и скорости высвобождения объема цилиндра движущимся поршнем, что позволило определять условно выделенную линию равновесия потока газов по скорости. Полученные в результате проведенного эксперимента данные, свидетельствуют о реальности сделанных допущений, а реализуемые в исследовании методы могут быть привнесены в методы анализа и расчета действующих дизелей.

Ключевые слова: экспериментальная установка; дизель; скорость потока газов; поршень; скорость поршня; насосный эффект; скорость звука; вынужденные возмущения газов; вакуумметр; обратный клапан; разряжение.

EVALUATION OF THE FLOW GAZ RATE IN THE PISTON CYLINDER SYSTEM

V. LYTUVYENKO

Department, «Ship power plant operation», Azov Maritime Institute of the National University «Odessa Maritime Academy», Mariupol, UKRAINE

ABSTRACT In the modern conditions the search for optimization solutions for the operation of marine diesel engines is becoming more and more topical. This conclusion may be reached when considered the tendency of their development from the standpoint of evaluating design methods, technical and technological improvement, and also the character of the findings conducted in that respect. Especially, it is common among the theoretical approaches used in the existing methods for showing cylinder thermodynamic processes. For the most part, quasistatic approaches are realized there in describing the nature of the change in parameters, implying that these processes are in equilibrium and reversible throughout the entire period of their course. However, as follows from the results of modern findings, the assumptions made do not fully reflect the real processes and for this reason their use is to a certain extent deterring the development of diesel engines by the factor. The study draws attention to the possibility of describing the operation of internal combustion engines from the viewpoint of gas dynamics, provided that the gas flow rate is estimated as a factor influencing the efficiency of thermodynamic processes. Insufficiency of information regarding accounting for the flow of gases in forced disturbances typical of diesel operation was established, which led to make an experimental setup that made it possible to reveal the regularities of the effect of the piston moved in the cylinder on the nature of the change in the gas flow rate. An algorithm is proposed for calculating the flow rate of gases by assuming that the velocity of propagation of gases moving under the influence of excess pressure and the rate of release of the cylinder volume by a moving piston is equal, which made it possible to determine the conditionally distinguished equilibrium line of the gas flow in terms of velocity. The data obtained as a result of the experience of the experiment are evidence of the reality of the assumptions made, and the methods implemented in the study can be introduced into methods for analyzing and calculating operating diesel engines.

Keywords: experimental plant; diesel; speed gas flow; piston; piston speed; pump effect; sound velocity; forced gaz disturbance; vacuum gauge; return valve; negative pressure.

Введение

В порядке исследования принципов совершенствования смешанных и комбинированных

циклов дизеля, нами было обращено внимание на неравновесность термодинамических процессов и необходимость поиска условий оптимального их протекания. В этой связи, нами выдвигалась гипотеза

о существовании условий разрыва параметров под воздействием движущегося поршня. Такое положение в цилиндре обозначалось некоторой линией разрыва, как характеристики обратимости процессов. В частности из условия равенства принятой нами объемной скорости распространения газов под воздействием избыточного давления и скоростью, с которой высвобождается объем цилиндра движущимся поршнем, определялась степень предварительного расширения, как одна из фундаментальных характеристик термодинамического процесса. При этом делалось допущение о том, что в момент равенства отмечаемых скоростей, приращение энтропии в цикле оказывается равным нулю, что соответствует выводам в известных теоретических исследованиях, $\Delta S = 0$, [1,2]. Такое условие нами обозначалось линией разрыва, подразумевая разрыв по равенству отмечаемых скоростей, при условии завершения изобарного процесса. Отмечалось что на линии разрыва, как характеристике завершения изобарного процесса, параметры термодинамического процесса к которым отнесены энтропия, давление, плотность газов и температура неизменны, ($S = \text{const}$, $P = \text{const}$, $T = \text{const}$) при условии, что приращение энтропии равно нулю. В дальнейшем, по мере увеличения скорости поршня, это условие нарушается в зависимости от изменения скорости потока газов и скорости перемещения поршня, [2,3].

Принимая во внимание полученные результаты, в настоящей работе, таким образом, ставилась задача поиска критических условий, при которых изменение отмечаемых параметров оказывается существенным, что и будет указывать на необходимость принятия решений по совершенствованию цикла, за счет привнесения изменений в процесс расширения газов.

Сделанное допущение основывается на том факте, что движущийся поршень обладает не равномерной скоростью и на некотором промежутке его движения вероятно наступление момента, при котором скорость высвобождаемого объема окажется больше скорости распространения газов, движение которых вызвано избыточным давлением. Так что вероятно проявление следующей линии разрыва, но при других соотношениях термодинамических параметров.

Наглядность рассматриваемого подхода поясняется рис. 1.

В ходе выполнения настоящей работы нам не представилось возможным обнаружить работ, которые бы в полной мере давали описание цилиндрических процессов в дизелях использованием газодинамических подходов. Исключение составила работа М.Г. Кругова, А.А. Меднова «Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания», где авторы, рассматривая термодинамические процессы в комбинированном цикле,

отмечают вероятность возникновения ударных волн в цикле, [3].

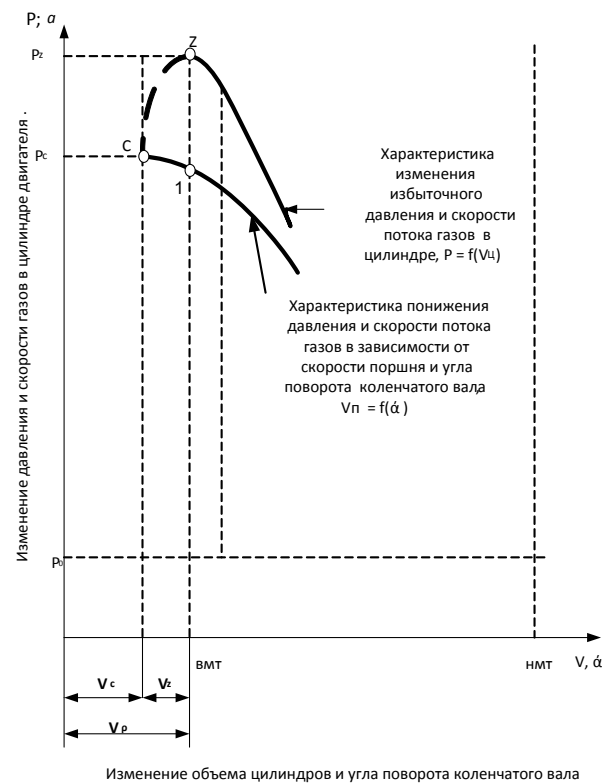


Рис. 1 – Изменение давление в цилиндре дизеля в зависимости от объемной скорости и скорости высвобождения объема цилиндра движущимся поршнем: P_c , P_z – давление сжатия и сгорания; V_c – объем камеры сжатия; V_z – объем цилиндра при достижении максимального давления сгорания; V_p – объем цилиндра, используемый в расчете степени предварительного расширения; α – угол поворота коленчатого вала

В общетеоретическом плане в этом направлении значимыми по нашему мнению оказываются работы Я.Б. Зельдовича, И.А. Квасникова, Борисова А.А. и других, [3 - 7].

В газовой динамике, как впрочем, и в классической термодинамике, используются феноменологические подходы, которые основываются на определенных представлениях и допущениях. Здесь используется понятие газообразной непрерывной сплошной среды, положение которой оценивается как в пространстве, так и во времени, а сам процесс рассматривается как не квазистатический, в отличие от представлений классической термодинамики. При этом сплошная среда характеризуется как деформируемая использованием обобщающих макроскопических параметров, свойственных оценке таких сред. В качестве параметров применяются, известные параметры термодинамики, при условии их изменения во времени. Так что скорость изменения термо-

динамических соотношений оказывается определяющим фактором оценки наблюдаемых изменений, а процессы считаются нестационарными. В тоже время, здесь понятие идеального газа трактуется как газ, в котором отсутствуют вязкость и теплопроводность.

В основу рассмотрения процессов в газовой динамике положены законы сохранения массы, импульса и энергии, которые отображаются с учетом фактора времени. Так, в частности учитывается специфика деформации газа во времени через объем связанный со временем - $V(t)$, а объем относящийся к пространству отображается в форме некоторого пространства - V .

Обозначенные законы учитываются в форме зависимостей, которые в последующем детализуются и трансформируются в более конкретные выражения.

Закон сохранения массы представляется в виде соотношения:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho dV = 0 \quad (1)$$

где, ρ – плотность газов в текущий момент времени.

Закон сохранения импульса или количества движения в виде:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \vartheta dV = R \text{ или } \int_{V(t)} \rho \frac{d\vartheta}{dt} dV = R \quad (2)$$

где, ϑ – скорость потока газов; R – результирующий вектор приложенных к объему газа сил.

Закон сохранения энергии отображается в виде зависимости:

$$d \left(\int_{V(t)} \rho E dV \right) = L + Q \text{ или } \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho E dV = N + Q^1 \quad (3)$$

где, E – полная удельная энергия, энергия, отнесенная к единице массы; L – работа внешних сил; Q – количество подведенного тепла в систему; N – мощность, работа внешних сил за единицу времени; Q^1 – количество тепла, подведенного в систему за единицу времени.

Приведенные соотношения свидетельствуют о том, что газодинамические процессы зависят от характера возмущения газовой среды и скорости ее перемещения, а их анализ должен производиться с учетом специфики воздействия как внешних, так и внутренних факторов. Однако решение этих соотношений связано с неопределенностью, или как говорят в математике не замкнутостью, поскольку они содержат четыре неизвестных переменных.

В этой связи заметим, что возмущение газовой среды в дизеле происходит как в результате процессов сгорания топливовоздушной смеси, которое приводит к образованию избыточного давления, так и

вследствие механического воздействия инерционных сил, образуемых в результате вращения коленчатого вала, которые приводят к перемещению поршня с неравномерной линейной скоростью перемещения в цилиндре дизеля. Так что решение задач газовой динамики для цикловых процессов дизеля обусловлено необходимостью разрешения проблем теоретического характера, в связи с потребностью составления модели процесса и в дальнейшем выбора метода решения поставленной задачи.

Цель работы

Целью настоящей работы является исследование закономерностей газодинамических процессов, позволяющих установить параметрические соотношения в период расширения сжатых газов при перемещении поршня с заданной скоростью в цилиндре экспериментальной установки, с тем, чтобы была обоснованность их использования при дальнейшем анализе работы реальных конструкций дизеля.

Такая постановка цели исследования обусловлена в первую очередь тем, что в предшествующих работах нами была показана возможность определения степени предварительного расширения в цикле работы дизеля через посредство введения понятия объемной скорости [8].

Изложение основного материала

Исследуя рассматриваемый вопрос по литературным источникам и публикациям, нами было обращено внимание на теоретические разработки, относящиеся к теории ударных волн. В частности к теории волн разряжения. Изложенные здесь подходы указывают на вероятность возникновения отмечаемой ситуации при достижении характерных, или как их называют, критических моментов, связанных с соотношением между скоростью потока газов и скоростью перемещения поршня. Предполагается, что если поршень движется с ускорением в попутном потоку газов направлении, а сам поток газов движется с некоторым замедлением, то условие разрыва допустимо. При этом его достижение оценивается как скачек разряжения, т.е. как условие, при котором наблюдаются резкие изменения термодинамических параметров.

В частности в этом случае энтропия не будет постоянной величиной ($S \neq \text{const}$), в отличие от идеальной адиабаты для которой энтропия оценивается как постоянная величина ($S = \text{const}$). Более того, ударное разряжение приводит к снижению темпа роста энтропии.

Однако в этом направлении наблюдаются некоторые противоречия в оценке условий возникновения такой волны разряжения. В частности, в соответствии с теоремой Цемплена существование ударных волн разряжения в дифференциальной модели отрицается, [3,7]. В тоже время известно

открытие, которым зарегистрировано существование ударных волн разрежения при условии использования соответствующих сред в некотором пространстве, [9].

При исследовании волны разрежения принимают во внимание, что возмущения потока газов происходит со скоростью звука. Так что зависимость, определяющая условия образования волны разрежения от скорости движения поршня отображают в виде соотношения:

$$a = \frac{\gamma-1}{2} \left(\frac{2}{\gamma-1} a_n - |u_n| \right) \quad (4)$$

a – скорость звука за линией разрыва, м/с; a_n – скорость звука до образования линии разрыва, м/с; $|u_n|$ – скорость поршня в текущем интервале времени, м/с; γ – показатель адиабаты.

Исходя из выражения (4) авторы исследований приходят к выводу об ограниченной возможности образования волны разрежения и делают вывод о том, что в энергоизолированной системе ударная волна разрежения невозможна.

Поскольку ее образование связано с необходимостью обеспечения скорости поршня, которая определяется из условия:

$$|u_n| > 2a_n/(\gamma - 1) \quad (5)$$

Подвергая анализу выражение (4) заметим, что скорость поршня в этом случае определяется из условия:

$$|u_n| = \frac{2(a_n - a)}{\gamma - 1} \quad (6)$$

Так, что при условии равенства $a_n = a$, будет наблюдаться линия разрыва, а в случае если $a > a_n$ будет наблюдаться разрежение. В таком контексте важным моментом оказывается определение понятия скорости - a . Важно понимание природы возникновения этой скорости и характер ее образования.

В целях выяснения этого обстоятельства нами рассматривались классические представления, для которых свойственно следующее условие:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^\gamma = \left(\frac{a_n}{a} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \quad (7)$$

где, P_1 , P_2 – давление газов до образования линии разрыва, в изобарном процессе и в момент образования линии разрыва. Давление в момент образования линии разрыва принимается равным атмосферному давлению.

V_1 , V_2 – объем цилиндра до образования линии разрыва, в изобарном процессе и в момент образования линии разрыва.

При сделанных допущениях, таким образом, обеспечивается возможность определения всех параметров процесса, включая место расположения линии разрыва.

В частности. Объема, при котором возможно достижение разрыва, из условия:

$$V_2 = V_1 \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} \quad (8)$$

Скорости звука в изобарном процессе, до линии разрыва, из условия:

$$a_n = \sqrt{\gamma \frac{P_1}{\rho_1}} = \sqrt{\gamma RT} \quad (9)$$

где, ρ_1 – плотность газов в изобарном процессе, до линии разрыва; R – универсальная газовая постоянная; T – температура газов в рассматриваемом процессе.

Плотность газов находящихся в цилиндре, из условия, что в настоящей работе используется воздух

$$\rho_1 = \frac{P_1 M}{RT} \quad (10)$$

где, M – молярная масса воздуха, в расчетах принималась $29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Скорость звука в момент образования линии разрыва

$$a = a_n \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{P_2}{P_1}} \quad (11)$$

С целью проверки выдвигаемой гипотезы о вероятном возникновении отмечаемой линии разрыва, в условиях лаборатории СДВС кафедры Судовых энергетических установок изготовлена экспериментальная установка, см. фото 1 – 4.



Фото 1. Положение поршня в начале эксперимента. В области перед поршнем избыточное давление 3 бара, пружина сжата



Фото 2. Положение поршня в момент высвобождения пружины. В области перед поршнем наблюдаются изменение цвета воздушной среды



Фото 4. Положение поршня, при котором наблюдается разрежение в пространстве перед поршнем



Фото 3. Положение поршня, при котором явно выражено изменение цвета воздушной среды перед поршнем, что свидетельствует о фазовых преобразованиях

Конструктивно установка содержит стеклянный цилиндр, полость которого ограничена крышками. При этом, одна из крышек обеспечивает герметическое уплотнение в плоскости контакта с цилиндром, через посредство уплотнительной прокладки и одновременно служит местом для установки штуцерного соединения с воздушным насосом, с помощью которого создавалось избыточное давление. Другая крышка, будучи соединенной шпильками с уплотняющей крышкой, не является герметичной по отношению к цилиндру, а используется в качестве упора для пружины сжатия и как направляющая штока поршня, за счет выполненного по диаметру оси штока отверстия.

В полости цилиндра размещен плотно прилегающий к поверхности цилиндра поршень, связанный со штоком. Длина штока рассчитывалась таким образом, чтобы достигалась возможность надежного соединения с пружиной в ее свободном состоянии.

Поршень выполнен из фторопласта, с установкой резиновых уплотнительных колец. В теле поршня, в осевом направлении выполнено сквозное отверстие по диаметру невозвратного клапана, который через посредство соединительной трубки связан с вакуумметром стрелочного типа.

В целях сжатия пружины, в конструкции предусмотрено использование винта и гайки с ленточной резьбой. Удержание пружины в сжатом состоянии предусмотрено использованием двуплечего рычага, в короткой части которого выполнены вырезы для их размещения в фиксаторах.

Геометрические размеры цилиндра и жесткость пружины избирались из условия вероятной имитации процесса расширения газов в дизеле. Жесткость пружины избиралась из условия обеспечения скорости перемещения поршня в свободном состоянии в интервале значений, характерных для малооборотных дизелей, (6 – 8) м/с.

В этой связи, в ходе выполнения эксперимента скорость перемещения конца пружины при ее выпрямлении рассчитывалась по методикам, которые предусмотрены для расчета изготавливаемой в промышленности пружины.

Расчет скорости выпрямления конца пружины производился использованием зависимости:

$$V_K = \frac{\tau_3(1 - \frac{F_3}{F_3})}{10^{-3}\sqrt{2G\rho}} \quad (12)$$

где, τ_3 – максимальное напряжение сдвига. Определяется исходя из условия, что при расчете известны диаметр пружины и диаметр проволоки, из которой она изготовлена.

$$\tau_3 = k \frac{8F_3D}{\pi d^3}$$

где, k – вспомогательный коэффициент; F_3 – максимальная сила сжатия пружины, при которой соприкасаются все витки пружины. По стандартам $F_3 = 1014Н$.

$$k = \frac{4c + 2}{4c - 3}$$

где, c – индекс пружины, определяемый из соотношения D/d , наружного диаметра пружины к диаметру проволоки, из которой изготовлена пружина. По результатам выполненных замеров наружный диаметр пружины составил, $D = 67$ мм, диаметр проволоки $d = 6$ мм. Так что индекс пружины составил - $c = 11,6$.

При этом вспомогательный коэффициент составил:

$$k = 4 \cdot 11,6 + 2/4 \cdot 11,6 - 3 = 1,2$$

И максимальное напряжение сдвига составило:

$$\tau_3 = 1,2 \frac{8 \cdot 1014 \cdot 67}{3,14 \cdot 6^3} = 897,5 \text{ МПа}$$

G – модуль сдвига, определяемый в зависимости от модуля упругости - $E = 2 \cdot 10^5$ МПа и коэффициента Пуассона - $\mu = 0,3$, принимаемых по ГОСТ 13770-86. Модуль сдвига, таким образом, составил:

$$G = E/2(1 - \mu) = 200000/2,6 = 76923 \text{ МПа}$$

F_2 - рабочее осевое усилие, определяется в зависимости от максимального усилия сжатия - F_3 .

$$F_2 = F_3(1 - \sigma) = 1014(1 - 0,25) = 760 \text{ Н}$$

σ - относительный инерционный зазор пружины, для пружин сжатия первого и второго классов $\sigma = (0,05 - 0,25)$.

ρ - плотность стали, из которой изготовлена пружина $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$.

Подставив определенные выражения в уравнение (12) скорость конца пружины составит:

$$V_k = \frac{\tau_3(1 - \frac{F_2}{F_3})}{10^{-3} \sqrt{2G\rho}} = \frac{897,5(1 - \frac{760}{1014})}{10^{-3} \sqrt{2 \cdot 76923 \cdot 7850}} = \frac{224,85}{34,751} = 6,47 \text{ м/с}$$

В соответствии с конструктивным исполнением экспериментальной установки в период исследования разработана расчетная схема, позволяющая смоделировать наблюдаемые процесс, обеспечивая наглядность реализуемых подходов при выполнении анализа полученных результатов, см. рис. 2.

Порядок проведения эксперимента включал в себя выполнение ряда последовательных действий: 1. Сжатие пружины до предела соприкосновения витков; 2. Фиксация пружины в сжатом состоянии; 3. Подача избыточного давления в область (1), см. рис. 2, в интервале (2,5-3,0) бара; 4. Снятие фиксирующего рычага; 5. Наблюдение за процессом и контроль изменения давления в цилиндре в начале эксперимента и в период движения поршня.

В период проведения эксперимента осуществлялась видеосъемка с кадровой частотой 50 кадров в секунду, что обеспечило возможность в определенной мере судить о скорости протекания процесса использованием соответствующих компьютерных программ.

В ходе эксперимента представилось возможным пронаблюдать образование линии разрыва через посредство контроля над давлением в цилиндре использованием вакуумметра, а также благодаря изменениям прозрачности воздуха, указывающего на вероятное изменение (снижение) температуры. На расчетной схеме отмечаемая линия разрыва обозначена сечением - (2-2), ее расположение оказалось на расстоянии $X_2 = 40$ мм или на расстоянии $X_2 + X_1 = 40 + 86 = 126$ мм.

Наблюдаемое обстоятельство свидетельствует о том, что образовавшееся разряжение воздуха может быть объяснено единственным условием, а именно разностью скоростей потока газа, вследствие его перемещения за счет движения поршня.

Обсуждение результатов

Дальнейшая обработка полученных результатов эксперимента и их анализ осуществлялись использованием зависимостей (8 – 11). При этом делалось допущение о том что давление на линии разрыва, обозначенное индексом - P_2 равно атмосферному давлению, поскольку за линией разрыва давление должно оказаться менее атмосферного.

То есть $P_2 = 1 \text{ кг/см}^2 = 98067 \text{ Н/м}^2$. В это же время давление сжатого воздуха в камере, в области (1) составляло $P_1 = 3 \text{ кг/см}^2 = 294200 \text{ Н/м}^2$. Температура воздуха принималась равной 20°C или 293°K . Так что плотность воздуха в области (1), определяемая по выражению (10) равна:

$$\rho_1 = \frac{294200 \cdot 0,029}{8,31 \cdot 293} = 3,5 \text{ кг/м}^3$$

Скорость звука - a_n в области (1) определялась по выражению (9), из допущения, что наблюдаемый процесс можно рассматривать как изобарный, а воздух в основном представляет двумолекулярную структуру, показатель адиабаты $\gamma = 1,4$, [3]. Скорость звука в невозмущенной среде, в области (1) составит:

$$a_n = \sqrt{1,4 \frac{294200}{3,5}} = 343 \text{ м/с}$$

Скорость звука - a в области (2), непосредственно на линии разрыва определится из соотношения (11) из соображений что давление $P_2 = P_a$.

$$a = 343 \sqrt{\frac{2,8}{1,4-1} \frac{98067}{294200}} = 343 \sqrt{0,333} = 293 \text{ м/с}$$

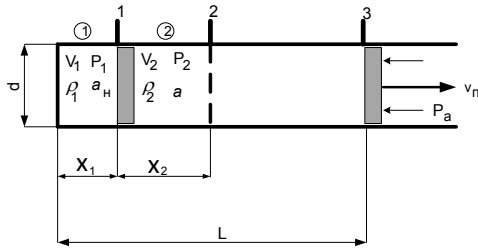


Рис. 2 – Расчетная схема эксперимента: $d = 56\text{мм}$ – диаметр цилиндра; V_1, V_2 – объем первой и второй полости цилиндра; ρ_1, ρ_2 – плотность воздуха в первой и второй области; P_1, P_2 – давление воздуха в первой и второй области; a_n, a – скорость звука в первой и второй области; V_n – скорость и направление перемещения поршня; P_a – атмосферное давление; $X_1 = 86\text{мм}$ – протяженность первой области, области сжатого воздуха; $X_2 = 40\text{мм}$ – ход поршня до линии разрыва; $L = 260\text{мм}$ – протяженность рабочей области цилиндра; 1, 2, 3 – условные сечения цилиндра.

Воспользовавшись выражением (8), определим расстояние X_2 на котором вероятно возникновение линии разрыва. Имеем:

$$X_2 = X_1 \sqrt{P_1/P_2} = 86^{1,4} \sqrt{98067/294200} = 39,23\text{мм}$$

Так что с учетом расстояния X_1 суммарное расчетное расстояние, пройденное потоком воздуха, составило: $X_1 + X_2 = 86 + 40 = 126\text{мм}$.

Сопоставляя полученные расчетные значения суммарного расстояния от крышки цилиндра до линии разрыва, с наблюдаемыми в ходе эксперимента значениями, отметим, что отклонения между полученными значениями равны 2,6%, что соответствует принятым в инженерной практике допущениям.

Отметим, что в ходе выполнения эксперимента была установлена длительность движения поршня при прохождении расстояния 40 мм, она составила $t_n = 0,16$ мкс. (микросекунд) или $t_n = 0,16 \cdot 10^{-3}\text{с}$ к моменту образования разряжения. Так что при известном расстоянии, пройденном поршнем – $X_2 = 40\text{мм} = 0,04\text{м}$, скорость поршня оказалась равной

$$U_n = X_2/t_n = 0,04/0,00016 = 250\text{м/с}.$$

Заметим также, что скорость поршня, определенная по выражению (6) составила:

$$|u_n| = \frac{2(343-293)}{1,4-1} = 250\text{м/с}.$$

Так что результаты эксперимента в полной мере корреспондируются с известными теоретическими положениями.

Подвергая анализу, полученные результаты эксперимента заметим, что они не до конца поясняют природу наблюдаемого эффекта образования линии разрыва. В этой связи рассмотрим гипотезу образования разряжения в рассматриваемом случае связанную с учетом особенностей распространения

расширяющихся газов и проявлением насосного эффекта в результате перемещения поршня, полагая при этом, что поршень в цилиндре выполняет функцию вакуумного насоса, [10].

Причем результат откачки воздуха в этом случае оказывается не завершенным, поскольку используемая конструкция не предусматривает такой цели. Как впрочем, и при движении поршня в цилиндре реального двигателя, где движение поршня в такте расширения осуществляется в момент, когда органы газообмена оказываются закрытыми.

Воспользуемся по этой причине результатами исследований в вакуумной технике, [9]. Отметим при этом, что в используемой нами установке наблюдаемый процесс условно может быть разделен на два этапа. Первый из них может быть охарактеризован как входящий поток газов, поскольку здесь распространение газов по объему цилиндра осуществляется при избыточном давлении. На этом этапе в условно обозначенный насос обеспечивается объем газов при избыточном давлении в единицу времени. Так, что этот поток газов оценивается в виде $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$. А сам входящий поток газов определится из условия:

$$Q_{\text{вх}} = -\frac{d(P_1 \cdot V_1)}{dt} = -V_1 \frac{dP}{dt} \quad (13)$$

На условно выделенном втором этапе наблюдается процесс откачки газов, который обусловлен скоростью перемещения поршня - U_n и, как следствие быстротой «откачки» газов - $\text{м}^3/\text{с}$, т.е. по сути объемной скоростью процесса, допущение о которой нами было сделано в работе [2]. Быстрота откачки определится из соотношения:

$$W = U_n \cdot S \quad (14)$$

где, S – площадь сечения цилиндра.

Так что, количество «откачиваемого» воздуха определится из условия:

$$Q_{\text{от}} = W \cdot P_1 = U_n \cdot S \cdot P_1 \quad (15)$$

В случае равенства $Q_{\text{вх}} = Q_{\text{от}}$ наступает, так называемый режим квазистатического равновесия, [9]. Так что, при выполнении условия

$$W \cdot P_1 = U_n \cdot S \cdot P_1 = -V_1 \frac{dP}{dt}$$

будет наблюдаться линия разрыва.

Воспользовавшись выражением (13) и известными параметрами - P_1, V_1 и t_n определим входящий поток газов - $Q_{\text{вх}}$. Имеем,

$$Q_{\text{вх}} = -\frac{0,000098 \cdot 294200}{0,00016} = 181062\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}.$$

Определим количество «откачиваемого» воздуха движущимся поршнем, имеем:

$$Q_{от} = 250 \cdot 0,00246 \cdot 294200 = 181062 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}.$$

Сопоставляя полученные результаты, отметим, что в рассматриваемом нами процессе наблюдается равенство количества входящего потока газов с количеством «откачиваемых» газов, т.е. наблюдается линия разрыва.

Заметим также, что выдвигаемая гипотеза определения положения линии разрыва, по условию сравнения потока поступающего количества газов и потока «откачиваемого» газа представляется более информативной и относительно простой для исследования. В частности, здесь обеспечивается возможность учесть геометрию цилиндра, в сочетании с газодинамическими характеристиками процесса.

Выводы

На основании полученных результатов эксперимента можно сделать некоторые выводы, с позиций дальнейшего использования при анализе работы реальных конструкций двигателей внутренне-негосгорания: 1. Скорость перемещения поршня под воздействием избыточного давления оказывается значительной, из чего следует, что существуют значительные разбросы значений скорости перемещения поршня. Вероятно, скорость поршня, используемая в оценке работы реального двигателя как средняя величина, не позволяет корректно отобразить специфику его работы. В этом отношении следует осуществлять дифференциацию характера перемещения поршня.

Учитывая вероятность образования линии разрыва в потоке газов, которая получена при эксперименте, представляется целесообразным проведение исследований в этом направлении на реальных конструкциях. На начальном этапе в форме численного исследования при последующей постановке эксперимента на действующих конструкциях дизелей.

Список литературы

1. Пригожин, И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур: Пер. с англ. Ю.А. Данилова и В.В. Белого / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – М.: Мир, 2002. – 461 с.
2. Квасников, И. А. Термодинамика и статистическая физика. Т.1: Теория равновесных систем: Термодинамика / И. А. Квасников. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 240 с.
3. Кругов, М. Г. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания / М. Г. Кругов, А. А. Меднов. – М.: Машиностроение, 1988. – 360 с.
4. Зельдович, Я. Б. Ударные волны большой амплитуды в газах / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер // *Успехи физических наук*. – 1957. – Т. 93. – Вып. 3. – С. 614-641.
5. Зельдович, Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения / Я. Б. Зельдович // *Журнал технической физики*. – 1940. – Т. 10. – Вып. 17. – С. 14-53.
6. Борисов, А. А. Эволюция волн разряжения вблизи термодинамической критической точки / А. А. Борисов,

- А. А. Борисов, С. С. Кутателадзе, В. Е. Накоряков // *Письма ЖЭТФ*. – 1980. – т. 31, вып. 11. – С. 619 – 622.
7. Ударные волны разряжения в численных решениях задач газовой динамики / Абакумов М.В., Мухин С.И., Попов Ю.П., Рогожин Д.В. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2008. – 32 с.
8. Литвиненко, В. П. Неравновесность термомеханических процессов в цикле судовых дизелей: монография / В. П. Литвиненко. – Одесса: Феникс, 2017. – 176 с.
9. Научное открытие России «Явления образования ударных волн разряжения». Авторы: А. Г. Иванов, С. А. Новиков, Ал. А. Борисов, Ан. А. Борисов, Я. Б. Зельдович, С. С. Кутателадзе, В. Е. Накоряков. Заявка: № ОТ-10012 от 30.01.79 / ОТ-10353 от 31.10.80. Дата регистрации: 28 августа 1986 г.
10. Юрьева, А. В. Расчёт вакуумных систем: учебное пособие / А. В. Юрьева. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 114 с.

Bibliography (transliterated)

1. Prigozhin, I., Kondepudi, D. *Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigateley do dissipativnykh struktur*: Per. s angl. [Modern thermodynamics. From thermal engines to dissipative structures]: YU.A. Danilova i V.V. Belogo – М.: Mir, 2002, 461s., il.
2. Kvasnikov, I. A. *Termodinamika i statisticheskaya fizika. T.1: Teoriya ravnovesnykh sistem: Termodinamika* [Theory of regular systems: Thermodynamics]. - М.: Yeditorial URSS, 2002. - 240 p.
3. Krugov, M. G., Mednov, A. A. *Gazovaya dinamika kombinirovannykh dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Gas dynamics of combined internal storage engines]. – М.: Mashinostroyeniye, 1988, 360 s.
4. Zel'dovich, Ya. B., Rayzer, Yu. P. *Udarnyye volny bol'shoy amplitudy v gazakh* [Shock free large amplitudes in gases], *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1957, **93**, 3, 614-641.
5. Zel'dovich, Ya. B. *K voprosu ob energeticheskom ispol'zovanii detonatsionnogo goreniya* [On the issue of energy development fission of detonation combustion], *Journal of Technical Physics*, 1940, **10**, 17, 14-53.
6. Borisov, A. A., Kutateladze, S. S., Nakoryakov, V. Ye. *Evolutsiya voln razryazheniya vblizi termodinamicheskoy kriticheskoy tochki* [Evolution of a wave of expansion in a thermodynamic critical point], *Pis'ma ZHETF*, 1980, **31**, vyp. 11, 619 – 622.
7. *Udarnyye volny razryazheniya v chislennykh resheniyakh zadach gazovoy dinamiki* [Free shock waves in expansions in even solutions for gas dynamics]: Abakumov M. V., Mukhin S. I., Popov Yu. P., Rogozhin D. V. - М.: IPM them. M.V. Keldysh Academy of Sciences, 2008, 32 p.
8. Litvinenko, V. P. *Neravnovesnost' termomekhanicheskikh protsessov v tsikle sudovykh dizeley: monografiya* [Nonequilibrium thermomechanical processes in the cycle of marine diesels: monograph], Odessa: Feniks, 2017, 176 s.
9. *Nauchnoye otkrytiye Rossii «Yavleniya obrazovaniya udarnykh voln razryazheniya»*: A. G. Ivanov, S. A. Novikov, Al. A. Borisov, An. A. Borisov, Ya. B. Zel'dovich, S. S. Kutateladze, V. Ye. Nakoryakov. *Zayavka: № ОТ-10012 от 30.01.79 / ОТ-10353 от 31.10.80. Data registratsii: 28 avgusta 1986 g.*
10. Yuryeva, A. V. *Raschet vakuumnykh sistem: uchebnoye posobiye*. Tomskiy politekhnicheskii universitet, Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2012, 114 s.

Сведения об авторах (About authors)

Литвиненко Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, Азовский морской институт Национального университета «Одесская морская академия», зав. кафедрой «Эксплуатации судовых энергетических установок», г. Мариуполь, Украина; e-mail: jltinski@gmail.com.

Volodymyr Lytyunenko – candidate of Technical Sciences, Docent, the head of «Ship power plant operation», Azov Maritime Institute of the National University «Odessa Maritime Academy», c. Mariupol, Ukraine; e-mail: jltinski@gmail.com.

Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Литвиненко, В. П. Оценка скорости потока газов в системе поршень-цилиндр / **В. П. Литвиненко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 56–64. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.08.

Please cite this article as:

Lytyunenko, V. Evaluation of the flow gaz rate in the piston cylinder system. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 16 (1292), 56–64, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.08.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Литвиненко, В. П. Оцінка швидкості потоку газів в системі поршень – циліндр / **В. П. Литвиненко** // *Вісник НТУ «ХПИ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 56–64. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.08.

АНОТАЦІЯ В сучасних умовах все більш актуальним стає питання щодо пошуку оптимізаційних рішень щодо роботи суднових дизелів. До такого висновку можливо прийти якщо розглянути тенденцію розвитку дизелів з позицій оцінки методів проектування, технічного та технологічного вдосконалення, а також на підставі характеру досліджень, які впроваджуються в даному напрямку. В особливості це стосується теоретичних підходів, які використовуються в сучасних методиках відображення циліндрових термодинамічних процесів. Більшою часткою тут використовуються квазістатичні підходи щодо характеру змін параметрів, маючи на увазі що ці процеси рівноважні та обертові за весь період протікання. Однак як це слід з результатів сучасних досліджень допущення які приймаються не в повній мірі відображають реальність та по цієї причині їх використання стає в певній мірі стримуючим фактором розвитку дизелів. В дослідженні звернута увага на можливість опису роботи двигунів внутрішнього згорання з позицій газової динаміки, стосовно швидкості потоків газу, як фактор що впливає на ефективність термодинамічних процесів. Встановлена недостатність інформації яка стосується врахування потоку газів при вимушених збуреннях, які супроводжуються при роботі дизеля, що призвело до необхідності виготовлення експериментальної установки, яка дозволила з'ясувати закономірності впливу переміщеного в циліндрі поршня на характер змін швидкості потоку газів. Запропоновано алгоритм розрахунку швидкості потоку газів завдяки припущенню щодо рівності швидкостей розповсюдження газів які двинуться під впливом тиску та швидкості вивільнення об'єму циліндра рухомим поршнем, що забезпечило можливість визначити умовно виділену лінію рівноваги потоку газів по швидкості. Отримані результати експерименту свідчать про реальність зроблених припущень, а методи які реалізовані в дослідженні можуть бути використані при аналізі та розрахунку діючих дизелів.

Ключові слова: експериментальна установка; дизель; швидкість потоку газів; поршень; швидкість поршня; насосний ефект; швидкість звуку; вимушені коливання газів; вакуумметр; зворотний клапан; розрядження.

Поступила (received) 04.05.2018

УДК 621.184.54

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.09

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МНОГОХОДОВЫХ ТРУБЧАТЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

Н. А. ТАРАСЕНКО, А. Н. ТАРАСЕНКО, С. В. УГОЛЬНИКОВ

*Кафедра Теплотехники и энергоэффективных технологий, НТУ «ХПИ», Харьков, УКРАИНА
email: bouch@meta.ua*

АННОТАЦИЯ Выполнен обзор существующих методик расчета динамических характеристик рекуперативных трубчатых теплообменных аппаратов. Показано, что для повышения достоверности результатов расчета тепловых характеристик процессов теплообмена воздухоподогревателей целесообразно использовать математическую модель как объекта с распределенными параметрами. На основе модификации неявного численного метода «бегущего счета», разработан метод определения показателей нестационарных процессов теплообмена трубчатых воздухоподогревателей с многоходовой схемой движения теплоносителей. Получены кривые разгона и распределения температур стенок труб трубчатых воздухоподогревателей.

Ключевые слова: воздухоподогреватель; процесс теплообмена; динамические характеристики; кривая разгона; неявный метод; котельная установка

RESEARCH DYNAMICS OF MULTIPASS TUBULAR AIR HEATERS

M. TARASENKO, O. TARASENKO, S. UGOLNIKOV

Department of heat engineering and energy efficiency technologies, NTU «KhPI», Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT A review of existing methods of calculating the dynamic characteristics of the tubular recuperative heat exchangers. It is shown that in order to increase the reliability of the results of calculating the thermal characteristics of heat exchange processes for air heaters, it is expedient to use a mathematical model as an object with distributed parameters. A mathematical model of tubular air heater with a cross flow heat transfer agent, as an object with distributed parameters for different disturbance transition. On the basis of the implicit modification of the numerical method "running account", developed a method to identify indicators of unsteady heat transfer processes tubular air heaters with crossflow heat transfer fluids. Developed a set of programs that allows you to effectively conduct multiple calculations of thermal characteristics air heaters boilers in a wide range of input parameters. The numerical experiments on a mathematical model of tubular air heater and comparing the calculated results with the experimental data of the air heater. The curves of acceleration and temperature distribution and heat transfer tube wall tubular air heaters with one-way and a complex scheme of flow. The resulting graph of the temperature distribution at steady state and dynamic tubular air heaters, which excludes them from the approximate calculation methods for cross-circuit current coolants. The list of parameters that affect the dynamic performance of the air heater and heat their effect on transient and steady-state characteristics. A set of measures to improve the design and patterns include air heaters boilers. Showed that only the use of multiple calculations exploded cross flow can fully account for the effect of uneven temperatures are at the entrance to and inside the heat exchanger.

Keywords: air heater; heat exchange; dynamic characteristics; overlocking curve; implicit method; boiler installation.

Введение

Основной задачей рационализации режимов работы теплообменных аппаратов является обеспечение максимально возможного КПД основного оборудования (котел, газовые печи и др.) или тепловой схемы производства, где теплообменник является рабочим, или регулируемым элементом автоматического управления и контроля.

Воздухоподогреватели рассчитываются на наиболее выгодный стационарный режим. В большинстве случаев стационарный режим работы является условным, поскольку всегда существует изменения параметров теплоносителей на входе, а соответственно и на выходе. Определение динамических характеристик воздухоподогревателей позволяет прогнозировать, какими будут эти изменения, или построить эффективные системы управления для поддержки нестационарного режима в рамках, наиболее близких к выгодному эксплуатационного режима.

За последнее время в ведущих мировых изданиях, вышло большое количество работ,

посвященных разработке высокоточных численных подходов и их приложении к решению различных прикладных задач [1 – 5].

В работах [5 – 10] проводились исследования динамических характеристик рекуперативных теплообменных аппаратов, но в приведенных работах расчет проводился аналитическими методами, которые при решении подобных задач имеют существенные недостатки. Применение аналитических методов для исследования динамики с учетом свойств теплоносителей является сложным, как для получения математической модели так и для ее решения. Использование этих методов приводит к необходимости введения большого количества допущений, которые существенно снижают область применения полученных результатов.

Анализ литературы показывает, что в настоящее время нет относительно простого и точного метода расчета динамических характеристик трубчатого теплообменного аппарата, который можно было бы включить в систему расчета динамических режимов паросиловых и газотурбинных установок.

Такие возможности очень важны как для расчета характеристик установок, так и при проектировании систем автоматического управления теплоэнергетическими объектами.

Цель работы

Совершенствование методов расчета динамических и статических тепловых характеристик процессов теплообмена, что позволит определить пути повышения эффективности и надежности и усовершенствовать конструкции поверхностных трубчатых воздухоподогревателей промышленных и энергетических котлов

Изложение основного материала

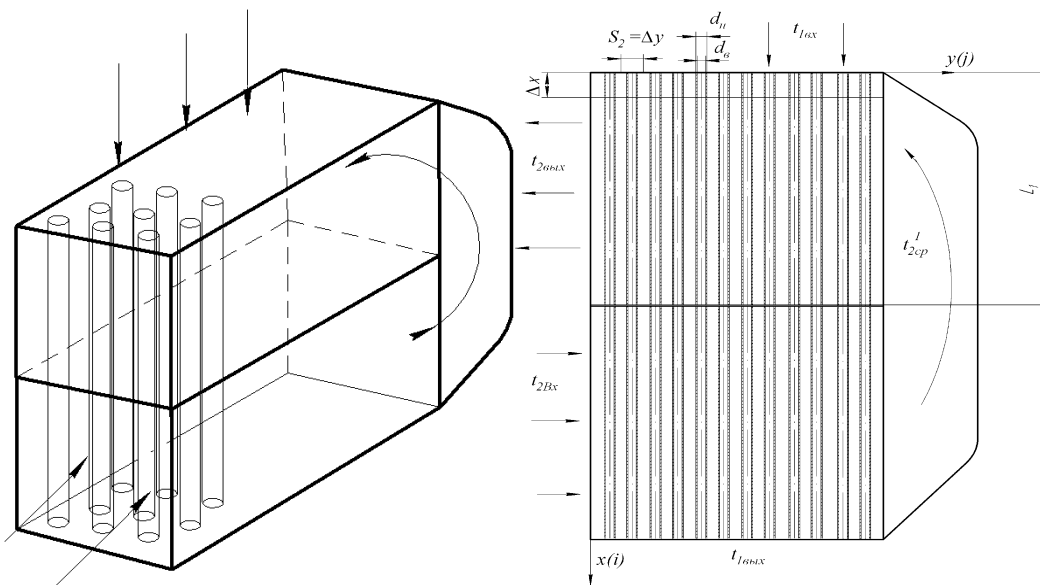


Рис.1 – К расчету двухходового трубчатого ТА с перекрестно противоточной схемой движения теплоносителей

Для исследования динамических характеристик воздухоподогревателя используем математическую модель динамики теплообменного аппарата представленную в работах [11, 12]. Использование данной математической модели при исследовании одноходовых теплообменников показало хорошее совпадение численных результатов и экспериментальных полей температур. Расхождение не превышало 3 – 5 %. Таким образом можно считать, что для исследуемых аппаратов модель достаточно обоснована.

Модифицированные разностные схемы бегущего счета для системы дифференциальных уравнений математической модели трубчатого теплообменного аппарата с перекрестной схемой движения теплоносителей могут быть записаны следующим образом:

- 1) первая ступень – для первого теплоносителя

$$\frac{t_{1,i,j}^{k+1} - t_{1,i,j}^k}{\Delta \tau} + A_1 \frac{t_{1,i,j}^{k+1} - t_{1,i-1,j}^{k+1}}{\Delta x} + B_1 (t_{1,i,j}^{k+1} - t_{c,i,j}^k) = 0, \quad (1)$$

$$0 < i \leq N_1, \quad 0 < j \leq N_2;$$

– для второго теплоносителя

$$\frac{t_{2,i,j}^{k+1} - t_{2,i,j}^k}{\Delta \tau} + A_2 \frac{t_{2,i,j}^{k+1} - t_{2,i,j-1}^{k+1}}{\Delta y} + B_2 (t_{2,i,j}^{k+1} - t_{c,i,j}^k) = 0, \quad (2)$$

$$0 \leq j \leq N_2, \quad N_1 + 1 \leq i \leq N;$$

– тоже для разделительной стенки

$$\frac{t_{c,i,j}^{k+1} - t_{c,i,j}^k}{\Delta \tau} + C_1^* (t_{c,i,j}^{k+1} - t_{1,i,j}^{k+1}) + C_2^* (t_{c,i,j}^{k+1} - t_{2,i,j}^k) = 0, \quad (3)$$

$$N_1 < i < N, \quad 0 < j \leq N_2.$$

- 2) вторая ступень – для первого теплоносителя

$$\frac{t_{1,i,j}^{k+1} - t_{1,i,j}^k}{\Delta\tau} + A_1 \frac{t_{1,i,j}^{k+1} - t_{1,i-1,j}^{k+1}}{\Delta x} + B_1(t_{1,i,j}^{k+1} - t_{c,i,j}^k) = 0, \quad (4)$$

$$N_1 < i \leq N, \quad 0 < j \leq N_2;$$

– для второго теплоносителя

$$\frac{t_{2,i,j}^{k+1} - t_{2,i,j}^k}{\Delta\tau} + A_2 \frac{t_{2,i,j+1}^{k+1} - t_{2,i,j}^{k+1}}{\Delta y} + B_2(t_{2,i,j}^{k+1} - t_{c,i,j}^k) = 0, \quad (5)$$

$$0 < j \leq N_2 - 1, \quad 0 < i \leq N_1;$$

– для разделительной стенки

$$\frac{t_{c,i,j}^{k+1} - t_{c,i,j}^k}{\Delta\tau} + C_1^*(t_{c,i,j}^{k+1} - t_{1,i,j}^{k+1}) + C_2^*(t_{c,i,j}^{k+1} - t_{2,i,j}^k) = 0, \quad (6)$$

$$0 < i < N_1, \quad 0 < j \leq N_2.$$

Численный алгоритм составлен из последовательно решаемых устойчивых разностных уравнений бегущего счета. Алгоритм приемлем для любого закона изменения температуры одного или одновременно двух теплоносителей. Настоящая методика позволит провести параметрический анализ с целью выявить определенные закономерности, которые позволят повысить эффективность и надежность теплообменного оборудования, и может быть положена в основу расчета многоходовых трубчатых теплообменных аппаратов с другими схемами движения теплоносителей. Разработанная методика также может использоваться для определения статических характеристик теплообменного аппарата.

Результаты исследования

Для исследования был выбран стальной трубчатый двухходовой по воздуху воздухоподогреватель из труб диаметром $d_1 = 0,037$ м; $d_2 = 0,04$ м; шаг труб $S_2 = 0,05$ м, $S_1 = 0,055$ м; длина трубы $L = 1,5$ м; количество рядов по ходу воздуха – $n = 20$.

В расчетном исследовании температура продуктов сгорания при входе в воздухоподогреватель не превышала 500 °С. Температура воздуха на входе принималась постоянной, равной 20 °С.

В поворотном коробе после первой ступени происходит интенсивное перемешивание воздуха, потому при расчете на втором ходе температура воздуха принимается как средняя температура за первую ступенью.

Скорости теплоносителей: дымовые газы $U_1 = 10$ м/с; воздух $U_2 = 5$ м/с.

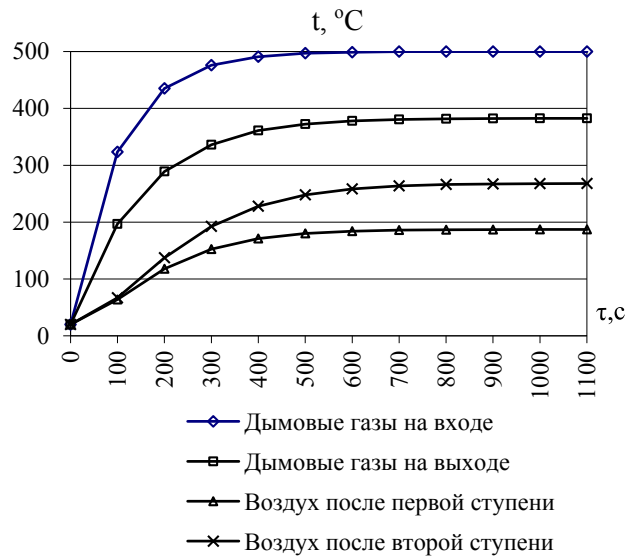


Рис. 2 – Кривая разгона температур теплоносителей в ВП с перекрестно - прямоточной схемой движения

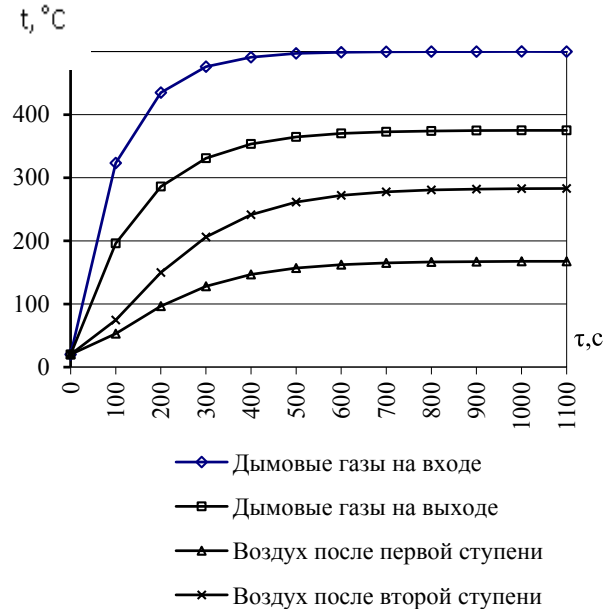


Рис. 3 – Кривая разгона температур теплоносителей в ВП с перекрестно – противоточной схемой движения

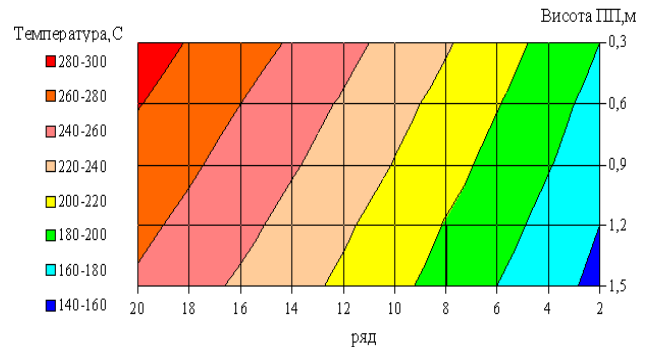


Рис. 4 – Распределение температур стенок труб холодной части в ВП с перекрестно - прямоточной схемой движения

Полученные кривые разгона выходных температур теплоносителей, которые необходимы для определения параметров нестационарных процессов (постоянная времени, время перехода на другой режим, транспортное запаздывание), позволяющие выбрать рациональные схемы автоматического контроля и управления тепловыми схемами современных котельных установок. Получено распределение температур стенок труб в воздухоподогревателе, что позволяет определить места возможного возникновения низкотемпературной коррозии.

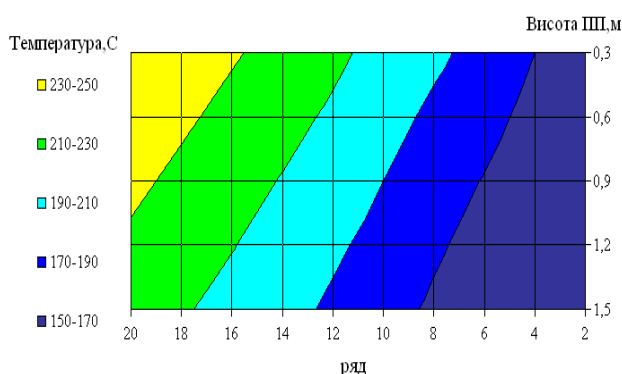


Рис. 5 – Распределение температур стенок труб холодной части в ВП с перекрестно - противоточной схемой движения

Выводы

Анализ кривых разгона (рис. 2-3) показывает, что темп разгона и постоянная времени практически не зависят от схемы движения теплоносителей. Показано (рис. 4-5), что применение перекрестно - противоточной схемы позволяет получить более высокую температуру воздуха на выходе из аппарата, но применение воздухоподогревателя с перекрестно-прямоточной схемой, за счет высокой температуры дымовых газов в холодной части ВП, позволяет поддерживать температуры стенок труб выше температуры точки росы в холодной части ВП, что практически исключает низкотемпературную коррозию на поверхностях нагрева. Анализ хода кривых стенки, теплоносителей и абсолютный баланс тепла, для установившегося состояния воздухоподогревателя позволяет считать, что предложенный метод расчета динамики можно рекомендовать для инженерных расчетов переходных процессов трубчатых воздухоподогревателей котельных установок.

Список литературы

1. Khan, W. A. Optimal design of tube banks in crossflow using entropy generation minimization method / W. A. Khan, J. R. Culham, M. M. Yovanovich // *Thermophysics and heat transfer*. – 2007. – Vol.21. – № 2. – P. 372 – 378. – doi:10.2514/1/26824.

2. Eirola, T. Mathematical model for single-pass crossflow heat exchanger / T. Eirola // *Industrial Mathematics Workshop held at the Institute of Mathematics at Tampere University of Technology*. – 2002.
3. Corre, C. A residual-based compact scheme for the unsteady compressible Navier-Stokes equations / C. Corre, G. Hanss, A. Lerat // *Computers & Fluids*. – 2005. – V. 34 – P. 561–585. – doi: 10.1016/j.compfluid.2003.08.003.
4. Corre, C. High-order residual-based compact schemes for advection-diffusion problems / C. Corre, A. Lerat // *Computers & Fluids*. – 2008. – V. 37. – P. 505–519. – doi:10.1016/j.compfluid.2007.07.009.
5. Liu, Y. Spectral difference method for unstructured grids I: Basic formulation / Y. Liu, M. Vinokur, Z. J. Wang // *J. Comp. Phys.* – 2006. – V. 216. – P. 780–801. – doi:10.1016/j.jcp.2006.01.024.
6. Qian, Wang. Compact high order finite volume method on unstructured grids / Qian Wang, Yu-Xin Ren, Wanai Li // *Journal of Computational Physics*. – 2016. – V. 314. – P. 863 – 882. – doi:10.1016/j.jcp.2016.01.036.
7. Zhou, Q. A new family of high-order compact upwind difference schemes with good spectral resolution / Q. Zhou, Z. Yao, M. Y. Shen // *J. Comp. Phys.* – 2007. – V. 227. – P. 1306–1339.
8. Каминский, В. А. Моделирование теплообмена в аппаратах с перекрестными потоками / В. А. Каминский, Р. М. Никулин // *Теоретические основы химической технологии*. – 2006. – т. 40. – № 1. – С. 51 – 54. – doi: 10.1134/S0040579506010076.
9. Самарский, А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – М.:УРСС, 2003. – 782 с.
10. Пикина, Г. А. О выборе модели теплопередающей стенки при расчете динамики теплообменников / Г. А. Пикина // *Вестник МЭИ*. – 2008. – №1. – 48 – 53 с.
11. Тарасенко, А. Н. Метод расчета тепловых характеристик трубчатых теплообменных аппаратов / А. Н. Тарасенко // *Східно-європейський журнал передових технологій*. – Харків. – 2012. – № 6/5(36). – С. 30 – 34.
12. Тарасенко, А. Н. Эффективный численный метод определения динамических характеристик трубчатых теплообменных аппаратов / А. А. Шевелев, А. Н. Тарасенко // *Вісник НТУ "ХПІ" Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. – Харків: НТУ "ХПІ" – 2009. – № 3. – С. 163 – 167.

Bibliography (transliterated)

1. Khan, W. A., Culham, J. R., Yovanovich, M. M. Optimal design of tube banks in crossflow using entropy generation minimization method. *Thermophysics and heat transfer*, 2007, **21**, 2, 372 – 378, doi:10.2514/1/26824.
2. Eirola, T. Mathematical model for single-pass crossflow heat exchanger. *Industrial Mathematics Workshop held at the Institute of Mathematics at Tampere University of Technology*, 2002.
3. Corre, C., Hanss, G., Lerat, A. A residual-based compact scheme for the unsteady compressible Navier-Stokes equations. *Computers & Fluids*, 2005, V. **34**, 561–585, doi: 10.1016/j.compfluid.2003.08.003.
4. Corre, C., Lerat, A. High-order residual-based compact schemes for advection-diffusion problems. *Computers & Fluids*, 2008, V. **37**, 505–519, doi:10.1016/j.compfluid.2007.07.009.

5. Liu, Y., Vinokur, M., Wang, Z. J. Spectral difference method for unstructured grids I: Basic formulation. *J. Comp. Phys.*, 2006, V. 216, 780–801, doi:10.1016/j.jcp.2006.01.024.
6. Qian, Wang, Yu-Xin, Ren, Wanai, Li. Compact high order finite volume method on unstructured grids. *Journal of Computational Physics*, 2016, V. 314, 863 – 882, doi:10.1016/j.jcp.2016.01.036.
7. Zhou, Q., Yao, Z., Shen, M. Y. A new family of high-order compact upwind difference schemes with good spectral resolution. *J. Comp. Phys.*, 2007, V. 227, 1306–1339.
8. Kaminskiy, V. A., Nikulin, R. M. Modelirovanie teploobmena v apparatah s perekrestnyimi potokami. *Teoreticheskie osnovyi himicheskoy tekhnologii*, 2006, 40, № 1, 51 – 54, doi: 10.1134/S0040579506010076.
9. Samarskiy, A. A., Vabischevich, P. N. Vyichislitel'naya teploperedacha. M.: URSS, 2003, 782 p.
10. Pikina, G. A. O vyibore modeli teploperedayushey stenki pri raschete dinamiki teploobmennikov. *Vestnik MEI*, 2008, №1, 48 – 53.
11. Tarasenko, A. N. Metod rascheta teplovyih karakteristik trubchatyih teploobmennyih apparatov. *Shldno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tekhnologiy*, Harkiv, 2012, 6/5(36), 30–34.
12. Tarasenko, A. N., Shevelev, A. A. Effektivniy chislennyiy metod opredeleniya dinamicheskikh karakteristik trubchatyih teploobmennyih apparatov. *Visnik NTU "KHPI" Energetichni ta teplotekhnichni protsesi i ustatkuvannya*, Kharkiv: NTU "KHPI", 2009, № 3, 163 – 167.

Сведения об авторах (About authors)

Тарасенко Николай Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры Теплотехники и энергоэффективных технологий; г. Харьков, Украина; email: alextar552@gmail.com.

Mykola Tarasenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute, Professor of Department of heat engineering and energy efficiency technologies", Kharkiv, Ukraine; email: alextar552@gmail.com.

Тарасенко Александр Николаевич – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры Теплотехники и энергоэффективных технологий; г. Харьков, Украина; email: bouch@meta.ua.

Oleksandr Tarasenko – Candidate of Technical Sciences, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute, Associate Professor of Department of heat engineering and energy efficiency technologies", Kharkiv, Ukraine; email: bouch@meta.ua.

Угольников Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры Теплотехники и энергоэффективных технологий; г. Харьков, Украина; email: suv237@rambler.ru.

Sergey Ugolnikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute, Associate Professor of Department of heat engineering and energy efficiency technologies", Kharkiv, Ukraine; email: suv237@rambler.ru.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Тарасенко, Н. А. Исследование динамики многоходовых трубчатых воздухоподогревателей / **Н. А. Тарасенко, А. Н. Тарасенко, С. В. Угольников** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 65-69. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.09.

Please cite this article as:

Tarasenko, M., Tarasenko, O., Ugolnikov, S. Research dynamics of multipass tubular air. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 16 (1292), 65-69, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.09.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Тарасенко, М. О. Дослідження динаміки многоходових трубчатих повотропідігрівників / **М. О. Тарасенко, О. М. Тарасенко, С. В. Угольников** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 65-69. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.09.

АНОТАЦІЯ Виконано огляд існуючих методик розрахунку динамічних характеристик рекуперативних трубчастих теплообмінних апаратів. Показано, що для підвищення точності результатів розрахунку теплових характеристик процесів теплообміну повітропідігрівників доцільно використовувати математичну модель як об'єкт з розподіленими параметрами. На основі модифікації неявного чисельного методу «рахунок, що біжить», розроблений метод визначення показників нестационарних процесів теплообміну трубчастих повітропідігрівників з многоходовою схемою руху теплоносіїв. Отримані криві розгону та розподіл температур стінок труб трубчастих повітропідігрівників.

Ключові слова: повітропідігрівник; процес теплообміну; динамічні характеристики; крива розгону; неявний метод; котельна установка

Поступила (received) 04.05.2018

УДК 546.795+542.78

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.10

СВЕРХКРИТИЧЕСКАЯ ФЛЮИДНАЯ CO₂ ЭКСТРАКЦИЯ ТОРИЯ ИЗ "ЧЕРНЫХ" ПЕСКОВ АЗОВСКОГО МОРЯ

В. И. ТКАЧЕНКО^{1,2}, С. Ф. СКОРОМНАЯ¹, Ю. Г. КАЗАРИНОВ^{1,3*}

¹ НПК «ВИЭРТ», ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков, УКРАИНА

² ФЭФ, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, УКРАИНА

³ ФТФ, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, УКРАИНА

*email: yu.kazarinov@karazin.ua

АННОТАЦИЯ Представлены результаты исследования непосредственной экстракции сверхкритическим углекислым газом тория из "черных" песков Азовского моря. За один цикл экстракции при использовании в качестве комплексообразователей ацетилацетона и бензола достигнута эффективность извлечения тория на уровне 24%. Данный метод позволяет снизить радиоактивное загрязнение отдельно взятых территорий, а также получить сырьё для изготовления ториевого топлива для АЭС при минимальном количестве отходов.

Ключевые слова: торий; сверхкритическая флюидная экстракция; ТБФ; бензол; «черный» песок Азовского моря.

SUPERCRITICAL FLUID CO₂ EXTRACTION OF THORIUM FROM "BLACK" SANDS OF THE AZOV SEA

V. TKACHENKO^{1,2}, S. SKOROMNAYA¹, YU. KAZARINOV^{1,3}

¹ NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology" NASU, Kharkiv, UKRAINE

² School of Physics and Energy, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, UKRAINE

³ School of Physics and Technology, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Natural emissions of black sands on the coast of the Azov Sea contain more than 0.1% of thorium. This has a negative radiation impact on humans and at the same time is a source of thorium, capable of replacing uranium as fuel for both water-water nuclear reactors and prospective types of reactors. Supercritical carbon dioxide fluid extraction of thorium from sand is a promising and not expensive method of solving the environmental problem and obtaining raw nuclear materials. Due to the simple scaling of the method of supercritical fluid extraction and reasonable efficiency even at moderate fluid parameters (20 MPa and 40°C) it is possible to use mobile units on the shore excluding the transport of sand. Extremely small quantities of reagents and process waste, carbon dioxide recovery and ecological compatibility of the technology make it possible to return the cleaned sand directly to the shore. Determination of thorium in sand before and after extraction was performed by spectrophotometric method using arsenazo-3 dye. To calibrate the measurement, a thorium solution with a reextraction to tributyl phosphate from nitric acid was prepared. This made it possible to separate thorium from other elements that give a color reaction with arsenazo-3. The optimum total amount of reagents during extraction was 350 µl per 1 gram of sand. The maximum extraction efficiency of thorium in 24% or 300 µg was achieved by using benzene as an additional reagent.

Keywords: Thorium; Supercritical fluid extraction; TBP; benzen; Azov sea black sands.

Введение

Атомные станции обеспечивают около 11% мирового потребления электроэнергии, реакторами с общей электрической мощностью более 390 ГВт [1]. В Украине атомная энергетика является основой энергосистемы, обеспечивая более половины потребностей в электричестве [2]. И в ближайшие 10-15 лет не планируется заменять 13.8 ГВт электрических мощностей АЭС на другие источники. При этом все действующие энергетические реакторы в Украине являются реакторами, работающими на уране с обогащением изотопом ²³⁵ порядка 4%. Разведанные запасы урана в Украине со стоимостью добычи 80 \$/кг в 42000

тонн, при текущем потреблении урана на 15 действующих реакторах в 2480 тонн в год, исчерпаются через 15-16 лет. Можно рассчитывать на дополнительные 26000 тонн урана идентифицированных запасов, а также запасы со стоимостью добычи 130 и более \$/кг. Кроме того, изготовление уранового топлива для АЭС в Украине до сих не реализовано, а собственная добыча составляет около 1000 тонн урана в год, что не покрывает и половины текущих потребностей [3].

Альтернативой урану в качестве реакторного топлива является торий. Исследования ториевого топливного цикла продолжаются уже более 60 лет, и его использование дает перечисленные ниже преимущества [4]:

1) в процессе деления тория образуется изотоп U-233 с ядерными характеристиками сходными с U-235 и Pu-239. То есть U-233 возможно использовать как топливо в практически любом действующем типе энергетических реакторов. Возможно использование тория как топлива в реакторах типа ВВЭР [5], и Канадских реакторах CANDU [6]. Кроме того, ториевое топливо позволяет повысить уровень его выгорания до 30% тяжёлых атомов, по сравнению с 4.2% для уранового [7];

2) в ториевом топливном цикле образуется меньшее количество долгоживущих актинидов, по сравнению с топливными циклами на основе урана и плутония;

3) благодаря низкому уровню наработки Pu-239, ториевые реакторы практически соответствуют режиму нераспространения ядерного оружия и существенно снижают риск ядерного терроризма.

4) меньшая на 20-30% стоимость топлива, особенно из-за отсутствия процедуры изотопического обогащения для тория.

5) реакторы на тории можно использовать для «полезной утилизации» оружейного урана и плутония.

Содержание тория в Земной коре в 3-5 раз превышает содержание урана. Разведанные мировые запасы тория составляют $6.3 \cdot 10^6$ тонн, что более чем в 3 раза меньше, чем запасы урана. Однако из общего количества разведанного урана только для $3.5 \cdot 10^6$ тонн стоимость добычи составит менее 80 \$/кг [3].

Большая часть тория ископаемого тория представляет собой россыпи монацитовых песков, содержащих в среднем до 2.5% тория, хотя встречаются пески с концентрацией в 20%. Монациты растворяют в гидроксиде натрия или серной кислоте и из раствора органическими экстрагентами извлекают необходимые элементы [8].

Кроме жидкостных методов экстракции для разделения и извлечения РЗЭ и актиноидов применяется метод Сверхкритической Флюидной Экстракции (СФЭ) углекислым газом [9,10]. Однако извлечение тория методом СФЭ пока проводится на уровне лабораторных проб из растворов, нанесённых на фильтровальную бумагу [11,12] либо экстракцией следовых количеств его оксидов [13].

В данной работе представлены результаты экстракции методом СФЭ тория из "черного" песка Азовского моря, содержащего торий без предварительной обработки кислотами или щелочами, для минимизации количества жидких отходов.

Эксперимент

2.1. Материалы и химикаты

Образец содержащего торий песка («черный» песок) был отобран на побережье Азовского моря вблизи Бердянска. В Таблице 1 приведены

литературные данные по эффективной активности и концентрации естественных радионуклидов в образце «черного» песка из «пятен» [14].

Для дальнейших исследований песок была измельчён на вибрационной мельнице до размеров частиц не более 50 мкм.

Для приготовления калибровочных и рабочих растворов использовался 5.48 н раствор HCl и HNO₃ с концентрацией 70%. Трибутилфосфат (ТБФ) производства Fluka, чистотой >97% применялся для получения калибровочных растворов тория. Все использованные реагенты имели чистоту не ниже ХЧ. В качестве добавок при СКЭ применялись ацетилацетон (АА), гексан и бензол.

Таблица 1 – Эффективная активность и концентрации естественных радионуклидов «черного» песка [14]

Изотоп	²²⁶ Ra	²³² Th
Активность, Бк/кг	136 ± 20	1333 ± 130
Концентрация, мкг/г	47±7%	1400±136

Определение концентрации тория выполнялось на спектрофотометре СФ-2000 с использованием органического красителя арсеназо-III, формирующего специфическую полосу оптического поглощения при наличии тория. Арсеназо-III не является специфическим реагентом для тория и применяется для определения более 25 элементов [15]. Комплекс арсеназо- III с торием имеет спектр поглощения отличающийся от спектра поглощения чистого реагента, но для эффективного определения тория, растворы арсеназо-III должны иметь значительную кислотность (1-10 н. HCl). Кроме того, при кислотности более 3 н подавляется формирование комплекса с ураном. Поэтому, для исследований был выбран раствор 10⁻⁴% арсеназо-III в 5,48 н растворе HCl.

2.2. Процедура калибровки

Для калибровки измерительного раствора арсеназо-III был приготовлен очищенный раствор тория в ТБФ. Порошок, содержащий торий, растворялся в азотной кислоте с последующим разведением дистиллированной водой до требуемой концентрации. 5 мл. водного раствора смешивались с 1 мл. 33% раствором ТБФ в керосине и периодически взбалтывался. После разделения водной и органической фаз, содержащий торий раствор ТБФ добавлялся в приготовленный раствор арсеназо-III. После расслоения растворов проводилось измерение спектров поглощения. На Рис. 1 показаны спектры поглощения 10⁻⁴% растворов арсеназо-III в 5,48 н растворе HCl при добавлении указанного количества

ТБФ с торием, измеренные относительно исходного раствора арсеназо-III.

Полученное значение молярного коэффициента поглощения в максимуме поглощения 662 нм составляет $\varepsilon=1,6 \cdot 10^7$ моль⁻¹ [15], что даёт при оптической плотности 0,1 минимально измеренную концентрацию тория в растворе порядка 1 мкг/мл с точностью 10%.

Такая процедура получения раствора тория неизбежно сопровождается потерями, однако она позволяет свести к минимуму влияние других химических элементов, которые могут присутствовать в исходном порошке и также давать цветовые реакции с арсеназо-III. Использование в растворе значительного количества соляной кислоты позволило отстроиться от урана, который в таких условиях не дает интенсивной окраски и растворять торий содержащий порошок непосредственно в растворе арсеназо.

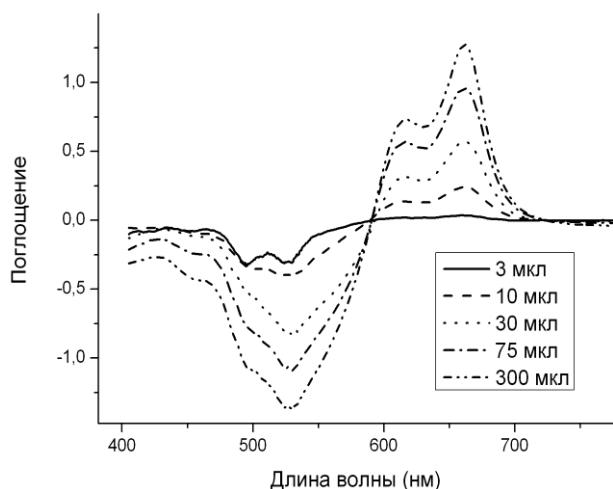


Рис. 1 – Спектры поглощения 10⁻⁴% растворов арсеназо-III в 5,48 н растворе HCl с экстрактом тория в ТБФ

Измерение концентраций содержащий тория в растворах и порошке после растворения в азотной кислоте позволило определить концентрацию тория в ТБФ: 400мкг/мл. Значения коэффициента поглощения в максимуме 662 нм в зависимости от концентрации тория показаны на рис. 2.

В диапазоне от 0 до 15 мкг/мл поглощение возрастает линейно (прямая на Рис. 2) с увеличением концентрации. При больших концентрациях тория, по-видимому, отклонение от линейной зависимости вызвано поглощением красителя керосином и ТБФ, а также, исчерпание всего количества арсеназо-III для образования комплекса с торием.

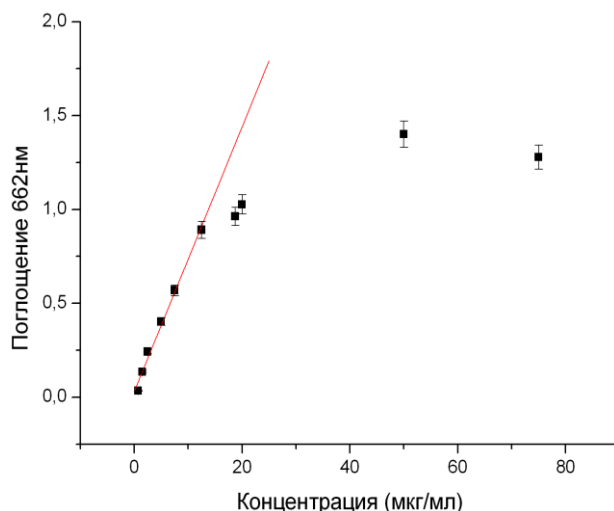


Рис. 2 – Зависимость поглощения 10⁻⁴% растворов арсеназо-III в 5,48 н растворе HCl на длине волны 662 нм от концентрации тория в растворе

Поскольку коэффициент поглощения в максимуме исходного раствора арсеназо-III составляет превышающую 2 величину, то предельное значение концентрации тория, определяемое в таком растворе, составляет около 20 мкг/мл, а минимальное 1 мкг/мл.

Полученные спектры поглощения и концентрационная зависимость (Рис. 1, 2) были использованы для оценки содержания тория в исходных растворах, и в растворах, которые были получены после СФЭ-СО₂.

2.3. Экстракция тория

Подробное описание установки представлено в работе [10]. Объем экстракционной камеры составляет 50 см³, максимальное давление 20 МПа при температуре до 50°C.

Для экспериментов по экстракции использовался порошок песка, содержащего торий, без предварительной химической подготовки. Навеска порошка в количестве 1 г упаковывалась в пакет из фильтровальной бумаги, и помещалась в реактор. Закрытый пакет пропитывался реагентами, состав которых перечислен в Таблице 2. Проводилась статическая экстракция при давлении 19 МПа и температуре 50°C в течение 30 минут. После выдержки проводился сброс экстракта в течение 5 минут, с постоянной подачей углекислого газа для поддержания давления на уровне 10 МПа. После сброса давления до атмосферного, из реактора изымался пакет с порошком, и проводилось измерение остаточной концентрации тория в порошке.

Для этого 40 мг порошка заливались 2 мл 10⁻³% раствора арсеназо-III в 5,48 н растворе HCl. Объем раствора и масса порошка выбирались из условия получения оптического поглощения в

максимуме 662 нм не более 1 для исходного порошка, что соответствует линейному участку калибровочной зависимости на Рис. 2. После формирования окраски, порошок отфильтровывался, и фильтрат измерялся на спектрофотометре. Совпадение положения максимума и формы спектров со спектрами, полученными при исследовании растворов ТБФ с арсеназо-III, позволяют утверждать, что данные изменения относятся именно к изменению концентрации тория. Погрешность в определении эффективности экстракции составляет около 10% от полученной величины, и определяется как двойная погрешность в определении концентрации тория в порошке.

Результаты и обсуждение

Спектры поглощения полученных растворов показаны на Рис. 3. Наряду со спектрами поглощения порошков после экстракции, на рисунке показан спектр, полученный после растворения исходного порошка, не подвергавшегося экстракции. Эффективность экстракции определялась как отношение убыли содержания тория к исходному содержанию и представлена в Таблице 2.

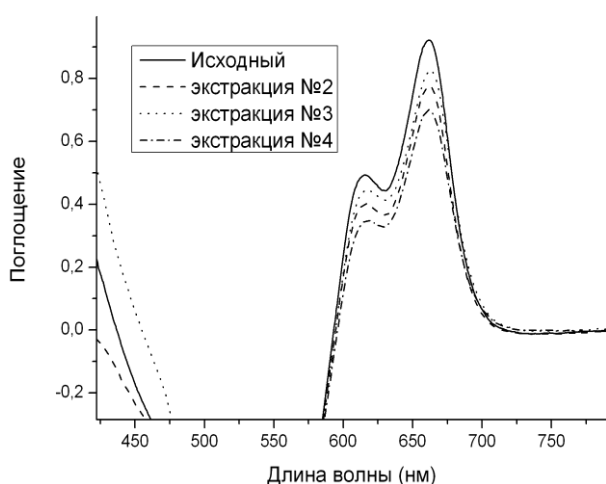


Рис. 3 – Спектры поглощения 2 мл 10⁻⁴% растворов арсеназо-III в 5,48 н растворе HCl с добавлением 40 мг содержащего торий порошка после СФЭ

Исходный набор комплексообразователей был выбран на основе работы [16], однако ГФА был заменен на АА. Как и для извлечения оксида тория, набор ТБФ+АА+вода (экстракция №1) оказался не эффективным для экстракции тория из «чёрного песка». Добавление 0,1 мл гексана (экстракция №2) позволило извлечь 16% тория за одну экстракцию. Увеличение количества всех реагентов вдвое (экстракция №3) снизило эффективность на 5%. Наиболее вероятной причиной такого снижения может быть превышение количества добавленной

воды над пределом растворимости воды в СК углекислом газе при давлении 19 МПа и 50°C [10]. Наибольшее значение эффективности в 24% была получена при замена гексана на бензол (экстракция №4). Это значение соответствует около 300 мкг экстрагированного тория для экстракции без применения химической обработки и использования фторсодержащих β-дикетонов.

Таблица 2 – Состав и количество комплексообразователей и добавок при экстракции тория из порошка.

№	Количество реагентов, мкл				Эффективность экстракции
	ТБФ	АА	вода	добавка	
1	100	100	53	-	0%
2	100	100	53	Гексан, 100	16 %
3	200	200	100	Гексан, 200	11 %
4	100	100	53	Бензол, 100	24 %

В целом, можно надеяться, что практически полное извлечение тория может быть достигнуто при четырехкратной статической СФЭ, а также при более высоких температурах и давлениях, в сочетании с другими комплексообразователями.

Выводы

В работе показана принципиальная возможность экстракции тория из материалов без предварительной химической подготовки образцов. Использование ацетилацетона и бензола при СФЭ позволило извлечь 24% тория. Применение многократной статической экстракции, более высоких температур и давлений в сочетании с другими комплексообразователями, может повысить эффективность СФЭ до практически полного извлечения тория. Технология СФЭ тория является малоотходной и экологически чистой. Ее можно использовать для снижения радиационного загрязнения отдельно взятых территорий, а также получения сырья для изготовления альтернативного ядерного топлива для АЭС.

Список литературы

1. WEC. *World Energy Resources 2016*. – 2016. – vol. 1. URL: http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf.
2. Khalatov, A. A. Energy sector of Ukraine: modern state and nearest prospects / A. A. Khalatov // *Visn Nac Acad Nauk*

- Ukraini*. – 2016. – 6. – P. 53–61. – doi: 10.15407/vism2016.06.053.
3. *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*. Vienna, Austria. – 2016. URL: <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>.
 4. **Ůnak, T.** What is the potential use of thorium in the future energy production technology? / **T. Ůnak** // *Prog Nucl Energy*. – 2000. – vol. 37, 1–4. – P. 137–44. – doi: 10.1016/S0149-1970(00)00038-X.
 5. **Galperin, A.** Thorium Fuel for Light Water Reactors — Reducing Proliferation Potential of Nuclear Power Fuel Cycle / **A. Galperin, P. Reichert, A. Radkowsky** // *Sci Glob Secur*. – 1997. – vol. 6. – P. 265–90. – doi: 10.1080/08929889708426440.
 6. **Ŗahin, S.** Investigation of CANDU reactors as a thorium burner / **S. Ŗahin, K. Yildiz, H. M. Ŗahin, A. Acir** // *Energy Convers Manag.* – 2006. – vol. 47, 13–14. – P. 1661–75. – doi: 10.1016/j.enconman.2005.10.013.
 7. **Шмелев, А. Н.** Гибридный реактор синтеза-деления с ториевым blanketом. О его потенциале в топливном цикле ядерных реакторов / **А. Н. Шмелев, Г. Г. Куликов, В. А. Курнаев, Г. Х. Салахутдинов, Е. Г. Куликов, В. А. Апсе** // *ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез*. – 2014. – Том. 37, № 2. – С. 3–16.
 8. **Schaffer, M. B.** Abundant thorium as an alternative nuclear fuel Important waste disposal and weapon proliferation advantages / **M. B. Schaffer** // *Energy Policy*. – 2013. – vol. 60. – P. 4–12. – doi: 10.1016/j.enpol.2013.04.062.
 9. **Murzin, A. A.** Deactivation in Sub- and Supercritical Carbon Dioxide / **A. A. Murzin, V. A. Babain, A. Y. Shadrin, et al.** // *Radiochemistry*. – 2002. – vol. 44, no. 4. – P. 410–415. – doi: 10.1023/A:1020641431291.
 10. **Борц, Б. В.** Влияние воды на эффективность сверхкритической CO₂ экстракции урана из природных минералов / **Б. В. Борц, Ю. Г. Казаринов, С. А. Сиренко, С. Ф. Скоромная, В. И. Ткаченко** // *Вестник ХНУ им. В.Н. Каразина. Серия: Ядра, частицы, поля*. – 2012. – №1001, вып. 2(54). – С. 125 – 134.
 11. **Kumar, P.** Supercritical fluid extraction of uranium and thorium from solid matrices / **P. Kumar, A. Pal, M. K. Saxena, K. L. Ramakumar** // *Desalination*. – 2008. – vol. 232, no. 1–3. – P. 71–9. – doi: 10.1016/j.desal.2007.08.022.
 12. **Lin, Y.** Supercritical fluid extraction of thorium and uranium ions from solid and liquid materials with fluorinated β -diketones and tributyl phosphate / **Y. Lin, C. M. Wai, F. M. Jean, R. D. Brauer** // *Environ Sci Technol*. – 1994. – vol. 28, no. 6. – P. 1190–1193. – doi: 10.1021/es00055a034.
 13. **Samsonov, M. D.** Recovery of rare earth elements, uranium, and thorium from monazite concentrate by supercritical fluid extraction / **M. D. Samsonov, T. I. Trofimov, Y. M. Kulyako, et al.** // *Radiochemistry*. – 2015. – vol. 57, no. 4. – P. 343–347. – doi: 10.1134/S1066362215040025.
 14. **Zlobenko, B.** State of the art of the problems of NORM in Ukraine / **B. Zlobenko** // *Proc. fifth Int. Symp. Nat. Occur. Radioact. Mater. (NORM V)*. Seville, Spain: IAEA. – 2008. – p. 1.5.
 15. **Саввин, С. Б.** Органические реагенты группы арсеназо-III / **С. Б. Саввин**. – М.: Атомиздат, 1971. – 352 с.
 16. **Мясоедов, Б. Ф.** Сверхкритическая флюидная экстракция радионуклидов / **Б. Ф. Мясоедов, Ю. М. Куляко, А. Ю. Шадрин, М. Д. Самсонов** // *Сверхкритические флюиды: теория и практика*. – 2007. – том. 2, № 3. – С. 5–24.
- Bibliography (transliterated)**
1. WEC. *World Energy Resources 2016*, 2016, **1**. Available at: http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf.
 2. **Khalatov, A. A.** Energy sector of ukraine: modern state and nearest prospects. *Visn Nac Acad Nauk Ukraini*, 2016, **6**, 53–61, doi: 10.15407/vism2016.06.053.
 3. *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*. Vienna, Austria. 2016. Available at: <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>.
 4. **Ůnak, T.** What is the potential use of thorium in the future energy production technology? *Prog Nucl Energy*, 2000, **37**, no. 1–4, 137–44, doi: 10.1016/S0149-1970(00)00038-X.
 5. **Galperin, A., Reichert, P., Radkowsky, A.** Thorium Fuel for Light Water Reactors — Reducing Proliferation Potential of Nuclear Power Fuel Cycle. *Sci Glob Secur*, 1997, **6**, 265–90, doi: 10.1080/08929889708426440.
 6. **Ŗahin, S., Yildiz, K., Ŗahin, H. M., Acir, A.** Investigation of CANDU reactors as a thorium burner. *Energy Convers Manag.*, 2006, **47**, no. 13–14, 1661–75, doi: 10.1016/j.enconman.2005.10.013.
 7. **Shmelev, A. N., Kulikov, G. G., Kurnaev, V. A., Salahutdinov, G. H., Kulikov, E. G., Apse, V. A.** Fusion hybrid with thorium blanket: on its innovative potential in fuel cycle of nuclear reactors. *Probl At Sci Technol Ser Thermonucl Fusion.*, 2014, **37**, no. 2, 3–16.
 8. **Schaffer, M. B.** Abundant thorium as an alternative nuclear fuel Important waste disposal and weapon proliferation advantages. *Energy Policy*, 2013, **60**, 4–12, doi: 10.1016/j.enpol.2013.04.062.
 9. **Murzin, A. A., Babain, V. A., Shadrin, A. Y., et al.** Deactivation in Sub- and Supercritical Carbon Dioxide. *Radiochemistry*, 2002, **44**, no. 4, 410–415, doi: 10.1023/A:1020641431291.
 10. **Borts, B. V., Kazarinov, Y. G., Sirenko, S. A., Skoromnaya, S. F., Tkachenko, V. I.** An effect of water on the uranium supercritical CO₂ extraction effectiveness from natural minerals. *J. Kharkiv Univ. Phys. Ser. Nuclei, Part, Fields*, 2012, **1001**, no. 2, 125–134.
 11. **Kumar, P., Pal, A., Saxena, M. K., Ramakumar, K. L.** Supercritical fluid extraction of uranium and thorium from solid matrices. *Desalination*, 2008, **232**, no. 1–3, 71–9, doi: 10.1016/j.desal.2007.08.022.
 12. **Lin, Y., Wai, C. M., Jean, F. M., Brauer, R. D.** Supercritical fluid extraction of thorium and uranium ions from solid and liquid materials with fluorinated β -diketones and tributyl phosphate. *Environ Sci Technol.*, 1994, **28**, no. 6, 1190–1193, doi: 10.1021/es00055a034.
 13. **Samsonov, M. D., Trofimov, T. I., Kulyako, Y. M., et al.** Recovery of rare earth elements, uranium, and thorium from monazite concentrate by supercritical fluid extraction. *Radiochemistry*, 2015, **57**, no. 4, 343–347, doi: 10.1134/S1066362215040025.
 14. **Zlobenko, B.** State of the art of the problems of NORM in Ukraine. *Proc. fifth Int. Symp. Nat. Occur. Radioact. Mater. (NORM V)*. Seville, Spain: IAEA, 2008, 1.5.
 15. **Savvin, S. B.** *Organicheskie reagenty gruppy arsenazo-III / Organic reagents of arsenazo-III group [in Russian]*. Moskow: Atomizdat, 1971, 352.
 16. **Myasoedov, B. F., Kulyako, Y. M., Shadrin, A. Y., Samsonov, M. D.** Supercritical Fluid Extraction of Radionuclides. *Supercrit Fluids Theory Pract.*, 2007, **2**, no. 3, 5–24.

Сведения об авторах (About authors)

Ткаченко Виктор Иванович – доктор физ.-мат наук, профессор, директор НПК «ВИЭРТ», ННЦ «Харьковский физико-технический институт»; Физико - энергетический факультет, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, зав. кафедрой Нетрадиционных энерготехнологий и экологии, г. Харьков, Украина; e-mail: tkachenko@kipt.kharkov.ua.

Viktor Tkachenko – Doctor of Science, Professor, Director of SPE RESST, NSC “Kharkiv Institute of Physics and Technology”; Head of the Department of Physics of Innovation Energy and Technology and Ecology, School of Physics and Energy, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: tkachenko@kipt.kharkov.ua.

Скоромная Стелла Фёдоровна – кандидат тех. наук, НПК «ВИЭРТ», ННЦ «Харьковский физико-технический институт», старший научный сотрудник, г. Харьков, Украина; e-mail: scoraya09@gmail.com.

Stella Skoromnaya – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher of SPE RESST, NSC “Kharkiv Institute of Physics and Technology”; Kharkiv, Ukraine; e-mail: scoraya09@gmail.com.

Казаринов Юрий Геннадиевич – кандидат физ.-мат. наук, НПК «ВИЭРТ», ННЦ «Харьковский физико-технический институт», научный сотрудник; Физико - технический факультет, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, научный сотрудник кафедры прикладной физики и физики плазмы, г. Харьков, Украина; e-mail: yu.kazarinov@karazin.ua.

Yuri Kazarinov – Candidate of Physics and Mathematics Sciences (Ph. D.), researcher of SPE RESST, NSC “Kharkiv Institute of Physics and Technology”; researcher at Department of Applied Physics and Plasma Physics, School of Physics and Technology, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: e-mail: yu.kazarinov@karazin.ua.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Ткаченко, В. И. Сверхкритическая флюидная CO₂ экстракция тория из "черных" песков Азовского моря / **В. И. Ткаченко, С. Ф. Скоромная, Ю. Г. Казаринов** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 70-75. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.10.

Please cite this article as:

Tkachenko, V., Skoromnaya, S., Kazarinov, Yu. Supercritical fluid CO₂ extraction of thorium from "black" sands of the Azov sea. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 70-75, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.10.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Ткаченко, В. І. Надкритична флюїдна CO₂ екстракція торію з "чорних" пісків Азовського моря / **В. І. Ткаченко, С. Ф. Скоромна, Ю. Г. Казарінов** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 16 (1292). – С. 70-75. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.10.

АНОТАЦІЯ Представлені результати дослідження безпосередньої екстракції надкритичних вуглекислим газом торію з "чорних" пісків Азовського моря. За один цикл екстракції при використанні в якості комплексоутворювачів суміші води, ацетилацетону і бензолу досягнута ефективність вилучення торію на рівні 24%. Даний метод дозволяє зменшити радіоактивне забруднення окремо взятих територій, а також отримати сировину для виготовлення торієвого палива для АЕС при мінімальній кількості радіоактивних відходів.

Ключові слова: торій; надкритична флюїдна екстракція; ТБФ; бензол; «чорний» пісок Азовського моря

Поступила (received) 27.04.2018

УДК 621.3.01

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.11

ПРО ВЗАЄМОДІЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ І ФЕРОМАГНІТНОГО СЕРЕДОВИЩА

I. В. ХОМЕНКО

кафедра «Передача електричної енергії», НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
email: igor.v.khomenko@gmail.com

АННОТАЦІЯ Досліджена взаємодія електромагнітного поля і феромагнітного середовища, показано, що магнітна проникність речовинного середовища є її питомою індуктивністю, встановлений функціональний зв'язок між питомою магнітною провідністю феромагнітного середовища і її магнітною проникністю. Впроваджене поняття електрорушійної сили магнітного зсуву. Природа взаємодії електромагнітного поля і феромагнітного середовища розкрита шляхом використання понять вільних і зв'язаних магнітних доменів. Розглянуто енергетичні процеси, що утворюються при взаємодії електромагнітного поля і феромагнітного середовища.

Ключові слова: електромагнітне поле; феромагнетик; індуктивність; магнітна проникність; електрорушійна сила магнітного зсуву; вільні і зв'язані магнітні домени.

ABOUT THE INTERACTION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD AND THE PERMAGNETIC ENVIRONMENT

I. KHOMENKO

Department "electricity transmission", NTU "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT The task of the actual work is to study the interaction of the electromagnetic field and the ferromagnetic medium, obtaining the main analytical dependencies describing these processes. Mathematical modeling is based on the equations of D.Maxwell. It is established that the magnetic permeability of the medium is its specific inductance, and the functional connection between the specific magnetic conductivity of the ferromagnetic medium and its magnetic permeability is established. Introduced concept of electromotive force of magnetic shift. The energy processes formed in the interaction of an electromagnetic field and a ferromagnetic medium are considered. Theoretical studies are based on the use of concepts of free and bound magnetic domains. The research complements our notions of inductance, which is one of the main technological and design parameters of electrical installations. It is implemented in devices or as a separate element - a coil of inductance (synchronous generator, transformer), or as a characteristic of a particular element (working inductance of power lines). The inductive characteristics of these devices significantly affect the modes in electrical networks and systems. Effective and reliable operation of projected electrical installations and devices can only be achieved if, in their development, the concept of inductance will be taken into account in full on the basis of the conducted research.

Keywords: electromagnetic field; ferromagnet; inductance; magnetic permeability; electromotive force of a magnetic shear; free and bound magnetic domains.

Вступ

Теоретична основа сучасної електроенергетики в узагальненому вигляді представлена рівняннями Максвелла і базується на процесах взаємодії електромагнітного поля і середовища. І як наслідок основні електротехнічні середовища поділяють на провідники, діелектрики і феромагнетики.

Індуктивність є одним з основних технологічних і конструктивних параметрів електроустановок, як і усіх електротехнічних пристроїв [1]. Вона реалізується в пристроях або як окремий елемент – котушка індуктивності (синхронний генератор, трансформатор), або як характеристика того або іншого елемента (робоча індуктивність ліній електропередачі). Індуктивні характеристики суттєво впливають на режими в електричних мережах та системах. Ефективне і

надійне функціонування проєктованих електроустановок та пристроїв можна досягти лише в тому випадку, якщо при їх розробці індуктивність буде враховуватися у повному обсязі.

З метою збільшення магнітного поля в котушках індуктивності використовують феромагнітні осереддя. Це обумовлено властивістю феромагнітних матеріалів намагнічуватися під впливом зовнішнього магнітного поля і як наслідок посилювати його. Феромагнітні середовища складаються з магнітних доменів. По відношенню до зовнішнього магнітного поля вони підрозділяються на вільні і зв'язані. Основною характеристикою магнітного домена є магнітний момент, який обумовлений молекулярними струмами феромагнітного середовища. В процесі намагнічування магнітні моменти зв'язаних магнітних доменів зорієнтовані за напрямком зовнішнього

магнітного поля, змінюються з ним синхронно і практично нерухомі відносно зовнішнього магнітного поля. Вільні домени змінюють напрямок своїх магнітних моментів за напрямком зовнішнього магнітного поля і стають зв'язаними, процес намагнічування завершується і феромагнітне середовище стає насиченим.

Завданням дійсної роботи є дослідження взаємодії магнітного поля і феромагнітного середовища і отримання основних аналітичних залежностей, що описують ці процеси. Ці дослідження доповнюють наші уявлення про фізичні процеси, що відбуваються в електроенергетичних установках і дозволять підвищити їх техніко-економічні характеристики, як в процесі експлуатації так і на етапі їх проектування.

Аналіз публікацій. Фундаментальні основи теорії електромагнітного поля були закладені експериментальними і теоретичними дослідженнями М. Фарадея і Д. Максвелла [2]. Вагомий внесок в сучасну електродинаміку внесли Л. Ландау і І. Тамм [3,4]. Класична теорія феромагнетизму розроблена у працях [5,6,7]. Сучасні дослідження вітчизняних і зарубіжних науковців [8,9,10,11] направлені на доповнення наших уявлень про фізичні процеси взаємодії електромагнітного поля і феромагнітного середовища, а також на вирішення актуальних практичних задач. Так у статті [12] розглянуті особливості магнітних властивостей і характеристик намагнічення листових електротехнічних сталей, у роботі [13] використовується поняття комплексної магнітної проникності для моделювання процесів в електричних машинах, а у публікації [14] проаналізований вплив температури на магнітні властивості феромагнітних середовищ. В праці [15] розглянутий фізико-математичний апарат для опису електромагнітних процесів в пристроях електроживлення на основі коливальних контурів.

Мета статті

Метою статті є дослідження взаємодії електромагнітного поля і феромагнітного середовища, встановлення зв'язку між магнітною проникністю речовинного середовища з її питомою індуктивністю і питомою магнітною провідністю, а також аналіз енергетичних процесів, що утворюються при взаємодії електромагнітного поля і феромагнітного середовища. Вирішення цих питань підвищить достовірність моделювання процесів в електроенергетичних пристроях принцип дії яких заснований на електромагнітних перетвореннях, що в свою чергу підвищить ефективність їх експлуатації.

Основна частина

Основні рівняння електромагнітного поля, постульовані Д. Максвеллом, повною мірою описують електромагнітні процеси всіх

електротехнічних пристроїв [2,16]. Зміст другого рівняння Максвелла полягає в тім, що всяка зміна магнітної індукції в часі викликає вихрове електричне поле

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt}.$$

Величину $-\frac{d\mathbf{B}}{dt}$ Хевісайд називав струмом

магнітного зсуву. Цей струм відображає процеси в магнітних доменах феромагнітного середовища і зв'язаний зі зміною напрямків магнітних і спінових моментів. Зміна струму магнітного зсуву призводить до зміни відповідних магнітних потоків і появи електрорушійної сили (ЕРС) магнітного зсуву $\mathbf{e}_{мс}$. Тому з енергетичної і фізичної точки зору для величини $-\frac{d\mathbf{B}}{dt}$ більш прийнятною є назва – ЕРС магнітного зсуву, або ЕРС зсуву.

Співвідношення між векторами індукції і напруженості магнітного поля, що враховує наявність магнітних доменів у феромагнітному середовищі, описується виразом:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{J}),$$

де \mathbf{H} – напруженість магнітного поля, \mathbf{J} – намагніченість феромагнітного середовища.

Таким чином, ЕРС магнітного зсуву $\mathbf{e}_{мс}$ складається з двох складових:

$$\mathbf{e}_{мс} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt} = -\mu \left(\frac{d\mathbf{H}}{dt} + \frac{d\mathbf{J}}{dt} \right).$$

Складова $\frac{d\mathbf{H}}{dt}$ являє собою ЕРС магнітного зсуву, що відбиває процеси в самому магнітному полі, у просторі між зарядженими частками речовини, що рухаються й усередині них. Складова $\frac{d\mathbf{J}}{dt}$, обумовлена швидкістю зміни намагнічення феромагнетика, є додатковою ЕРС магнітного зсуву, що викликається зміною намагнічення феромагнетика в результаті зміни магнітного поля.

Для однорідного й ізотропного речовинного середовища [16]:

$$\mathbf{B} = \mu_a \mathbf{H},$$

тому

$$\frac{d\mathbf{B}}{dt} = \frac{d(\mu_a \mathbf{H})}{dt},$$

таким чином [17]

$$\text{rot}\mathbf{E} = \frac{d(\mu_a \mathbf{H})}{dt}$$

Фізичний зміст ЕРС магнітного зсуву

$$\mathbf{e}_{\text{мс}} = -\frac{d(\mu_a \mathbf{H})}{dt}$$

показує, що вона виникає в будь-якому магнітному середовищі, у тому числі й у вакуумі, при зміні напруженості магнітного поля, або магнітної проникності речовини.

У відсутності зовнішнього магнітного поля елементарні магнітні домени, що входять в структуру намагніченого магнітного матеріалу, розташовуються таким чином, що в будь-якому макроскопічному об'ємі даного речовинного середовища результуючий магнітний момент дорівнює нулю, і магнітні поля окремих часток взаємно компенсуються.

Для виникнення магнітної ЕРС необхідна наявність причини, що викликала б спрямований рух кордонів магнітних доменів або переорієнтацію їх магнітних моментів. Цією причиною може бути, наприклад, магнітне поле вакууму. При внесенні магнітного матеріалу (речовинного середовища) в магнітне поле вакууму вільні магнітні домени, що входять у структуру даного середовища, починають рухатися – виникає магнітна ЕРС. Ця ЕРС існує доти, поки магнітне поле в магнітному середовищі не досягне свого сталого, постійного значення. Ця ЕРС має дві складові: ЕРС магнітної провідності, що обумовлена вільними магнітними доменами, і ЕРС магнітного зсуву, що відбиває процеси в самому полі й викликається зміною напруженості магнітного поля. У результаті руху та переорієнтації магнітних доменів відбувається їхній перерозподіл у речовинному середовищі так, що на його поверхні і в його об'ємі утворюються поверхневі і об'ємні макроскопічні односпрямовані магнітні домени. Дані домени розташовуються так, що пов'язане з ними поле накладається на зовнішнє й викликає зростання результуючого поля у всіх елементах об'єму магнітного матеріалу [5,6]. Це обумовлено тим, що тіло магнітного матеріалу вноситься у вакуум, магнітна проникність якого менше магнітної проникності тіла, тому що в речовинному середовищі ϵ , на відміну від вакууму, домени, що взаємодіють з зовнішнім магнітним полем. Напруженість \mathbf{H} результуючого поля магнітного матеріалу ϵ геометричною сумою напруженості \mathbf{H}_0 зовнішнього поля й напруженості \mathbf{H}_1 поля доменів магнітного матеріалу. Значення напруженості \mathbf{H}_1 поля магнітних доменів речовинного середовища визначається кількістю елементарних одно направлених струмів або одно направлених магнітних моментів доменів, які перебувають в об'ємі магнітного матеріалу.

Всі магнітні речовинні середовища мають провідність не рівну нулю, тому на поверхні розподілу вакууму й феромагнетика існують поверхневі (об'ємні) струми як зв'язані щільністю δ_{sp} , так і вільні щільністю δ_s . Тангенційна складова вектора магнітної індукції на границі розподілу перетерплює розрив, змінюється стрибком на величину поверхневої щільності вільних струмів δ_s [18]:

$$\delta_s = B_t - B_{t0} = \mu_0(\mu_r H - H_{t0}), \quad (1)$$

де μ_r – відносна магнітна проникність речовини.

Тому що для однорідних і ізотропних речовинних середовищ:

$$\mu_a H_t - \mu_0 H_{t0} = \delta_s,$$

то:

$$\mu_a = \frac{\delta_s + \mu_0 H_{t0}}{H_t},$$

або:

$$\mu_a = \frac{\delta_s}{H_t} + \frac{\mu_0 H_{t0}}{H_t}, \quad (2)$$

де B і H_t – тангенційні складові відповідно вектора \mathbf{B} магнітної індукції й вектора \mathbf{H} напруженості магнітного поля феромагнетика; B_{t0} і H_{t0} – тангенційні складові відповідно вектора \mathbf{B}_0 магнітної індукції й вектора \mathbf{H}_0 напруженості магнітного поля вакууму.

Таким чином, абсолютна магнітна проникність μ_a феромагнітного середовища залежить від щільності δ_s вільних струмів (магнітних моментів) на його поверхні (або в об'ємі). Поверхневий струм формується при внесенні феромагнетика в магнітне поле вакууму за рахунок переміщення вільних струмів під дією магнітного поля вакууму. При цьому змінюється, за рахунок зміни поверхневої щільності δ_s , і абсолютна магнітна проникність μ_a речовинного середовища. Таким чином, протягом усього перехідного процесу, обумовленого внесенням речовинного середовища в магнітне поле вакууму, абсолютна магнітна проникність μ_a феромагнетика є функцією часу доти, поки магнітне поле в феромагнетик не досягне свого сталого, постійного значення. Отже, щільності ЕРС (потокозчеплення), що викликається зміною поверхневого (об'ємного) струму феромагнетика при його внесенні у вакуум, відповідає наступний вираз:

$$\mathbf{e} = \frac{d\delta_s}{dt} = \frac{d}{dt}(\mu_a \mathbf{H} - \mu_0 \mathbf{H}_0). \quad (3)$$

В той же час, з огляду на те, що магнітна постійна $(\mu_0 \cong 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} = \text{const})$ не залежить від часу, і незмінною у часі залишається так само й напруженість \mathbf{H}_0 магнітного поля вакууму, то:

$$\mathbf{e} = \mu_a \frac{d\mathbf{H}}{dt} + \mathbf{H} \frac{d\mu_a}{dt}. \quad (4)$$

Перша складова даної ЕРС $\mu_a \frac{d\mathbf{H}}{dt}$ є ЕРС

магнітного зсуву. Її друга складова $\mathbf{H} \frac{d\mu_a}{dt}$ – ЕРС,

обумовлена зміною поверхневої щільності вільних струмів, тобто впорядкованим рухом вільних заряджених часток (або їх магнітних моментів) при внесенні феромагнетика в магнітне поле вакууму, таким чином, ЕРС магнітної провідності:

$$\mathbf{e}_{\text{пр}} = \mathbf{H} \frac{d\mu_a}{dt}. \quad (5)$$

Тому що відповідно до закону Ома в диференціальній формі для провідного середовища струм провідності визначається виразом $\delta_{\text{пр}} = \gamma \mathbf{E}$, то:

$$\gamma = \frac{d\mu_a}{dt}. \quad (6)$$

Отримана аналітична залежність (6) описує зв'язок між магнітною проникністю й питомою магнітною провідністю будь-якого реального речовинного середовища.

Таким чином, при внесенні речовинного середовища, у якому відсутні феромагнетика, що намагнічуються, в магнітне поле вакууму другого рівнянню Максвелла в диференціальній формі відповідає вираз:

$$\text{rot} \mathbf{E} = \mu_a \frac{d\mathbf{H}}{dt}$$

де $\mathbf{e}_{\text{зс}} = \mu_a \frac{d\mathbf{H}}{dt}$ – ЕРС магнітного зсуву, що відбиває процеси в самому полі, у просторі між атомами магнітної речовини й усередині них.

При наявності в речовинному середовищі феромагнетиків, що намагнічуються, поверхнева щільність зв'язаних струмів (магнітних моментів) $\delta_{\text{сп}}$

на поверхні розподілу вакууму й феромагнітного середовища, тобто на поверхні розриву вектора \mathbf{J} , намагніченості, визначається поверхневою дивергенцією даного вектора [18]:

$$\delta_{\text{сп}} = -\text{Div} \mathbf{J} = -(\mathbf{J} - \mathbf{J}_0) \mathbf{t}_0 = -J_t = \mu_0 (0 - k H_t),$$

де \mathbf{J}_0 і \mathbf{J} – вектори намагніченості із двох сторін від поверхні розриву, причому, $\mathbf{J}_0 = 0$, тому що у вакуумі відсутні вільні магнітні моменти; $k = \mu_r - 1$ – магнітна сприйнятливості феромагнетика; \mathbf{t}_0 – тангенційна складова нульового вектору.

Таким чином:

$$\delta_{\text{сп}} = J_{t0} - J_t = -\mu_0 (\mu_r - 1) H_t = \mu_0 H_t - \mu_a H_t \quad (7)$$

Вираз, що відповідає повній щільності поверхневого струму, може бути знайдений за допомогою складання формул (1) і (7):

$$\delta_s + \delta_{\text{сп}} = \mu_0 (H_t - H_{t0}). \quad (8)$$

Отримана формула відповідає загальному принципу лоренцівській теорії магнітного поля в феромагнетиках: якщо враховувати як вільні, так і зв'язані струми, то всі закони поля можна виражати через вектори напруженості, не звертаючись до векторів магнітної індукції й ігноруючи «проникність» середовища [18].

Таким чином, тангенційна складова напруженості H_{ti} магнітного поля, створюваного вільними й зв'язаними струмами речовинного середовища, може бути визначена виразом:

$$H_{ti} = H_t - H_{t0} = \frac{\delta_s + \delta_{\text{сп}}}{\mu_0}. \quad (9)$$

З огляду на те, що в розглянутому випадку:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_t, \text{ а } \mathbf{H}_0 = \mathbf{H}_{t0},$$

а так само й на те, що в лінійних речовинних середовищах вектор напруженості результуючого магнітного поля відповідно до принципу суперпозиції дорівнює геометричній сумі векторів напруженостей магнітного поля, створюваного струмами речовинного середовища, і поля вакууму, тобто:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_i + \mathbf{H}_0,$$

тому:

$$\mathbf{H}_i = \mathbf{H} - \mathbf{H}_0. \quad (10)$$

Тому що вільні струми (магнітні моменти) зміщуються в напрямку зовнішнього поля, а зв'язані – практично нерухомі, і лінії магнітного поля підходять тангенційно до поверхні розподілу вакууму й ферромагнетика, то вектори \mathbf{H}_i й \mathbf{H}_0 мають однакові напрямки. Таким чином, модуль вектора \mathbf{H} напруженості результуючого поля в ферромагнітному середовищі дорівнює добутку модулів векторів H_0 і H_i , тобто:

$$|H| = |H_0| - |H_i|,$$

тому:

$$H_t - H_{t0} = -(|H_0| - |H_i|) = \frac{\delta_s + \delta_{sp}}{\mu_0}. \quad (11)$$

Тому що величина :

$$H_{ts} = \frac{\delta_s}{\mu_0} = \frac{\mu_0(\mu_r H_t - H_{t0})}{\mu_0} = \mu_r H_t - H_{t0}$$

є тангенційною складовою напруженості магнітного поля, створюваного вільними струмами (магнітними моментами), а величина:

$$H_{isp} = \frac{\delta_{sp}}{\mu_0} = \frac{\mu_0(H_t - \mu_r H_t)}{\mu_0} = H_t - \mu_r H_t$$

– тангенційною складовою напруженості магнітного поля, створюваного зв'язаними струмами (магнітними моментами), то:

$$\mathbf{H}_1 = \mathbf{H}_s + \mathbf{H}_{sp}. \quad (12)$$

У правій частині другого рівняння Максвелла ($\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{e}_{np} + \mathbf{e}_{zc}$) до складу ЕРС зсуву $\mathbf{e}_{мс}$ в цьому

випадку входить додаткова ЕРС зсуву $\left(\frac{d\mathbf{J}}{dt}\right)$, що викликається зміною намагніченості речовини в результаті зміни магнітного поля.

Щоб розглянути енергетичні процеси, що протікають у речовинному ферромагнітному середовищі при зміні напруженості магнітного поля, наприклад, у момент його внесення в магнітне поле вакууму, треба виділити в даному середовищі елементарний об'єм ($dV = dS \cdot dl$).

У процесі створення магнітного поля в цьому об'ємі від джерела магнітної енергії буде взята енергія. У силу малості об'єму можна вважати, що напруженість \mathbf{H} магнітного поля і її зміна $\frac{d\mathbf{H}}{dt}$ ті самі в повному об'ємі. Робота, затрачувана силами поля на

переміщення одиничного струму на відстань dl , що дорівнює довжині елементарного об'єму, визначається як [16]:

$$A = \mathbf{H}d\mathbf{l} \quad (i = A = \int \mathbf{H}d\mathbf{l}).$$

Тому що струм i , що проходить через поперечний переріз даного об'єму, у процесі внесення ферромагнетика в магнітне поле вакууму може бути знайдений по формулі:

$$di = \delta dS,$$

то при переміщенні цього струму або потокозчеплення уздовж елементарного об'єму магнітне поле здійснює роботу, якій відповідає вираз:

$$dA = \delta dS \mathbf{H}d\mathbf{l} = \delta \mathbf{H}dV. \quad (13)$$

Таким чином, енергія, що виділяється в елементарному об'ємі в одиницю часу, визначається як:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{d(\delta \mathbf{H})}{dt} dV = \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{H}dV, \quad (14)$$

де $\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{d\delta}{dt}$ – щільність повної ЕРС, обумовленої зміною магнітного поля речовинного середовища.

Причому: $\delta = \delta_s + \delta_{ps}$, тому: $\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{d\delta}{dt} = \boldsymbol{\varepsilon}_{мп} + \boldsymbol{\varepsilon}_{мс}$.

Крім того: $\mathbf{e}_{мп} = \gamma \mathbf{H}$ і $\mathbf{e}_{мс} = \mu_a \frac{d\mathbf{H}}{dt}$, таким чином:

$$\frac{dW_{ем}}{dt} = \gamma \mathbf{E}dV + \mu_a \mathbf{H} \frac{d\mathbf{H}}{dt} dV = \gamma E^2 dV + \frac{d}{dt} \left(\frac{\mu_a H^2}{2} \right) dV \quad (15)$$

Але $\gamma E^2 dV$ – енергія, що виділяється у вигляді теплоти в елементарному об'ємі dV в одиницю часу, а $\frac{d}{dt} \left(\frac{\mu_a H^2}{2} \right) dV$ швидкість зміни запасу енергії в магнітному полі даного обсягу [16].

Отже, питома енергія, що запасється в магнітному полі речовинного середовища:

$$W_{\text{маг}} = \frac{\mu_a H^2}{2} = \frac{\mathbf{B}\mathbf{H}}{2}. \quad (16)$$

Пристроєм, у якому концентрується магнітна енергія є котушка індуктивності. Основною його характеристикою є індуктивність. Під індуктивністю

розуміють абсолютну величину відносини потокозчеплення до струму, що протікає по котушці і створює це потокозчеплення [19].

На границі розділу середовища й феромагнетика при відсутності ЕРС на поверхні середовища виконується умова: модуль вектора магнітної індукції \mathbf{B} в будь-якій точці феромагнетика, безпосередньо пов'язаною з поверхнею середовища, чисельно дорівнює щільності струму δ на поверхні середовища в даній точці, тобто: $\mathbf{B} = \delta$.

Для однорідного ізотропного феромагнітного середовища: $\mathbf{B}_i = \mu_a \mathbf{H}$, Тому потокозчеплення $d\Psi$ на елементарній поверхні dS ($dq = \sigma dS$) феромагнітного тіла визначається виразом:

$$d\Psi = \mu_a \mathbf{H} d\mathbf{S}.$$

Струмом через елементарні поверхні dS провідних і феромагнітних тіл, обумовленим зарядами, що перебувають на них, прийнято розуміти роботу, затрачувану силами поля при переносі одиничного струму з однієї частини середовища на іншу:

$$di = \mathbf{H} d\mathbf{l}.$$

Таким чином, індуктивність dL системи провідних і феромагнітних середовищ із проникністю μ_a , визначається як:

$$dL = \frac{d\Psi}{di} = \frac{\mu_a \mathbf{H} d\mathbf{S}}{\mathbf{H} d\mathbf{l}},$$

тобто:

$$dL = \frac{\mu_a dS}{dl}.$$

У тому випадку, якщо площі провідних поверхонь dS і відстані dl між ними є одиничними, то:

$$dL = \mu_a. \quad (17)$$

Таким чином, абсолютна магнітна проникність μ_a речовини є питомою індуктивністю.

Тому що, $\mu_a \mathbf{H} d\mathbf{S} = d\Psi_{\text{елл}}$ – потік вектора електромагнітної індукції через поперечний переріз dS елементарного об'єму речовинного середовища із проникністю μ_a , тому електрична індуктивність суть коефіцієнт пропорційності між потоком вектора

магнітної індукції й струмом, що створює даний потік:

$$L = \frac{\int \mu_a \mathbf{H} d\mathbf{S}}{\oint \mathbf{H} d\mathbf{l}} = \frac{\Psi_{\text{елл}}}{I}. \quad (18)$$

Швидкість надходження енергії в елементарний об'єм речовинного магнітного середовища при його внесенні в магнітне поле вакууму характеризується миттєвою потужністю p [4]:

$$p = \frac{dW_{\text{ел}}}{dt} dV = \mu_a \mathbf{H} \frac{d\mathbf{H}}{dt} d\mathbf{S} = \mu_a \mathbf{H} d\mathbf{S} \frac{d\mathbf{H} d\mathbf{l}}{dt}.$$

Або:

$$p = \mathbf{H} d\mathbf{l} \mu_a \frac{d\mathbf{H}}{dt} d\mathbf{S} = i e_{\text{мвс}}, \quad (19)$$

де $i = \mathbf{H} d\mathbf{l}$ – миттєве значення струму, що протікає через елементарний об'єм,

$e_{\text{мвс}} = \mu_a \frac{d\mathbf{H}}{dt} d\mathbf{S} = \epsilon_{\text{мвс}} d\mathbf{S}$ – миттєве значення ЕРС

магнітного зсуву, що створюється в елементарному об'ємі.

Отже, під миттєвою потужністю слід розуміти добуток миттєвого значення струму i в елементарному об'ємі речовинного середовища, на миттєве значення ЕРС магнітного зсуву $e_{\text{мвс}}$, що створюється в даному об'ємі:

$$p = i e_{\text{мвс}}.$$

Таким чином:

$$e_{\text{мвс}} = \frac{p}{i} = \frac{\mu_a \mathbf{H} d\mathbf{S}}{\mathbf{H} d\mathbf{l}} \frac{d\mathbf{H} d\mathbf{l}}{dt}, \quad (20)$$

тому:

$$e_{\text{мвс}} = L \frac{di}{dt}. \quad (21)$$

Висновки

Таким чином, досліджена взаємодія електромагнітного поля і феромагнітного середовища, шляхом використання понять вільних і зв'язаних магнітних доменів.

Встановлено що магнітна проникність речовинного середовища є її питомою індуктивністю, встановлений функціональний зв'язок між питомою магнітною провідністю феромагнітного середовища і її магнітною проникністю. Впроваджене поняття

електрорушійної сили магнітного зсуву. Розглянуто енергетичні процеси, що утворюються при взаємодії електромагнітного поля і ферромагнітного середовища. Проведені дослідження доповнюють наші уявлення про фізичні процеси, що відбуваються в електроенергетичних установках і дозволять підвищити їх техніко-економічні характеристики, як в процесі експлуатації так і на етапі їх проектування.

Список літератури

1. Федоров, Н. Н. Основы электродинамики / Н. Н. Федоров. – М.: Вища школа, 1965. 328 с.
2. Максвелл, Дж. К. Трактат об электричестве и магнетизме. В двух томах / Дж. К. Максвелл. – М.: Наука, 1989.
3. Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982.
4. Тамм, И. Е. Основы теории электричества / И. Е. Тамм. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.
5. Тикадзуми, С. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества / С. Тикадзуми. – М.: Мир, 1983.
6. Тикадзуми, С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практическое применение / С. Тикадзуми. – М.: Мир, 1987.
7. Вонсовский, С. В. Магнетизм: Учебное пособие / С. В. Вонсовский. – М.: Наука, 1984. – 208 с.
8. Zong, B. Y. Tailoring Diverse Microwave Properties of High Magnetic Moment FeCo Nanofilms through Different Atom Arrangements / B. Y. Zong, N. N. Phuoc, Y. P. Wu, P. Ho, et al. // *ChemElectrochem*. – 2015. – 2, 11. – 1760-1767. – doi: 10.1002/celec.201500230.
9. Al'Azzavi, H. S. M. Влияние окисленных прослоек на магнитные свойства многослойных пленок на основе нанокompозитов аморфный ферромагнетик-диэлектрик / H. S. M. Al'Azzavi, A. B. Грановский, Ю. Е. Калинин, В. А. Макагонов, и др. // *ФТТ*. – 2016. – 58, 5. – 910-916.
10. Geng, H. [Fe₈₀Ni₂₀-O/SiO₂]_n Multilayer thin films for applications in GHz range / H. Geng, J. Q. Wei, S. J. Niea, Y. Wang, et al. // *Mater. Lett.* – 2013. – 92. – 346-349. – doi: 10.1016/j.matlet.2012.11.015.
11. Chen, J. H. High frequency characteristics of NiO/(FeCo/NiO)₁₀ multilayers with exchange anisotropy / J. H. Chen, D. M. Tang, Y. W. Li, B. S. Zhang, et al. // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2010. – 322, 20. – 3109-3111. – doi: 10.1016/j.jmmm.2010.05.039.
12. Рожненко, Ж. Г. Особенности магнитных свойств и характеристик намагничивания листовых электротехнических сталей / Ж. Г. Рожненко, С. Т. Толмачев // *Электротехника и Электромеханика*. – 2010. №2. – С. 37-41.
13. Бравичев, С. Н. Применение понятия комплексной магнитной проницаемости при расчетах магнитных полей электрических машин / С. Н. Бравичев, В. В. Быковский // *Вестник ОГУ*. – 2004. – №2. – С. 190-193.
14. Себко, В. В. Воздействие температуры на магнитную проницаемость и удельное электрическое сопротивление цилиндрического изделия / В. В. Себко // *Электротехника и электромеханика*. – 2003. – №3. – С. 44-47.
15. Гейзер, А. А. Физико-математический аппарат для описания лектромагнитных процессов в устройствах электропитания на основе колебательных контуров / А.

- А. Гейзер // *Вестник Приазов. Гос. Техн. Ун-та*. -1995. - № 1. – С. 284-287.
16. Бессонов, Л. А. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле / Л. А. Бессонов. – М.: Вища школа, 1986. – 263 с.
17. Сукачев, А. П. Теоретичні основи електротехніки. Частина І. Фізичні основи електротехніки / А. П. Сукачев. – Харків, 1959. – 460 с.
18. Поливанов, К. М. Теоретичні основи електротехніки, ч. 3, Теорія електромагнітного поля / К. М. Поливанов. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.
19. Шимони, К. Теоретична електротехніка / К. Шимони. – М.: Мир, 1964. -773 с.

Bibliography (transliterated)

1. Fedorov, N. N. Osnovi elektrodinamiki [Fundamentals of Electrodynamics]. Moscow: Vishha shkola, 1965, 328.
2. Maksvell, D. K. Traktat ob jelektrichestve i magnetizme. V dvuh tomah. [Treatise in electrical and magnetism. In a two parts]. Moscow: Nauka, 1989.
3. Landau, L. D., Lifshic, E. M. Jelektrodinamika sploshnyh sred [Electrodynamics of Continuous Media]. Moscow: Nauka, 1982.
4. Tamm, I. E. Osnovy teorii jelektrichestva [Fundamentals of the theory of electricity]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 616.
5. Tikadzumi, S. Fizika ferromagnetizma. Magnitnye svojstva veshhestva [Physics of ferromagnetism. Magnetic properties of matter]. Moscow: Mir, 1983.
6. Tikadzumi, S. Fizika ferromagnetizma. Magnitnye harakteristiki i prakticheskoe primenenie [Physics of ferromagnetism. Magnetic characteristics and practical application]. Moscow: Mir, 1987.
7. Vonsovskij, S. V. Magnetizm: Uchebnoe posobie [Magnetism: A Tutorial]. Moscow: Nauka, 1984, 208.
8. Zong, B. Y., Phuoc, N. N., Wu, Y. P., et al. Tailoring Diverse Microwave Properties of High Magnetic Moment FeCo Nanofilms through Different Atom Arrangements. *ChemElectroChem*, 2015, 2, 1760-1767, doi:10.1002/celec.201500230.
9. Al'Azzavi, H. S., Granovskij, A. B., Kalinin, Ju. E., et al. Vlijanie oksislennyh prosloek na magnitnye svojstva mnogoslonyh plenok na osnove nanokompозитов amorfnyj ferromagnetik-dielektrik [The effect of oxidized interlayers on the magnetic properties of multilayer films based on amorphous ferromagnet-dielectric nanocomposites]. *Fizika tverdogo tela*, 2016, 5, 910-916.
10. Geng, H., Wei, J. Q., Nie, S. J., et al. [Fe₈₀Ni₂₀-O/SiO₂]_n Multilayer thin films for applications in GHz range. *Materials Letters*, 2013, 92, 346-349, doi:10.1016/j.matlet.2012.11.015.
11. Chen, J. H., Tang, D. M., Li, Y. W., et al. High frequency characteristics of NiO/(FeCo/NiO)₁₀ multilayers with exchange anisotropy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 322, 3109-3111, doi:10.1016/j.jmmm.2010.05.039.
12. Rozhnenko, Zh. G., Tolmachov, S. T. Osobennosti magnitnyh svojstv i harakteristik namagnichivaniya listovyh jelektrotehnickeskih stalej [Features of magnetic properties and magnetization characteristics of electrical grade sheet]. *Elektrotehnika i Elektromehaniка*, 2010, 2, 37-41.
13. Bravichev, S. N., Bykovskij, V. V. Osobennosti magnitnyh svojstv i harakteristik namagnichivaniya listovyh jelektrotehnickeskih stalej [Features of magnetic properties

- and characteristics of magnetization of sheet electrotechnical steels]. *Vestnik OGU*, 2004, **2**, 190–193.
14. **Sebko, V. V.** Vozdejstvie temperatury na magnitnuju pronicaemost' i udel'noe jelektricheskoe soprotivlenie cilindricheskogo izdelija [The effect of temperature on the magnetic permeability and the specific electrical resistance of a cylindrical article]. *Elektrotehnika i Elektromehnika*, 2003, **3**, 44-47.
 15. **Gejzer, A. A.** Fiziko-matematicheskij apparat dlja opisaniya jelektromagnitnyh processov v ustrojstvah jelektropitanija na osnove kolebatel'nyh konturov [Physico-mathematical apparatus for describing electromagnetic processes in power supply devices based on oscillatory circuits]. *Vestnik Priazov. Gos. Tehn. Un-ty*, 1995, **1**, 284-287.
 16. **Bessonov, L. A.** Teoretichni osnovi elektrotehniki. Elektromagnitne pole [Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field]. Moscow: Vishha shkola, 1986, 263.
 17. **Sukachev, A. P.** Teoretichni osnovi elektrotehniki. Chastina J. Fizichni osnovi elektrotehniki [Theoretical foundations of electrical engineering. Part J. Physical basis of electrical engineering]. Kharkiv, 1959, 460.
 18. **Polivanov, K. M.** Teoretichni osnovi elektrotehniki. Teorija jelektromagnitnogo polja [Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field theory]. Moscow: Energija, 1969, 352.
 19. **Shimoni, K.** Teoretichna elektrotehnika [Theoretical electrical engineering]. Moscow: Mir, 1964, 773.

Сведения об авторах (About authors)

Хоменко Ігор Васильович – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Передача електричної енергії», НТУ «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Igor Khomenko – candidate of technical sciences, associate professor, Department "electricity transmission", NTU "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, UKRAINE; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Хоменко, І. В. Про взаємодію електромагнітного поля і ферромагнітного середовища / **І. В. Хоменко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 16 (1292). – С. 76-83. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.11.

Please cite this article as:

Khomenko, I. About the interaction of the electromagnetic field and the permagnetic environment. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 76-83, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.11.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Хоменко, И. В. Про взаимодействия электромагнитного поля и ферромагнитной среды / **И. В. Хоменко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 76-83. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.11.

АННОТАЦИЯ Исследовано взаимодействие электромагнитного поля и ферромагнитной среды, показано, что магнитная проницаемость вещественной среды является ее удельной индуктивностью, установлена функциональная связь между удельной магнитной проводимостью ферромагнитной среды и ее магнитной проницаемостью. Введено понятие электродвижущей силы магнитного смещения. Природа взаимодействия электромагнитного поля и ферромагнитной среды раскрыта путем использования понятий свободных и связанных магнитных доменов. Рассмотрены энергетические процессы, которые образуются при взаимодействии электромагнитного поля и ферромагнитной среды.

Ключевые слова: электромагнитное поле; ферромагнетик; индуктивность; магнитная проницаемость; электродвижущая сила магнитного смещения; свободные и связанные магнитные домены.

Поступила (received) 05.05.2018

УДК 539.12:687.157

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.12

МЕТОД ОБРОБКИ РАДІАЦІЙНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ СПЕЦІАЛЬНОГО ОДЯГУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГІГІЄНИ ПРАЦІ

О. М. ЧЕРНЯК*

Аспірантка, УІПА, Харків, УКРАЇНА

*email: olena-cheraniak@ukr.net

АНОТАЦІЯ У статті зазначено про важливість догляду за спеціальним одягом робітників, проведено аналіз сучасних підходів до дезінфекції та визначено певні недоліки цих методів. Запропоновано проводити стерилізацію спецодягу методом пучком прискорених електронів. Для того, щоб визначити яка доза буде ефективна для стерилізації одягу, проведено експеримент, щодо визначення бактерій та мікроорганізмів, в матеріалах спеціального одягу, до дезінфекції іонізуючим випромінюванням та після. Визначено і обґрунтовано необхідність використання чисельного моделювання в радіаційних технологіях.

Ключові слова: спеціальний одяг; дезінфекція; радіаційні технології; іонізуюче випромінювання; поглинена доза; прискорювач електронів; чисельне моделювання.

THE METHOD OF PROCESSING THE SPECIAL CLOTHES OF RADIATION TECHNOLOGY TO PROVIDE OCCUPATIONAL HEALTH

О. CHERNIAK*

Graduate student, UEPA, Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT Among many means of individual protection a special place is reserved for special clothing, since it constantly contacts the body of a person, promotes the creation of a microclimate and protects against various unfavorable factors in the production environment. The purpose of this work is to conduct experimental studies to confirm the hypothesis about the possibility of applying radiation technologies for the disinfection of special clothing. The analysis of modern approaches to the disinfection of special clothing has been carried out, and certain deficiencies of these methods have been identified, for example, insulated clothing and clothing treated with special substances, washing is forbidden. It is proposed to carry out sterilization of overalls by a beam of accelerated electrons. The advantages of radiation treatment are determined - high ecological safety, low cost, and the product itself after treatment, subject to compliance with the technological regulations, is non-toxic. In order to determine which dose will be effective for the sterilization of clothing, an experiment was conducted to identify bacteria and microorganisms in special clothing materials, to disinfection with ionizing radiation and after. The advantages of numerical simulation in radiation technologies are presented in detail, which at present is one of the most powerful methods for calculating the dose map, absorbed dose, and range of charged particles. On the example of numerical simulation of gamma rays performed by GEANT4 - convergence of simulation results and dosimetric measurements was 88-90%.

Keywords: special clothing; disinfection; radiation technology; ionizing radiation; absorbed dose; electron accelerator; numerical simulation.

Вступ

Для захисту працівників, які виконують шкідливі, небезпечні та брудні види робіт, а також здійснюють роботи в особливих температурних умовах видається спецодяг. Спеціальний одяг регулює тепловий стан організму, оберігаючи його від перегрівання і переохолодження, сприяє попередженню простудних захворювань, а також повинен задовольняти певні експлуатаційні вимоги – бути зручним, достатньо міцним. Спецодяг в процесі носіння потребує догляду, оскільки погіршення первинних захисних, гігієнічних і експлуатаційних властивостей спецодягу не забезпечують нормальні функції організму і здатність людини зберігати потрібну працездатність, сприяє виникненню, у

робочих, шкірних, простудних та інших захворювань. Регулярний догляд за спецодягом сприяє поліпшенню санітарно-гігієнічних умов праці робітників і зниження захворюваності.

Мета роботи

Провести експериментальні дослідження для підтвердження гіпотези про можливість застосування радіаційних технологій для дезінфекції спеціального одягу.

Викладення основного матеріалу

Захисні, експлуатаційні та гігієнічні властивості спецодягу багато в чому визначаються

матеріалами, з яких він виготовляється. Асортимент матеріалів, використовуваних для виготовлення спеціального одягу, досить різноманітний. Для верху виробів в основному використовуються бавовняні, лляні, вовняні, змішані і синтетичні тканини, натуральне і штучне хутро, трикотажні полотна. В даний час все частіше використовуються більш довговічні і зносостійкі сумішеві тканини. Хоча тканини зі стовідсотковим вмістом натуральних волокон залишаються актуальними для специфічних спеціальностей, де використання синтетичних ниток просто неприпустимо з міркувань пожежної безпеки, або де велика ймовірність виникнення статичної електрики в матеріалі одягу. В якості підкладкових матеріалів виступають бавовняні, змішані і синтетичні тканини. Основними утеплювачами робочого одягу є вата, ватин, хутро штучне і натуральне, синтетичний об'ємний утеплювач [1].

Забруднення одягу відбувається зсередини (рідкими і газоподібними продуктами життєдіяльності шкіри) і зовні (від потрапляння пилу і забруднюючих речовин). Одяг та білизна, крім механічного (пил, бруд), і хімічного (гази) забруднення, піддаються до забруднення мікроорганізмами і паразитами.

Тканини одягу, забруднені пилом, виділеннями з носоглотки, випарами, можуть містити патогенні збудники - мікобактерію туберкульозу, мікроорганізми тифо-паратифозної групи, стрептококи, стафілококи. Особливо сильно забруднюються білизна і вовняний одяг, велика товщина якої, рихлість і порівняно рідкісне прання сприяють накопиченню мікроорганізмів. Через забруднений одяг можуть передаватися черевний тиф, дизентерія та інші інфекції. Небезпека такої передачі визначається тривалістю виживання мікроорганізмів на тканині. З огляду на епідемічну небезпеку зараженого одягу її необхідно дезінфікувати [2].

Дезінфекція верхнього одягу, проводиться обробкою за допомогою пароповітряної чи пароформалінової суміші, кип'ятінням, пранням або замочуванням у розчинах для дезінфекції. Обробка пароповітряною сумішшю використовується для дезінфекції усіх видів одягу та засобів індивідуального захисту, окрім шубно-хутрових, шкіряних і валяних виробів, які підлягають обробці пароформаліновою сумішшю. Обробка за допомогою кип'ятіння застосовується для проведення дезінфекції виробів з бавовнянопаперових тканин та засобів індивідуального захисту, які виготовлені з гуми або прогумованої тканини.

Дезінфекції способом замочування у різноманітних дезінфекційних розчинах підлягають вироби із бавовнянопаперових тканин. Дезінфекція верхнього одягу та засобів індивідуального захисту, які забруднені вегетативними формами мікроорганізмів, здійснюється способом замочування у 5 %-му водному розчині лізолу, фенолу чи нафталізолу (у випадку забруднення вірусом

натуральної віспи концентрація розчину збільшується до 8 %), 2,5 %-му розчині формальдегіду або 3 %-му розчині монохлораміну протягом 1 години. При забрудненні мікроорганізмами у формі спор замочування одягу та засобів індивідуального захисту слід здійснювати у 10 %-му розчині формальдегіду протягом 2 годин. Водні розчини миючих засобів по відношенню до хвороботворних мікроорганізмів проявляють слабку дезінфікуючу дію і використовуються, в основному, лише для зниження засівання мікроорганізмами поверхонь і нейтралізації токсинів [3].

Однак такі види дезінфекції можуть викликати зношеність і усадку тканин, крім того, для деяких широко використовуваних видів утеплювачів спецодягу (швейна вата, ватин) прання взагалі неприйнятне, так як погіршується якість спецодягу.

Тому пропонуємо застосовувати спосіб дезінфекції одягу, заснований на застосуванні іонізуючого випромінювання. Сутність способу полягає в тому, що одяг піддається обробці одним з видів іонізуючого випромінювання: гамма-випромінювання, прискорені електрони.

Радіаційні технології знаходять своє застосування в багатьох сферах життєдіяльності людини. Галузь застосування радіаційних технологій, і зокрема, прискорювачів електронів дуже широка [4]:

1. Радіаційне модифікування матеріалів:
 - а. Виробництво кабелів і проводів з радіаційно-зшитотою ізоляцією.
 - б. Виготовлення зміцнених і термосідаючих виробів.
 - в. Вулканізація еластомерів і виробів з них.
2. Радіаційна полімеризація:
 - а. Радіаційне затвердіння покриттів.
 - б. Радіаційна щеплювальна полімеризація.
 - в. Виробництво модифікованих пористих матеріалів.
3. Радіаційна деструкція (отримання корму і кормових добавок з целюлозовмісних відходів, регулювання молекулярної маси полімерів, деструкція тефлону і гум з бутилкаучуку).
4. Радіаційна стерилізація медичних виробів.
5. Використання радіаційних технологій в екології:
 - а. Радіаційна очищення природної води.
 - б. Радіаційна очищення стічних вод і осадів стічних вод.
 - в. Радіаційна очищення викидних газів.
 - г. Радіаційна обробка твердих відходів.
 - б. Радіаційна обробка харчових продуктів.
7. Радіаційно-фізичні технології (іонна імплантація (на прискорювачах іонів), легування напівпровідників за допомогою ядерних реакцій (під дією теплових нейтронів), модифікування напівпровідникових матеріалів і виробів, виготовлення полімерних мембран і резисторів для літографії, зміна забарвлення скла і кристалів, теплова дія потужних електронних пучків).

8. Застосування прискорювачів електронів в медицині:

а. Променева терапія злоякісних новоутворень.

б. Променева терапія непухлинних захворювань.

в. Інтраопераційна променева терапія.

9. Застосування прискорювачів електронів в доглядових комплексах.

10. Застосування електронних прискорювачів для дефектоскопії.

11. Застосування іонізуючого випромінювання для збереження музейних експонатів.

Стандартна технологічна установка для стерилізації включає прискорювач електронів з системою сканування пучка, а також конвеєр для дистанційної транспортування ящиків з робочими виробами в зону опромінення. Одяг, який спрямовується на радіаційну стерилізацію, пакується в картонні гофроящики, розмір і маса яких попередньо погоджуються для забезпечення необхідного режиму обробки.

Всі сучасні прискорювачі в залежності від форми траєкторії прискорених частинок діляться на дві великі групи: лінійні і циклічні [5]. Нерезонансними лінійними прискорювачами, в яких для прискорення використовується постійне електростатичне поле, є імпульсні високовольтні трансформатори, високовольтні установки типу Кокрофта-Уолтона, електростатичний генератор Ван де Грааф і ін. До таких прискорювачів відноситься розглянутий в даній роботі лінійний прискорювач електронів (ЛУЕ) ЛУ-10.

На цій установці накопичений великий досвід по стерилізації промислових партій різних одноразових виробів медичного призначення: шприців, голок до них, систем переливання крові, бинтів, кетгуту та ін. При стерилізаційній дозі 25кГр продуктивність радіаційно-технологічної установки становить не менше 15 т продукції на добу [6].

Характеристики ЛУЕ ЛУ-10 наведено у табл. 1 [7].

Одним з основних критеріїв радіаційної обробки є поглинена доза. Доза в будь-якій точці ящика залежить від енергії електронів, середнього струму, ширини розгортки, швидкості конвеєра, товщини і щільності об'єкта, а також самого матеріалу, який знаходиться між вікном виведення пучка, і цією точкою. На дозу також може впливати наявність неоднорідностей в оброблюваному матеріалі внаслідок розсіювання електронів на межах розділу [8].

Щоб знати яку дозу необхідно надати спеціальному одягу, що обробляється, для забезпечення її стерильності (стерилізаційна доза) необхідно попередньо провести випробування. Для проведення випробувань відбираємо по 5 зразків швейної вати і синтепону, кожному з яких необхідно повідомити певну дозу по мірі наростання: на перший - 5 кГр, другий - 10 кГр, далі - 15, 20, і 25 кГр. Після

опромінення ці зразки відправляємо в бактеріологічну лабораторію.

Таблиця 1 - Параметри випромінювання радіаційної установки з прискорювачем ЛУ-10

Електронне випромінювання	
Енергія електронів, МеВ	8...18
Номінальне значення енергії електронів, МеВ	10
Тривалість імпульсу, мкс	3.5
Частота проходження імпульсів пучка, Гц	12.5...300
Струм пучка (середнє значення), мкА	до 1000
Частота сканування пучка, Гц	3
Геометричні розміри пучка (на випускному вікні), см	2×30
Нерівномірність лінійної щільності потоку електронів уздовж робочої зони розгортки пучка, % не більше	±3
Потужність поглиненої дози електронного випромінювання в дакріле, Гр/с	до 1·10 ³
Гальмівне випромінювання	
Потік енергії (потужність) гальмівного випромінювання (ГВ), кВт	до 1.6
Геометричні розміри потоку ГВ (на конвертері), см	3×35
Потужність поглиненої дози ГВ в дакріле, Гр/с	до 1.0

У лабораторії визначають загальну кількість бактерій об'єкта, наявність санітарно-показової мікрофлори (бактерії групи кишкової палички, ентерококів), а також в окремих наявність на поверхні досліджуваного об'єкта умовно-патогенної і патогенної мікрофлори, характерною для виробництва (*Salmonella*, *Staphylococcus*).

Відбір проб для санітарно-мікробіологічного дослідження предметів побуту і обладнання проводиться за допомогою таких методів:

- змивів (тампонами або серветками);
- відбитків (контактний метод);
- агаровим заливанням.

Для визначення мікрофлори різних горизонтальних поверхонь, а також тканин застосовується метод агарової заливки. Для відбору

проби використовується спеціальна металева пластинка висотою 2 см у вигляді кільця усіченої форми з діаметром верхньої поверхні кола 5 см і нижньої меншою - 4 см. (рис. 1, а). Перед дослідженням кільце фламбірують обпаленням, охолоджують, поміщають на поверхню досліджуваного об'єкта нижнім краєм і заливають розплавленим і охолодженим до 45°C мясопептонним агаром або середовищем Ендо. Через 5-10 хв після застигання середовища кільце обережно знімають і витрушують у стерильну чашку Петрі застиглу агарову пластинку вгору нижньою поверхнею, яка стикалась з досліджуванним об'єктом. Метод зручний тим, що на поверхню середовища захоплюють всі мікроорганізми, що знаходяться на досліджуваній ділянці об'єкта, але він не дає уявлення про загальне обсіменіння предметів через обмеженість досліджуваної площі. Його рекомендують застосовувати при невеликій бактеріальній забрудненості.

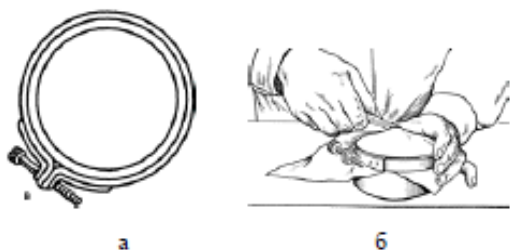


Рис 1 - а - кільце для закріплення тканини у зібраному вигляді; б - взяття проб мікрофлори тканин

При оцінці санітарного стану предметів побуту, виготовлених з тканин (постільна білизна, ковдри, одяг та ін.), також можна застосовувати метод, який полягає у струшуванні ділянки забруднених тканин над чашкою Петрі з живильним середовищем. Обстежувану тканину затискають до спеціальній металевій обойми, що складається з двох кілець, вкладених один до одного (рис.1, б), і поміщають над чашкою Петрі із середовищем. Струшування тканини можна робити просто биттям по її зовнішньої поверхні стерильним пінцетом або, закріпивши у центрі тканини стерильну шпильку, кілька разів її відтягують і відпускають. Разом з пилом з тканини на живильне середовище потрапляють і мікроорганізми, які перебувають у ній. Чашку закривають і поміщають до термостат для інкубації [9].

Лабораторія після проведення досліджень дає висновок, яка була кількість бактерій та мікроорганізмів до дезінфекції та яка доза є стерилізаційною для даних видів утеплювачів.

Крім того, метою випробувань є встановлення максимально допустимого значення дози. Процедура ця є обов'язковою, тому що при перевищенні допустимого значення можна зруйнувати матеріал зразка. Якщо, наприклад, синтепону дати завищену дозу, то він буде розповзатися, якщо ще більшу, то

буде розсипатися. Якщо дати малу дозу, то синтепон не буде повністю стерилізований.

Поглинена доза визначається експериментальним шляхом. Ця процедура витратна по часу і ресурсам. Значно скоротити ці затрати дозволяє чисельне моделювання.

Чисельне моделювання в радіаційних технологіях сьогодні є одним з основних інструментів для:

- розрахунку просторових розподілів дози випромінювання в опромінюваних об'єктах при плануванні процесу опромінення;
- пошуку оптимальних режимів роботи і параметрів опромінюваних установок;
- оцінки безпеки режимів роботи опромінюваних установок;
- вибір методів контролю процесу опромінення;
- розробки нових методів обробки продукції та матеріалів [10].

Тому, успіх застосування іонізуючих випромінювань в радіаційних технологіях в значній мірі залежить від розробки обчислювальних методів і комп'ютерних програм для моделювання процесів опромінення продукції та матеріалів.

В якості програмного забезпечення, що реалізує моделювання проходження іонізуючого випромінювання був обраний програмний комплекс GEANT4 [11-12]. Обґрунтування вибору даного програмного комплексу було розглянуто в [13], де було проведено порівняння з іншими пакетами, що дозволяють моделювати проходження іонізуючого випромінювання через матеріал методом Монте-Карло. На прикладі чисельного моделювання гамма-променів виконаних GEANT4 - збіжність результатів моделювання та дозиметричних вимірювань склав 88-90%.

Висновки

У статті зазначено про важливість догляду за спеціальним одягом робітників. Проведено аналіз сучасних підходів до дезінфекції спеціального одягу, та визначено певні недоліки цих методів так, наприклад, утеплений одяг та одяг, оброблений спеціальними речовинами, прати заборонено. Запропоновано, проводити стерилізацію спецодягу методом пучком прискорених електронів. Для того, щоб визначити яка доза буде ефективна для стерилізації одягу, проведено експеримент, щодо визначення бактерій та мікроорганізмів, в матеріалах спеціального одягу, до дезінфекції іонізуючим випромінюванням та після. Визначено і обґрунтовано необхідність використання чисельного моделювання в радіаційних технологіях.

Список літератури

1. Денисенко, М. В. Удосконалення нормативних документів з проектування та застосування засобів індивідуального захисту працівників в гарячих цехах:

- дис. канд. техн. наук : 05.01.02 / Денисенко Марина Володимирівна – Харків, 2015. – 169 С.
- Bloomfield, S. F.** The infection risks associated with clothing and household linens in home and everyday life settings, and the role of laundry / **S. F. Bloomfield, M. Exner, C. Signorelli, K. J. Nath, E. A. Scott** // *International Scientific Forum on Home Hygiene*. – 2011.
 - Тарнавський, А. Б.** Основні способи проведення дезактивації одягу, засобів індивідуального захисту та техніки / **А. Б. Тарнавський** // *Проблеми цивільного захисту: управління, попередження, аварійно-рятувальні та спеціальні роботи: збірник матеріалів III Всеукраїнської науково-практичної конференції*. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2015. – 256 с.
 - Алимов, А. С.** Практическое применение электронных ускорителей / **А. С. Алимов**. – Москва: *Препринт НИИЯФ МГУ № 2011-13/877*, 2011. – 41 С.
 - Ливингстон, Стенли М.** Ускорители: Установки для получения заряженных частиц больших энергий / **М. Стенли, Ливингстон** // Пер. с англ. Э. Л. Бурштейна; Под ред. [и с предисл.] М. С. Рабиновича. – Москва: *Изд-во иностр. лит.* – 1956. – 148 с.
 - Айзацкий, Н. И.** Радиационные технологии с применением электронного и тормозного излучений / **Н. И. Айзацкий, В. Н. Борискин, А. Н. Довбня, А. И. Зыков, Э. С. Злунцин, С. П. Карасев, М. А. Красноголовец, В. А. Попенко, Г. Д. Пугачев, Ю. Д. Тур, В. Л. Уваров, Г. Л. Фурсов** // *Вопросы атомной науки и техники*. — 1999. — № 1. — С. 61-63.
 - Борискин, В. Н.** Развитие радиационных технологий и испытаний в НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ / **В. Н. Борискин, С. А. Ванжа, В. Н. Верещака и др.** // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2008. – № 5. – С. 150-154.
 - Титов, Д. В.** Метод измерения поглощенной дозы при обработке продукции на линейном ускорителе электронов / **Д. В. Титов, Е. Л. Ноздрачева, В. А. Шевченко** // *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Серія : Електроенергетика та перетворювальна техніка. Прилади та методи контролю та визначення складу речовин*. - 2014. - № 19. - С. 58-64.
 - Методические указания к лабораторному практикуму по курсам "Санитарная микробиология", "Санитарно-микробиологический контроль на производстве", КПВ "Микробиология" / ВСГТУ ; сост. **Е. Г. Инешина, С. В. Гомбоева**. - Улан-Удэ: [б.и], 2006. - 89 С.
 - Салах, Саван Ибрахим А.** Вычислительные методы дозиметрии высокоэнергетического электронного излучения в радиационных технологиях: дис. канд. техн. наук : 01.05.02 / Салах, Саван Ибрахим А. – Харьков, 2016. – 169 С.
 - Agostinelli, S.** GEANT4 – a simulation toolkit / **S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, et al.** // *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2003. – 506(3). – P. 250-303. – doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
 - Allison, J.** GEANT4 developments and applications / **J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. A. Dubois, M. Asai, G. Barrand, R. Capra, S. Chauvie, R. Chytracsek, et al.** // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2006. – 53(1). – P. 270-278. – doi:10.1109/TNS.2006.869826.
 - Моргунов, В. В.** Численное моделирование определения радиационно-защитных показателей материалов для создания рабочей одежды / **В. В. Моргунов, Е. Н. Черняк, Н. В. Диденко** // *Комунальне господарство міст*. – 2015. – №120(1). – С. 42–49.

Bibliography (transliterated)

- Denisenko, M. V.** Udoshkonalennja normatyvnyh dokumentiv z proektuvannja ta zastosuvannja zasobiv indyvidual'nogo zahystu pracivnykiv v garjachyh cegah: dys. kand. tehn. nauk, 2015, 169 p.
- Bloomfield, S. F., Exner, M., Signorelli, C., Nath, K. J., Scott, E. A.** The infection risks associated with clothing and household linens in home and everyday life settings, and the role of laundry. *International Scientific Forum on Home Hygiene*, 2011.
- Tarnavs'kyj, A.** Osnovni sposoby provedennja dezaktyvacii' odjagu, zasobiv indyvidual'nogo zahystu ta tehnyki. *Problemy cyvil'nogo zahystu: upravlinnja, poperedzhennja, avarijno-rjatuval'ni ta special'ni roboty: zbirnyk materialiv III Vseukrai'ns'koi' naukovy-praktychnoi' konferencii'*, 2015, 163-165.
- Alimov, A.** Prakticheskoe primenenie jelektronnyh uskoritele. Preprint NIJaF MGU, Moskva, 2011.
- Livingston Stanley M.** Uskoriteli: Ustanovki dlja poluchenija zarjzhennyh chastic bol'shij energij. Izdatel'stvo inostrannoj literatury, Moskva, 1956.
- Ajzackij, N. Boriskin, V., Dovbnja, A., Zykov, A., Zlunicyn, Je., Karasev, S., Krasnogolovec, M., Popenko, V., Pugachev, G., Tur, Ju., Uvarov, V., Fursov, G.** Radiacionnye tehnologii s primeneniem jelektronnogo i tormoznogo izluchenij. *Voprosy atomnoj nauki i tehniky*, 1999, 61-63.
- Boriskin, V., Vanzha, S., Vereshhaka, V.** Razvitie radiacionnyh tehnologij i ispytanij v NIK «Uskoritel» NNC HFTI. *Voprosy atomnoj nauki i tehniky*, 2008, 5, 150-154.
- Titov, D., Nozdracheva, L., Shevchenko, V.** Metod izmerenija pogloshhennoj dozy pri obrabotke produkcii na linejnom uskoritele jelektronov. *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu "HPI". Serija : Elektroenergetyka ta peretvorjuval'na tehniky. Prylady ta metody kontrolju ta vyznachennja skladu rečovyn*, 2014, 19, 58-64.
- Ineshina, E., Gomboeva, S.** Metodicheskie ukazanija k laboratornomu praktikumu po kursam "Sanitarnaja mikrobiologija", "Sanitarno-mikrobiologičeskij kontrol' na proizvodstve", KPВ "Mikrobiologija", 2006, 89 p.
- Salah, Savan Ibrahim A.** Vychislitel'nye metody dozimetrii vysokojenergetičeskogo jelektronnogo izluchenija v radiacionnyh tehnologijah: dys. kand. tehn. nauk, 2016, 169p.
- Agostinelli, S., Allison, J., Agostinelli, S., Amako, K., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrant, G. et al.** GEANT4 – a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, 506(3), 250-303.
- Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Dubois, P. A., Asai, M., Barrant, G., Capra, R., Chauvie, S., Chytracsek, R. et al.** GEANT4 developments and applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, 53(1), 270-278.
- Morgunov, V., Cherniak, E., Didenko, N.** Chislennoe modelirovanie opredelenija radiacionno-zashhitnyh pokazatelej materialov dlja sozdanija rabochej odezhdy . *Komunakl'ne gospodarstvo mist*, 2015, 120(1), 42-49.

Відомості про авторів (About authors)

Черняк Олена Миколаївна – Українська інженерно-педагогічна академія, аспірантка, асистент кафедри «Охорони праці, стандартизації та сертифікації»; м. Харків, Україна; e-mail: olena-cheraniak@ukr.net.

Olena Cherniak – graduate student, assistant, Department of Labour Safety, Standardization and Certification, Ukrainian engineering - pedagogical Academy, Kharkov, Ukraine; e-mail: olena-cheraniak@ukr.net

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Черняк, О. М. Метод обробки радіаційними технологіями спеціального одягу для забезпечення гігієни праці / **О. М. Черняк** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – 2018. – № 16 (1292). – С. 84-89. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.12.

Please cite this article as:

Cherniak, O. The method of processing the special clothes of radiation technology to provide occupational health. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 84-89, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.12.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Черняк, Е. Н. Метод обработки радиационными технологиями специальной одежды для обеспечения гигиены труда / **Е. Н. Черняк** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018 – № 16 (1292). – С. 84-89. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.12.

АННОТАЦИЯ В статье указано о важности ухода за специальной одеждой рабочих, проведен анализ современных подходов к дезинфекции и определены недостатки этих методов. Предложено, проводить стерилизацию спецодежды методом пучком ускоренных электронов. Для того, чтобы определить какая доза будет эффективна для стерилизации одежды, проведен эксперимент, по определению бактерий и микроорганизмов, в материалах специальной одежды, до дезинфекции ионизирующим излучением и после. Определена и обоснована необходимость использования численного моделирования в радиационных технологиях.

Ключевые слова: специальная одежда; дезинфекция; радиационные технологии; ионизирующее излучение; поглощенная доза; ускоритель электронов; численное моделирование.

Поступила (received) 04.05.2018

УДК 621.74.045

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.13

ВИЗНАЧЕННЯ ЗОНИ ДІЇ ВІДКРИТИХ ДОДАТКІВ ДЛЯ МАСИВНИХ ВУЗЛІВ У ВИЛИВКАХ З НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ

А. І. ШАМРАЙ^{1*}, Д. В. МАРИНЕНКО¹, К. О. КОСТИК¹, Н. В. КРАВЦОВА²

¹ кафедра ливарного виробництва, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

² кафедра "Механіка суцільних середовищ та опір матеріалів", НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*email: Motosportx8@gmail.com

АНОТАЦІЯ Метою роботи є дослідження впливу розміру, форми та місця розташування додатків на утворення пористості у виливку за масивними вузлами із нержавіючою сталлю. В ході роботи було спроектовано два найбільш поширених типу розташування масивного елемента на стінці виливка. На першому етапі було промодельовано процес кристалізації цих вузла у вільному стані, без додатків. Наявність пористості оцінювали за критерієм Ніяма. Наступним етапом було порівняно дію добутоків, спроектованих за найбільш поширеними засобами розрахунку, та стандартних форм й розмірів. Для аналізу ефективності було проаналізовано поширення температурних полів та наявність пористості.

Ключові слова: пористість; додатки; нержавіюча сталь; моделювання; живлення.

DEFINITION OF RANGE OF OPEN APPLICATIONS FOR MASSIVE NODES IN THE STAINLESS STEEL CASTINGS

A. SHAMRAI^{1*}, D. MARYNENKO¹, K. KOSTYK¹, N. KRAVTSOVA²

¹ Department of Foundry, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

² Department of Continuum Mechanics and Mechanics of Materials, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The main purpose of the app is receiving a suitable casting without shrinkage cavities and porosity. In general, the pattern of formation of these defects can be represented as follows: in a very short period of time on the casting surface and formed a crust of hardened alloy, which determines the outer contour of the casting; reduction of volume of the liquid metal inside the formed solid crust ahead of volumetric shrinkage, the most rigid sheath; in the absence of receipt of molten metal, which compensates the reduction of volume, voids are formed, called sinks, the size of which depends on the properties of the alloy, the temperature of the overheating and its original volume. The aim of this work is to study the influence of size, shape and location of applications on the formation of porosity in the casting behind the massive knots out of stainless steel. During the work was designed by the two most common type the location of the massive object on the wall of the casting. The first stage was simulated the crystallization process of these knots in the free state without application. The presence of porosity was evaluated according to the Niyama criterion. The next stage was a relatively action works, designed by the most common means of calculation, and standard shapes and sizes. For the analysis of efficiency was analyzed the distribution of temperature fields and the presence of porosity. The application must meet the following basic requirements: be sufficient to compensate for the shrinkage of the alloy during solidification; later hardening the casting parts to which it is attached; have the configuration (to keep metal), which will provide a minimum cooling surface; area shrinkage should not go beyond the app and reach his neck.

Keywords: porosity; application steel; stainless steel; simulation; risering.

Вступ

Леговані сталі (марки 20ГЛ, 30ХГСФЛ, 35ХМЛ тощо) застосовують для збільшення надійності, довговічності та зниження маси литих деталей, а також надання їм спеціальних властивостей. Вибір легувальних елементів обумовлюється призначенням виливка, його конструктивними і технологічними особливостями. Стосовно до впливу на вуглець легуючі елементи поділяють на карбідоутворюючі та графітізуючі. Вони зумовлюють утворення нових структур. складових і змінюють властивості існуючих фаз. Досить поширеними є сталі, леговані хромом, нікелем, ванадієм, молібденом, міддю, кремнієм, марганцем у різних комбінаціях і співвідношеннях.

Проте з такими перевагами ливарного виробництва, як відносна простота отримання й низька вартість виливків (особливо з чавуну), можливість виготовлення складних деталей з різних металів і сплавів, воно має низку істотних недоліків: передусім досить низька продуктивність праці, неоднорідність складу і знижена щільність матеріалу заготовки, та його нижчі, ніж заготовок, отриманих обробкою тиском, міцнісні характеристики [1].

Виливок повинен мати високі механічні характеристики, бути щільним та не мати рихлот або утяжин. Тому розробка ливарної технології отримання виливка з мінімальною кількістю дефектів є важливою та складною задачею ливарного виробництва.

Аналіз літературних даних

Питомий об'єм стандартних ливарних металів більше в рідкому стані, ніж в твердому. З цієї причини дані метали під час кристалізації та охолодження піддаються усадці. Це призводить до дефіциту об'єму, який проявляється у вигляді таких дефектів, як усадочні раковини, утяжини, і т. д. [1-4].

Таким чином, усадочні раковини є результатом взаємозв'язку між фізичним дефіцитом об'єму при кристалізації і можливістю компенсувати її за рахунок додаткової подачі матеріалу [4-6].

Величина технологічного дефіциту об'єму в поєднанні з питомим об'ємом в першу чергу і найбільше залежить від матеріалу лиття. Крім загального дефіциту об'єму, його розподілення в тілі відливки і питомого об'єму, види дефектів залежать і від процесу кристалізації. Особливими факторами впливу є зміст газу в сплаві, рух стінок ливарної форми при литті в піщану форму, а також поширення графіту при кристалізації - в разі спеціальних чавунів [5-9].

Мета роботи

Метою роботи є дослідження утворення та кристалізації масивних елементів у виливках із нержавіючою сталі, для оптимізації розрахунку додатків.

Для цього поставлені наступні задачі:

- обрати матеріал та вилівок для дослідження, описати їх властивості та характеристики;
- виявити закономірність та принцип роботи додатку;
- встановити границі для експерименту, обрати параметри для дослідження та аналізу, провести експеримент;
- використовуючи метод математичного моделювання виконати оптимізацію положення та розрахунку додатку.

Виклад основного матеріалу

Додаток - це спеціальний технологічний приплив до поверхні виливка, що встановлюється над вузлом виливка, що потребує додаткового живлення, або над усім виливком, твердіє останнім і віддаляється при обробці виливка.

Основна мета застосування додатка - це отримання щільного виливка без усадочних раковин і пористості. Місце розташування додатка необхідно вибирати таким чином, щоб рідкий метал з додатка міг надходити безперервно твердіючі частини виливка і компенсувати зменшення їх обсягу в результаті усадки металу, тобто забезпечував живлення виливка [10]. При цьому усадочна раковина повинна утворитися в самому додатку, а не в виливку. Крім цього додаток виконує функцію випора, через який видаляється повітря з порожнини форми в

процесі заповнення її металом. В додаток можуть спливати засмічення, що випадково потрапили в форму і утворилися в результаті руйнування самої форми, а також продукти взаємодії металу і форми та ін.

Головною метою застосування додатку є отримання придатної виливки без усадочних раковин і пористості. У загальному вигляді картину формування зазначених дефектів можна представити в наступному вигляді:

- за дуже короткий проміжок часу на поверхні виливка утворюється корочка затверділого сплаву, що визначає зовнішній контур виливки;
- зменшення обсягу рідкого металу всередині утвореної твердої скоринки випереджає об'ємну усадку самої твердої оболонки;
- при відсутності надходження рідкого металу, компенсуючого зменшення обсягу, формуються порожнечі, звані раковинами, величина яких залежить від властивостей сплаву, температури перегріву і його початкового об'єму.

Умовами живлення твердіючого виливка обумовлюється можливість отримання щільних її стінок і мінімальної неоднорідності механічних властивостей в різних частинах виливки, найбільш помітно проявляється при виготовленні великогабаритних литих деталей. Дослідження умов живлення виливків і розробка способів застосування додатка, визначення їх розмірів, так само, як і методів поліпшення дії додатка, засновані на вивченні процесів затвердіння сплавів.

Пристаючи до розробки технологічного процесу виготовлення виливка, ливарник з креслення литої деталі отримує загальне уявлення про розміри виливки, наявності й розташування теплових вузлів, протяжності розвинених стінок і особливості конструкції деталі. Іноді в кресленні деталі або в технічних умовах наводяться особливі вимоги, що пред'являються до щільності стінок литої деталі в цілому або її окремих частин.

У кожному разі може виникнути кілька варіантів вибору місць розташування та необхідної кількості додатків, при яких повністю забезпечуються умови отримання виливків без усадочних раковин.

При визначенні цих умов керуються передбачуваним напрямком процесу затвердіння всіх частин виливка, а також враховують вплив різних технологічних факторів на спрямованість даного процесу.

При визначенні розмірів і місць розташування додатків за основу беруть такі умови отримання виливків без усадочних раковин, сформульовані видатним металургом Володимиром Юхимівцем Грум-Гржимайло «вище розміщена частина виливки повинна служити додатком для частини, що пролягає нижче» і «Додаток мусить холонути останнім».

Обсяг усадочних раковин і пор, навіть для сталі 110M13Л, не перевищує 7,0%, але для того, щоб заповнити цей обсяг рідким металом з додатка, обсяг

самого додатка приймають у багато разів більшим порівняно з усадочною раковиною. Перша умова В.С. Грум-Гржимайло одночасно відповідає двом вимогам: забезпечення спрямованості процесу затвердіння стінок виливки і отримання мінімальної витрати рідкого металу на додаток, якщо при обраному положенні заливки форми потовщені частини виявляться вгорі і в міру затвердіння інших частин будуть служити додатком, що живлять нижні частини.

Найбільш поширені відкриті додатки, які застосовують на дрібних, середніх і великих вилівках. Ці додатки можна доливати гарячим металом, засипати їх поверхню екзотермічними або теплоізоляційними сумішами (сухим піском, вугільним пилом і ін.); з їх допомогою видаляють гази з порожнини форми, що покращує їх заповнюваність (особливо тонкостінних протяжних виливків); в багатьох випадках такі додатки полегшують формування, особливо ручним способом.

Вимоги до додатків, принципи їх побудови і розміщення на виливок. При виборі розмірів і місця установки додатків враховують необхідність гарантованого живлення виливки, так як «економія» на додатку при зниженні якості виливки неприпустима. Однак, крім економічних міркувань, установка зайвих додатків, не приносячи користі, може виявитися навіть шкідливою внаслідок сильного місцевого перегріву форми при заповненні її розплавом.

Для виявлення зони поширення пористості у вузлах виливка з нержавіючої сталі, було спроектовано два найпоширеніші варіанти розміщення масивних вузлів на стінці виливки, перший - коли вузол знаходиться на краю виливка, другий - коли в середині стінки. Аналіз теплових полів, отриманих при моделюванні кристалізації наших зразків, показує місця сильного перегріву, відповідно ці теплові вузли будуть тверднути останніми [11-13]. Встановлені прибутки дозволили вирівняти температурні поля більшої частини поверхні виливка, таким чином усереднити час і момент кристалізації всього вузла.

Для визначення можливої пористості було використано критерій Ніяма [4]. Як видно із рисунків 1 та 2 без додатків масивний елемент буде мати велику пористість яка на поверхні може утворити раковину. При застосуванні додатків кількість пористості значно зменшилась, але, через те, що питомий вузол знаходився над стінкою і додаток розташовувався над ним, то сам питомий вузол виконував функцію додатка для стінки, таким чином цей фактор потрібно брати до уваги при проектуванні додатків для схожих конструкцій.

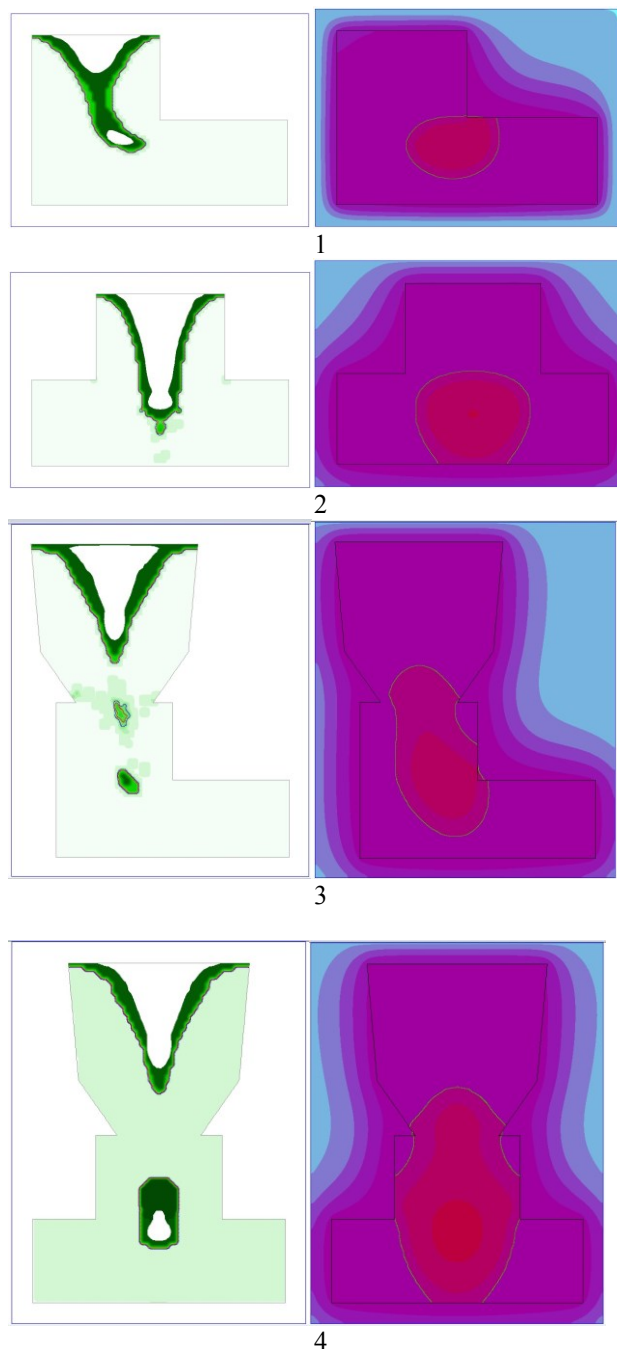


Рис. 1 – Типове розміщення масивних вузлів на стінці виливка без, та з додатками: 1 – вузол на краю стінки; 2 – вузол на середині стінки; 3 – вузол на краю стінки та встановленим на нього додатком; 4 – вузол на середині стінки та встановленим на нього додатком

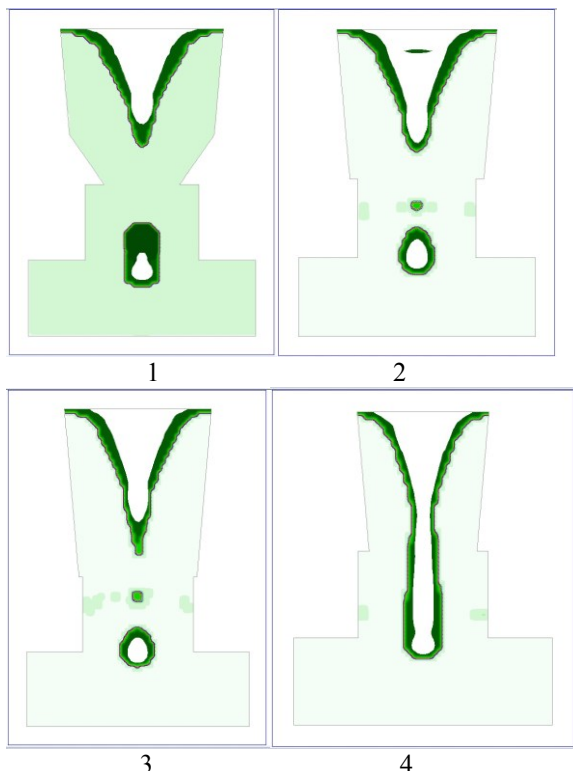


Рис. 2 – Поширення пористості у виливку при застосуванні додатків: 1 – додаток розраховано через визначення температурного градієнту; 2 – додаток розраховано за методикою Попова А. Д.; 3 – додаток розраховано за методом вписаних кіл; 4 – додаток розраховано за методикою Василевського П. Ф.

На рис. 2 видно, що дії додатків, що спроектовані за різним підходом не однакові, 1 – показала найкращий результат, проте вона мала найбільшу вагу. 2 й 3 – приблизно однаковий результат та середню вагу, також вони виступали за межі питомого елемента, тим самим спровокували появу теплових вузлів нижче додатка, що призвело до появи пористості біля поверхні, як видно на рисунку. 4 – найменша вага, але й результат не відповідає поставленій задачі.

При аналізі моделювання кристалізації виливка та додатка було виявлено місця, які першими починають холонути та місця, в яких починає утворюватися пористість. Завдяки можливостям CAD систем, в яким було виконано проектування виливка та додатків, проаналізувавши данні моделювання з CAE систем, можна швидко змінити геометричні параметри додатку, там самим збільшити його ефективність та зменшити металоємність усього виливка.

Такі заходи на етапі розробки ливарної технології дозволяють зекономити великі кошти на відпрацювання технології в ливарному цеху та переробку оснастки, також зменшується час підготовки виробництва та витрати на одиницю продукції.

Обговорення результатів

З метою зменшення обсягу додатків і економії металу необхідно ширше використовувати теплоізоляційні і екзотермічні суміші, спеціальні конструкції додатків, що працюють під атмосферним, газовим і повітряним тиском. Додаток приєднують до того теплового вузлу виливки, який твердне пізніше за інших елементів, тобто додаток приєднують до найбільш масивних частинах виливків, місцевим потовщенням, сполученням елементів, до місця підведення живильників. Жоден з масивних вузлів виливки не повинен відокремлюватися від джерела живлення в процесі затвердіння. Слід завжди прагнути до встановлення додатків на верхній частині виливка.

При установці додатків враховують зручність формування, а також виконання таких умов: додаток не повинні ускладнювати деформацію виливки при усадці, а їх відділення від виливків не повинно викликати серйозних труднощів. На відливках великих габаритів, які мають перетин стінок або кілька теплових вузлів, необхідно встановлювати кілька додатків, так як радіус дії додатків обмежений. У той же час необхідно прагнути до того, щоб з одного додатку живилось якомога більше число теплових вузлів виливки. Процес живлення виливка повинен бути організований таким чином, щоб в кожному її вузлі здійснювалося спрямоване затвердіння.

Висновки

Для отримання масивного вузла у виливку, встановлений над ним технологічний додаток повинен відповідати таким основним вимогам:

1. мати достатній обсяг для компенсації усадки сплаву при затвердінні;
2. твердіти пізніше тієї частини виливки, до якої вона приєднана;
3. мати конфігурацію (для економії металу), яка забезпечить мінімальну поверхню охолодження;
4. зона усадочної раковини не повинна виходити за межі додатку і досягати його шийки.

Список літератури

1. **Alireza, Abedi Saidabad.** Prediction of Shrinkage Pore Volume Fraction Using a Dimensionless Niyama Criterion / **Alireza Abedi Saidabad, Houshang Taghizadeh** // *American Journal of Computational Mathematics*. – 2015. – V. 5. – P. 431-446. – doi: 10.4236/ajcm.2015.54038.
2. **Idan, A. F. I.** The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels / **A. F. I. Idan, O. Akimov, L. Golovko, O. Goncharuk, K. Kostyk** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 2. – №. 5 (80). – P. 69-73. – doi:10.15587/1729-4061.2016.65455.
3. **Bargaoui, H.** Thermomechanical behavior of resin bonded foundry sand cores during casting / **H. Bargaoui, F. Azzouz, D. Thibault, G. Cailletaud** // *Journal of Materials*

- Processing Technology*. – 2017. – V. 246. – P. 30-41. – doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.03.002.
4. **Mohanad, M. K.** Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding / **M. K. Mohanad, V. Kostyk, D. Domin, K. Kostyk**, // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 2. – №. 5 (80). – P. 45-49. – doi:10.15587/1729-4061.2016.65454.
 5. **Raza, M.** Effects of process related variations on defect formation in investment cast components / **M. Raza, P. Silva, M. Irwin, B. Fagerström, A. E. Jarfors** // *Archives of Foundry Engineering*. – 2018. – V. 18. – №. 1. – P. 103-108. – doi: 10.24425/118820.
 6. **Kostyk, K.** Development of innovative method of steel surface hardening by a combined chemical-thermal treatment / **K. Kostyk** // *EUREKA: Physics and Engineering*. – 2016. – №. 6. – P. 46–52. – doi:10.21303/2461-4262.2016.00220.
 7. **Wondrak T.** Contactless inductive flow tomography for a model of continuous steel casting / **T Wondrak, V Galindo, G Gerbeth, T Gundrum, F Stefani** // *Measurement Science and Technology*. – 2010. – V. 21. – №. 4. – doi:10.21303/2461-4262.2016.00220.
 8. **Dhafer, W. A.-R.** The choice of the optimal temperature and time parameters of gas nitriding of steel / **W. A.-R. Dhafer, V. Kostyk, K. Kostyk, A. Glotka, M. Chechel** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 3. – №. 5 (81). – P. 44–50. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.69809.
 9. **Cukierski K.** Flow Control with Local Electromagnetic Braking in Continuous Casting of Steel Slabs / **K. Cukierski, B. G. Thomas** // *Metall and Materi Trans B*. – 2008. – №. 39 (94). – doi.org/10.1007/s11663-007-9109-3.
 10. **Kostyk, K.** Surface hardening of tool from steel 38Cr2MoAl complex chemical-heat treatment / **K. Kostyk** // *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New Solutions in Modern Technologies*. – 2015. – №. 39 (1148). – P. 26–33. – doi:10.15587/1729-4061.2017.100014.
 11. **Zhang J. F.** Numerical simulation of deformation in large scale hydroturbine blade casting / **J. F. Zhang, J. W. Kang, B. C. Liu, Y. Wu, J. S. Zhang, Z. C. Rong** // *International Journal of Cast Metals Research*. – 2008. – V. 38. – №. 8. – P. 620–629. – doi.org/10.1179/1743281211Y.0000000042.
 12. **Акимов О. В.** Сплавы с эффектом памяти формы. История появления и развития, физика процесса их уникальных свойств / **О. В. Акимов, С. М. Нури Ахмед** // *Вісник Національного технічного університету*. – 2015. – №. 14. – С. 42-49.
 13. **Акимов О. В.** Влияние термической обработки на свойства нового сплава на основе железа / **О. В. Акимов, С. М. Нури Ахмед** // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – Т. 6. – №. 11 (78). – С. 35-40. – doi:10.15587/1729-4061.2015.56370.
- Computational Mathematics**, 2015, **5**, 431-446, doi: 10.4236/ajcm.2015.54038.
2. **Idan, A. F. I., Akimov, O., Golovko, L., Goncharuk, O., Kostyk, K.** The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **2**, 5 (80), 69-73, doi:10.15587/1729-4061.2016.65455.
 3. **Bargaoui, H., Azzouz, F., Thibault, D., Cailletaud, G.** Thermomechanical behavior of resin bonded foundry sand cores during casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, **246**, 30-41, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.03.002.
 4. **Mohanad, M. K., Kostyk, V., Domin, D., Kostyk, K.** Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **2**, 5 (80), 45-49, doi:10.15587/1729-4061.2016.65454.
 5. **Raza, M., Silva, P., Irwin, M., Fagerström, B., Jarfors, A. E.** Effects of process related variations on defect formation in investment cast components. *Archives of Foundry Engineering*, 2018, **18**, 1, 103-108, doi: 10.24425/118820.
 6. **Kostyk, K.** Development of innovative method of steel surface hardening by a combined chemical-thermal treatment. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2016, **6**, 46–52, doi:10.21303/2461-4262.2016.00220.
 7. **Wondrak, T., Galindo, V., Gerbeth, G., Gundrum, T., Stefani, F.** Contactless inductive flow tomography for a model of continuous steel casting. *Measurement Science and Technology*, 2010, **21**, 4, doi:10.21303/2461-4262.2016.00220.
 8. **Dhafer, W. A.-R., Kostyk, V., Kostyk, K., Glotka, A., Chechel, M.** The choice of the optimal temperature and time parameters of gas nitriding of steel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **3**, 5 (81), P. 44–50, doi: 10.15587/1729-4061.2016.69809.
 9. **Cukierski, K., Thomas, B. G.** Flow Control with Local Electromagnetic Braking in Continuous Casting of Steel Slabs. *Metall and Materi Trans B*, 2008, **39** (94), doi:10.1007/s11663-007-9109-3.
 10. **Kostyk, K.** Surface hardening of tool from steel 38Cr2MoAl complex chemical-heat treatment. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New Solutions in Modern Technologies*, 2015, **39** (1148), 26–33, doi:10.15587/1729-4061.2017.100014.
 11. **Zhang, J. F., Kang, J. W., Liu, B. C., Wu, Y., Zhang, J. S., Rong, Z. C.** Numerical simulation of deformation in large scale hydroturbine blade casting. *International Journal of Cast Metals Research*, 2008, **38**, 8, 620–629, doi:10.1179/1743281211Y.0000000042.
 12. **Akimov, O. V., Nuri Ahmed, S. M.** Splavi s effectom pamyati formi. Istoriya poyavleniya i razvitiya, fizika processa ih unikalnih svoystv. *Bulletin of the National Technical University*, 2015, **14**, 42-49.
 13. **Akimov, O. V., Nuri Ahmed, S. M.** Vliyanie termicheskoy obrabotki na svoystva novogo splava na osnove geleza. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, **6**, 11 (78), 35-40, doi:10.15587/1729-4061.2015.56370.

Bibliography (transliterated)

1. **Alireza, Abedi Saidabad, Houshang, Taghizadeh.** Prediction of Shrinkage Pore Volume Fraction Using a Dimensionless Niyama Criterion. *American Journal of*

Сведения об авторах (About authors)

Шамрай Андрей Игоревич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кафедра Литейное производство, г. Харьков, Украина; e-mail: Motosportx8@gmail.com.

Andriy Shamrai – National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv city, Ukraine; Motosportx8@gmail.com.

Мариненко Дмитрій Витальевич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кафедра Литейное производство, г. Харьков, Украина; e-mail: dmytromarynenko@gmail.com.

Dmytro Marynenko – National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv city, Ukraine; e-mail: dmytromarynenko@gmail.com.

Костик Екатерина Александровна - кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры Литейное производство; г. Харьков, Украина; e-mail: eklitus@yandex.ru.

Kateryna Kostyk – PhD of Technical Sciences, associate Professor, Department of Foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: eklitus@yandex.ru.

Кравцова Наталья Викторовна – инженер 1 категории кафедры "Механика сплошных сред и сопротивление материалов", Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина.

Nataliia Kravtsova – the engineer of 1 category of Department of Continuum Mechanics and Mechanics of Materials, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Шамрай, А. І. Визначення зони дії відкритих додатків для масивних вузлів у виливках з нержавіючої сталі / **А. І. Шамрай, Д. В. Мариненко, К. О. Костик, Н. В. Кравцова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 90-95. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.13.

Please cite this article as:

Shamrai, A., Marynenko, D., Kostyk, K., Kravtsova, N. Definition of range of open applications for massive nodes in the stainless steel castings. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 90-95, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.13.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Шамрай, А. И. Определение зоны действия открытых прибылей для массивных узлов в отливках из нержавеющей стали / **А. И. Шамрай, Д. В. Мариненко, Е. А. Костик, Н. В. Кравцова** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 90-95. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.13.

АННОТАЦИЯ Целью работы является исследование влияния литниковой системы на процесс получения качественной разностенной стальной отливки в разовых формах. В ходе работы были рассмотрены основные технологические моменты расчета и проектирования литниковой системы, было спроектировано экспериментальную отливку, для которой было рассчитано и спроектировано несколько литниковых систем и мест питания. Каждый вариант спроектированной технологии было промоделировано. В ходе сравнительного анализа возможной пористости в отливке по критерию Нияма было выбрано наиболее рациональное положение и место питания для экспериментальной отливки. Полученные данные можно использовать для ускорения проектирования и повышения качества полученных отливок такой конструкции, как экспериментальный образец.

Ключевые слова: пористость; прибыли; нержавеющая сталь; моделирование; питание.

Поступила (received) 30.04.2018

УДК 621.74.045

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.14

ПОЛОЖЕННЯ ВИЛИВКА У ФОРМІ З РІЗНОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНОК

I. С. ЮСУБОВ^{*1}, Д. В. МАРИНЕНКО¹, К. О. КОСТИК¹, Н. В. КРАВЦОВА²¹ кафедра ливарного виробництва, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА² кафедра "Механіка суцільних середовищ та опір матеріалів", НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*email: Ilyas1angel@mail.ru

АНОТАЦІЯ Метою роботи є дослідження впливу ливникової системи на процес отримання якісного різностінного сталевих виливків у разових формах. В ході роботи було розглянуто основні технологічні моменти розрахунку та проектування ливникової системи, було спроектовано експериментальну відливку, для якої було розраховано та спроектовано декілька ливникових систем та місць живлення. Кожний варіант спроектованої технології було промодельовано. В ході порівняльного аналізу можливої пористості у виливці за критерієм Ніяма було обрано найбільш раціональне положення та місце живлення для експериментального виливків. Отримані дані можна використовувати для прискорення проектування та покращення якості отриманих виливків такої конструкції як експериментальний зразок.

Ключові слова: сталь; різностінність; ливникова система; пористість; моделювання.

PROVISIONS OF LOADING IN FORM WITH DIFFERENT WOODWORKING WALLS

I. YUSUBOV^{A*}, D. MARYNENKO¹, K. KOSTYK¹, N. KRAVTSOVA²¹ Department of Foundry, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE² Department of Continuum Mechanics and Mechanics of Materials, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Modern trends of development of mechanical engineering is aimed at reducing the use of metal parts, but the requirement for strength characteristics also increase. For such requirements before the designers and technologists is becoming a number of complex issues that need to be addressed at the design stage of the technology of obtaining castings. The aim of this work is to study the effect of casting system on the process of obtaining quality different side steel castings in one-off forms. In the course of work were considered the main technological aspects of calculation and design of casting system was designed and built by experimental casting, for which it was designed and engineered several casting systems and feeder places. Each option is designed technology was simulated. In the comparative analysis of possible porosity in the casting on the Niyama criterion was chosen as the most rational position and place of power for the experimental castings. Obtained data can be used to accelerate the design and improve the quality of obtained castings of this design as an experimental sample. Basic requirements for the design of casting system for steel castings can be formulated as follows: the supply of metal to the mold cavity should be carried out at high speed, but smoothly and in places where the heating will enhance the effect directional solidification of the casting. The direction of flow of the liquid steel in the mold cavity should be one-sided, which ensures the removal of the application from gases and nonmetallic inclusions, for example, the tangential inlet. casting system should not impede the shrinkage of the casting, thereby increasing internal stress. The design of the feeders should provide die casting through the filled channel. The consumption of the metal and its cooling in the runner channels should be minimal.

Keywords: steel; different side of c casting; casting system; porosity; simulation.

Вступ

Сучасні тенденції розвитку машинобудування спрямовані на зменшення металоемності деталей, але вимогу до міцнісних характеристик також підвищуються.

Через такі вимоги перед конструкторами та технологами стає цілий ряд складних питань, які потрібно вирішити на етапі проектування технології отримання виливків.

Зменшення товщин стінок є найчастішим рішенням при зменшенні ваги, а також додаються технологічні балки або поширення. Усе це ускладнює створення якісного виливків[1].

Аналіз літературних даних

Правильна конструкція ливникової системи повинна забезпечувати безперервну подачу розплаву в форму по найкоротшому шляху; спокійне і плавне її заповнення; уловлювання шлаку та інших неметалевих включень; створення спрямованого затвердіння виливків; мінімальний витрата металу на ливникову систему; не викликати місцевих руйнувань форми внаслідок великої швидкості і неправильного напрямку потоку металу [2–5].

Елементи ливникової системи повинні затримувати шкідливі речовини та сміття, який може потрапляти у форму разом із розплавом. Швидкість, із якою метал буде заповнювати форму, також має

велике значення і залеже від ливникової системи [4-6].

Місце живлення треба обирати опираючись на вплив таких чинників як, направлення потоку металу (потрібно запобігати розмивання стінок та стрижнів), уникнення локальних перегрівів форми та вже утворених елементів виливка, на кінцевому етапі заповнення форми отримати мінімально можливу різницю температур [6-9].

Мета роботи

Метою роботи є дослідження типу, конструкції, розміру та місце розташування ливникової системи, для отримання якісних виливків з різною товщиною стінки.

Для цього поставлені наступні задачі:

- обрати вилівок, який за конструкцією та маркою сплаву відповідає поставленій задачі;
- обрати спосіб проектування, розрахунку та перевірки ливникової системи для нашого випадку;
- виявити основні чинники, що впливають на утворення виливка у формі;
- встановити границі для натурального експерименту, обрати параметри для дослідження та аналізу, провести натуральний експеримент;
- використовуючи метод математичного моделювання виконати оптимізацію геометричних параметрів ливникової системи.

Виклад основного матеріалу

Перерахуємо етапи роботи з використанням комп'ютерних систем CAD/CAE/CAM і детальніше зупинимося на комп'ютерному моделюванні ливарних процесів.

Етап 1 CAD. Побудова геометричної моделі виливки технологом на базі геометричної моделі деталі, отриманої від конструктора. Високу швидкість об'ємного конструювання в конструкторському бюро (КБ) ливарної оснастки забезпечує використання різними заводськими структурами єдиного програмного середовища.

Тоді в дереві проектування можна зберегти вихідну модель деталі і результат її прямого редагування, який відрізняється від оригіналу доданими припусками на механообробку і закритими малими отворами. Ливарні ухили будуть внесені пізніше – на третьому етапі, коли технолог призначить розташування виливки у формі.

Етап 2 CAE. Комп'ютерний аналіз ливарних особливостей геометрії виливки, виявлення теплових вузлів по розподілу температури при віртуальному спостереженні кристалізації виливка без додатків і ливникової системи. На цьому етапі обчислюється геометричний модуль, що дозволяє технологу призначити кількість, розташування і розмір додатків. Тут же можна планувати заходи по спрямованому

тепловідводу – застосування холодильників, вставок і т. п.

Етап 3 CAD. Об'ємне конструювання ливникової - живильної системи, виходячи з виявленого розташування ізольованих зон розплаву у виливку. Варіантів розташування виливки у формі і пов'язаних з цим ливниково - живильних систем може бути декілька. Всі варіанти зберігаються в дереві побудов до прийняття остаточного рішення про найбільш ефективну конструкцію.

Етап 4 CAE. Перевірка ефективності ливниково-живильної системи, комп'ютерне моделювання ливарних процесів і обчислення службових параметрів. На цьому етапі розрахунку тепловідведення ведеться з урахуванням реальних розмірів форми і холодильників, але докладно побудовані моделі стержнів не потрібні. Оцінюється спрямованість процесів кристалізації і виявляються гарячі зони за еволюції температурних полів, маркуються ізольовані обсяги розплаву, як можливі концентратори ливарних дефектів, прогноуються усадочні дефекти та гарячі тріщини, розраховується жолоблення виливки в умовах ускладненої усадки і лінійні усадочні коефіцієнти. Якщо вибраний варіант розташування виливки у формі, підведення металу, а також розмір і розташування додатків і холодильників не задовольняє вимогам якості виливки, технолог повертається до попереднього етапу, вносить зміни в об'ємну модель і повторює розрахунок. По закінченні цього розрахункового етапу у програмі CAD формується придатний варіант ливниково-живильної системи, який забезпечує відсутність прогнозованих дефектів в виливка. Саме цей варіант реалізується у виробництві на наступних етапах, спрямованих безпосередньо на виготовлення якісного виливка.

Етап 5 CAD. Конструювання стрижнів, стрижневих ящиків та моделей з використанням складальної компонування виливки і ливниково-живильної системи.

Етап 6 CAM. Підготовка керуючих програм для виготовлення моделей та стрижневих ящиків на верстатах з ЧПУ (чорнова і чистова обробка).

Численні практичні підтвердження ефективності описаної методики, дозволяють зробити висновки про незаперечні переваги наскрізних технологій в ливарному виробництві. У зв'язку з цим представляє інтерес комп'ютерне дослідження процесів формування великогабаритних тонкостінних сталевих виливків [11], верифікація комп'ютерних розрахунків і розробка методик, що дозволяють налаштувати програми комп'ютерного моделювання ливарних технологій на конкретні умови виробництва даного типу виливків

Всі відомі по рекламним кампаніям комп'ютерні програми (LVMflow, Poligon, Magma, ProCast, SolidCast, WinCast, Star-Cast) схожі по функціоналу і однаковим чином вирішують поставлену задачу. Прогнозування ливарних дефектів у них базується на розрахунках температурних полів,

але це лише теоретична частина роботи. Практична частина роботи полягає в тому, що, ґрунтуючись на результатах розрахунків, в першу чергу, конструюється ливниково-живильна система, що забезпечує спрямовану кристалізацію виливки і відсутність усадочних дефектів в критичних областях.

Аналіз температурних полів і ливарних дефектів проводиться комп'ютерними програмами послідовно в трьох функціональних модулях: 1) у препроцесорі генерується розрахункова сітка; 2) в

процесорі вибираються початкові і граничні умови; задаються властивості матеріалів; вирішуються на сітці диференціальні рівняння і обчислюються первинні вузлові параметри – значення температури; 3) в пост процесорі розрахункові результати обробляються і надаються в графічному вигляді; переглядаються і аналізуються похідні розрахункові характеристики – швидкості і градієнти, просторова локалізація усадочних дефектів.

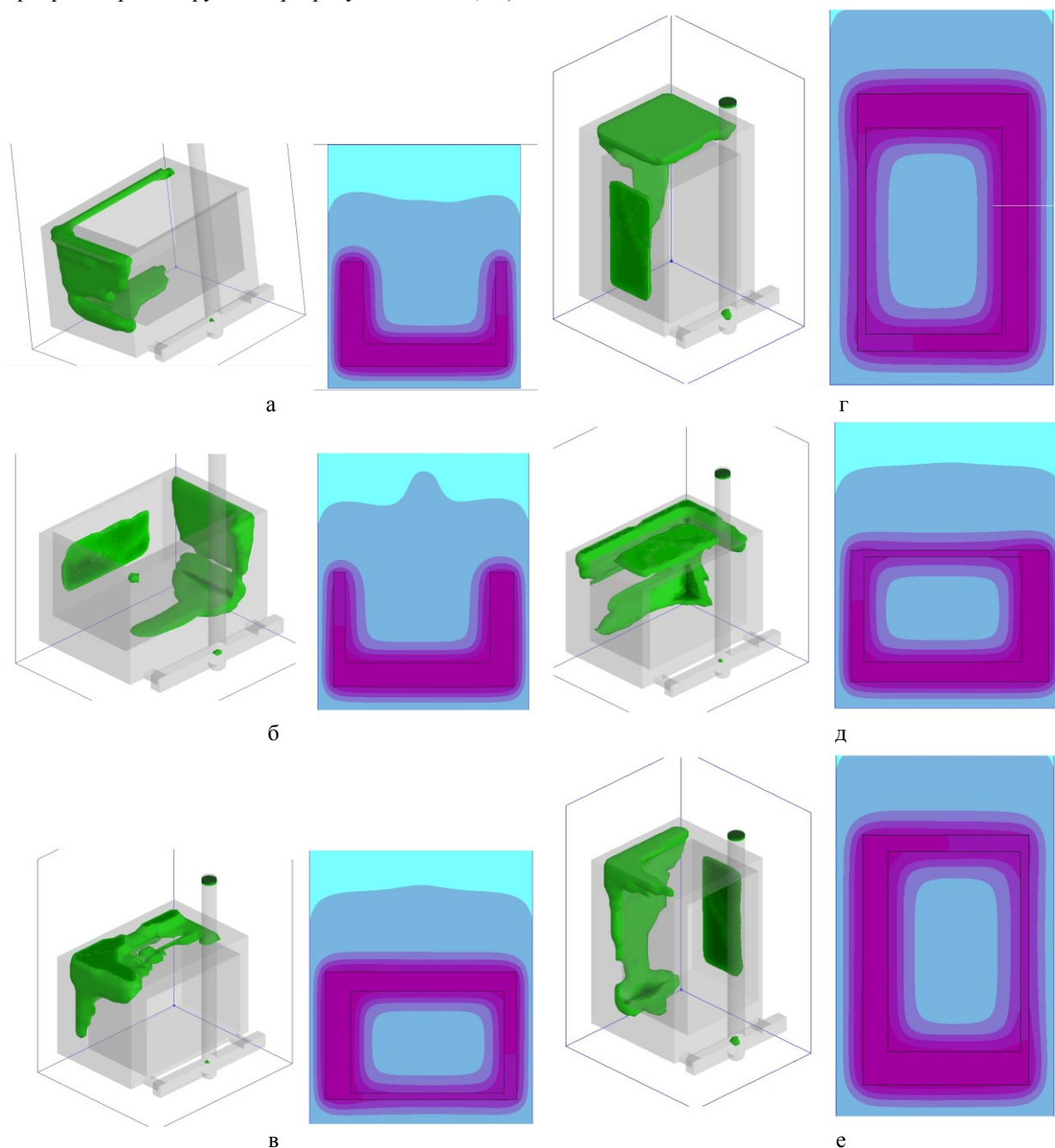


Рис. 1 – моделювання процесу заливки спроектованого різностінного виливка: а - вилівок вертикально, заливка з боку стінки 10мм; б - вилівок вертикально, заливка з боку стінки 30мм; в - вилівок боком, заливка в стінку 10мм; г - вилівок боком, заливка в стінку 20мм; д - вилівок боком, заливка в стінку 30мм; е - вилівок боком, заливка в стінку 40мм

На рис. 1. показано результати моделювання спроектованого виливка різностінного корпусу. Товщини стінок, в які проводилася заливка 10, 20, 30, 40мм (бічні стінки) і 30мм товщина нижньої стінки. На лівій частині картинки показано розподіл усадочної пористості, за критерієм Ніяма. На правій стороні - розподіл температурних полів у поперечному перерізі.

З отриманих даних можна зробити висновок, що місця скупчення пористості і можливих тріщин збігаються з місцями локальних перегрівів, тому найефективнішим способом підведення ливникової система є такий, при якому найбільш рівномірний розподіл температур. У нашому випадку найбільш рівномірний розподіл температур виявився при заливці в стінку товщиною 10мм, внаслідок того, що вона остання закінчила заповнюватися і в момент початку кристалізації мала найвищу температуру, за рахунок цього вона почала остигати останньої, але з найвищою швидкістю, тому усадка тонкої і граничних більш товстих стінок відбувалася одночасно.

Кристалізація в тонкій стінці на кордоні з товстими закінчилася в той момент часу, коли в вузлах стикування товстих стінок ще залишалася рідка фаза і кути знаходилися в пластичному стані, тим самим забезпечивши безперешкодну усадку бічних стінок і відсутність тріщин на стику з тонкою нижньою стінкою. Для забезпечення формування якісних переходів товстих стінок між собою у верхній частині виливки доцільно використовувати додатки.

В ході моделювання також була перевірена сама ливникова система в дії, конструкція і розміри якої дозволили забезпечити достатньо рівномірний підйом металу в формі зі швидкістю не менше 10 мм/с, таким чином вдасться уникнути спаїв по поверхні виливка, і навіть в самих вузьких перетинах не допускалася швидкість підйому металу швидше ніж 20 мм/с, тим самим не відбувалося розмивання форми. Струмінь металу, який може бути отриманий при литті з поворотного ковша, місткістю 250-500кг, дозволить тримати стояк заповненим, тим самим забезпечити постійний натиск.

На практиці, програми як LVMflow потребують верифікаційного коригування. Проведена коригування дозволяє досить точно виявляти усадку в сталевих виливках засобами LVMflow [11].

Подальший розвиток комп'ютерного моделювання ливарних технологій направлено, перш за все, на аналіз напружено-деформованих станів твердіючих виливків. Розрахунок напружень та деформацій дозволяє прогнозувати появу тріщин і безпосередньо обчислювати лінійні параметри що заважають усадці, виявляти викривлення, точно призначати розміри моделей і стрижнів. Цей напрямок зазначено у всіх програмах, але в даний час недостатньо опрацьовано на рівні математичної теорії освіти ливарних тріщин.

Обговорення результатів

Сталь, особливо легована, з точки зору ливарної технології, є складним сплавом. Це обумовлюється рядом причин, таких, наприклад, як низька текучість, підвищена здатність до окислення компонентів, термохімічне взаємодія з формувальними матеріалами. Внаслідок особливостей твердіння сталі, видалення газів і неметалевих включень з твердіючого виливки досить складно. Підвищена усадка стали викликає необхідність застосування додатки. У сталевих виливках в процесі їх затвердіння і охолодження розвиваються значні внутрішні напруги, що викликають викривлення і утворення тріщин. Тому конструювання і розрахунок систем живильників сталевих виливків є найважливішим етапом ливарної технології. На думку конструкторів і технологів [7,8], втрати і виробничий брак сталевих виливків принаймні на три чверті залежать від вибору конструкції і розмірів елементів ливникової системи, температури металу і швидкості розливання.

Висновки

Основні вимоги до конструкції ливникової система для сталевих виливків можуть бути сформульовані наступним чином:

1. Підведення металу до порожнини форми повинне здійснюватися з високою швидкістю, але плавно та в ті місця, розігрів яких посилить ефект спрямованої кристалізації виливка.

2. Напрямок руху потоку рідкої сталі в порожнині ливарної форми повинно бути одностороннім, що забезпечує винос в додаток газів і неметалевих включень, наприклад, тангенціальне підведення.

3. Ливникова системи не повинна гальмувати усадку виливків, викликаючи тим самим підвищення внутрішніх напружень.

4. Конструкція живильників повинна забезпечувати заливку форми через заповнений канал.

5. Витрата металу і його охолодження в каналах ливникової системи повинні бути мінімальною.

Список літератури

1. **Carlson, K. D.** Prediction of Shrinkage Pore Volume Fraction Using a Dimensionless Niyama Criterion / **K. D. Carlson, C. Beckermann** // *Metallurgical and Materials Transactions A.* – 2009. – V. 40. – №. 1. – P. 163-175. – doi:10.1007/s11661-008-9715-y.
2. **Idan, A. F. I.** The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels / **A. F. I. Idan, O. Akimov, L. Golovko, O. Goncharuk, K. Kostyk** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2016. – V. 2. – №. 5 (80). – P. 69-73. – doi:10.15587/1729-4061.2016.65455.
3. **Carlson, K. D.** Development of new feeding-distance rules using casting simulation: Part I. Methodology / **K. D.**

- Carlson, R. A., Hardin, C., Beckermann** // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2009. – V. 40. – №. 1. – P. 163-175. – doi:10.1007/s11663-002-0027-0.
4. **Mohanad, M. K.** Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding / **M. K. Mohanad, V. Kostyk, D. Domin, K. Kostyk** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 2. – №. 5 (80). – P. 45-49. – doi:10.15587/1729-4061.2016.65454.
 5. **Tavakoli, R.** Automatic optimal feeder design in steel casting process / **R. Tavakoli, P. Davami** // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2008. – V. 197. – №. 9 (12). – P. 921-932. – doi: 10.1016/j.cma.2007.09.018.
 6. **Kostyk, K.** Development of innovative method of steel surface hardening by a combined chemical-thermal treatment / **K. Kostyk** // *EUREKA: Physics and Engineering*. – 2016. – №. 6. – P. 46–52. – doi:10.21303/2461-4262.2016.00220.
 7. **Wondrak T.** Contactless inductive flow tomography for a model of continuous steel casting / **T Wondrak, V Galindo, G Gerbeth, T Gundrum, F Stefani** // *Measurement Science and Technology*. – 2010. – V. 21. – №. 4. – doi:10.21303/2461-4262.2016.00220.
 8. **Dhafer, W. A.-R.** The choice of the optimal temperature and time parameters of gas nitriding of steel / **W. A.-R. Dhafer, V. Kostyk, K. Kostyk, A. Glotka, M. Chechel** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 3. – №. 5 (81). – P. 44–50. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.69809.
 9. **Cukierski, K.** Flow Control with Local Electromagnetic Braking in Continuous Casting of Steel Slabs / **K. Cukierski, B. G. Thomas** // *Metall and Materi Trans B*. – 2008. – № 39 (94). – doi:/10.1007/s11663-007-9109-3.
 10. **Kostyk, K.** Surface hardening of tool from steel 38Cr2MoAl complex chemical-heat treatment / **K. Kostyk** // *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New Solutions in Modern Technologies*. – 2015. – № 39 (1148). – P. 26–33. – doi:10.15587/1729-4061.2017.100014.
 11. **Zhang, J. F.** Numerical simulation of deformation in large scale hydroturbine blade casting / **J. F. Zhang, J. W. Kang, B. C. Liu, Y. Wu, J. S. Zhang, Z. C. Rong** // *International Journal of Cast Metals Research*. – 2008. – V. 38, – №. 8. – P. 620–629. – doi:10.1179/1743281211Y.0000000042.
 12. **Акимов, О. В.** Сплавы с эффектом памяти формы. История появления и развития, физика процесса их уникальных свойств / **О. В. Акимов, С. М. Нури Ахмед** // *Вісник Національного технічного університету*. – 2015. – № 14. – С. 42-49.
 13. **Акимов, О. В.** Влияние термической обработки на свойства нового сплава на основе железа / **О. В. Акимов, С. М. Нури Ахмед** // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – Т. 6. – №. 11 (78). – С. 35-40. – doi:10.15587/1729-4061.2015.56370.
- Criterion. Metallurgical and Materials Transactions A**, 2009, **40**, 1, 163-175, doi:10.1007/s11661-008-9715-y.
2. **Idan, A. F. I., Akimov, O., Golovko, L., Goncharuk, O., Kostyk, K.** The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **2**, 5 (80), 69-73, doi:10.15587/1729-4061.2016.65455.
 3. **Carlson, K. D., Hardin, R. A., Beckermann, C.** Development of new feeding-distance rules using casting simulation: Part I. Methodology. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009, **40**, 1, 163-175, doi:/10.1007/s11663-002-0027-0.
 4. **Mohanad, M. K., Kostyk, V., Domin, D., Kostyk, K.** Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **2**, 5 (80), 45-49, doi:10.15587/1729-4061.2016.65454.
 5. **Tavakoli, R., Davami, P.** Automatic optimal feeder design in steel casting process. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2008, **197**, 9 (12), 921-932, doi: 10.1016/j.cma.2007.09.018.
 6. **Kostyk, K.** Development of innovative method of steel surface hardening by a combined chemical-thermal treatment. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2016, **6**, 46–52, doi:10.21303/2461-4262.2016.00220.
 7. **Wondrak, T., Galindo, V., Gerbeth, G., Gundrum, T., Stefani, F.** Contactless inductive flow tomography for a model of continuous steel casting. *Measurement Science and Technology*, 2010, **21**, 4, doi:10.21303/2461-4262.2016.00220.
 8. **Dhafer, W. A.-R., Kostyk, V., Kostyk, K., Glotka, A., Chechel, M.** The choice of the optimal temperature and time parameters of gas nitriding of steel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **3**, 5 (81), P. 44–50, doi: 10.15587/1729-4061.2016.69809.
 9. **Cukierski, K., Thomas, B. G.** Flow Control with Local Electromagnetic Braking in Continuous Casting of Steel Slabs. *Metall and Materi Trans B*, 2008, **39** (94), doi:/10.1007/s11663-007-9109-3.
 10. **Kostyk, K.** Surface hardening of tool from steel 38Cr2MoAl complex chemical-heat treatment. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New Solutions in Modern Technologies*, 2015, **39** (1148), 26–33, doi:10.15587/1729-4061.2017.100014.
 11. **Zhang, J. F., Kang, J. W., Liu, B. C., Wu, Y., Zhang, J. S., Rong, Z. C.** Numerical simulation of deformation in large scale hydroturbine blade casting. *International Journal of Cast Metals Research*, 2008, **38**, 8, 620–629, doi:/10.1179/1743281211Y.0000000042.
 12. **Akimov, O. V., Nuri Ahmed, S. M.** Splavi s effectom pamyati formi. Istoriya poyavleniya i razvitiya, fizika processa ih unikalnih svoystv. *Bulletin of the National Technical University*, 2015, **14**, 42-49.
 13. **Akimov, O. V., Nuri Ahmed, S. M.** Vliyanie termicheskoy obrabotki na svoystva novogo splava na osnove geleza. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, **6**, 11 (78), 35-40, doi:10.15587/1729-4061.2015.56370.
- Bibliography (transliterated)**
1. **Carlson, K. D., Beckermann, C.** Prediction of Shrinkage Pore Volume Fraction Using a Dimensionless Niyama

Сведения об авторах (About authors)

Юсубов Ильяс Сархадович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кафедра Литейное производство, г. Харьков, Украина; e-mail: prostooelementary@gmail.com.

Illias Yusubov – National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv city, Ukraine; e-mail: Ilyaslangel@mail.ru.

Мариненко Дмитрий Витальевич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кафедра Литейное производство, г. Харьков, Украина; e-mail: dmytromarynenko@gmail.com.

Dmytro Marynenko – National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv city, Ukraine; e-mail: dmytromarynenko@gmail.com.

Костик Екатерина Александровна - кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры Литейное производство; г. Харьков, Украина; e-mail: eklitus@yandex.ru.

Kateryna Kostyk – PhD of Technical Sciences, associate Professor, Department of Foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: eklitus@yandex.ru.

Кравцова Наталья Викторовна – инженер 1 категории кафедры "Механика сплошных сред и сопротивление материалов", Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина.

Natalia Kravtsova – the engineer of 1 category of Department of Continuum Mechanics and Mechanics of Materials, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Юсубов, І. С. Положення виливка у формі з різною товщиною стінок / **І. С. Юсубов, Д. В. Мариненко, К. О. Костик, Н. В. Кравцова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 96-101. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.14.

Please cite this article as:

Yusubov, I., Marynenko, D., Kostyk, K., Kravtsova, N. Provisions of loading in form with different woodworking walls. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 96-101, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.14.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Юсубов, И. С. Положение отливки в форме с различной толщиной стенок / **И. С. Юсубов, Д. В. Мариненко, Е. А. Костик, Н. В. Кравцова** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 96-101. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.14.

АННОТАЦИЯ Целью работы является исследование влияния литниковой системы на процесс получения качественной разностенной стальной отливки в разовых формах. В ходе работы были рассмотрены основные технологические моменты расчета и проектирования литниковой системы, было спроектировано экспериментальную отливку, для которой было рассчитано и спроектировано несколько литниковых систем и мест питания. Каждый вариант спроектированной технологии было промоделировано. В ходе сравнительного анализа возможной пористости в отливке по критерию Нияма было выбрано наиболее рациональное положение и место питания для экспериментальной отливки. Полученные данные можно использовать для ускорения проектирования и повышения качества полученных отливок такой конструкции, как экспериментальный образец.

Ключевые слова: сталь; разностенность; литниковая система; пористость; моделирование.

Поступила (received) 30.04.2018

УДК 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.15

ШВИДКЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є МОДУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ, ПРЕДСТАВЛЕНИХ РЯДОМ ФУР'Є ДВОХ ЗМІННИХ

С. В. ВЕРБИЦЬКИЙ

кафедра промислової електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА
email: verbitskiy@bigmir.net

АНОТАЦІЯ У статті описано принцип представлення модульованих сигналів на основі ряду Фур'є двох змінних. Показано переваги незалежного опису несучої і модулюючої функцій. Наведено формули розрахунку спектральних складових і гармонік на основі ряду Фур'є двох змінних. Отримано дискретизовані формули для розрахунку спектру на основі ряду Фур'є однієї та двох змінних. Показано доцільність використання формул швидкого перетворення Фур'є для зменшення обсягу математичних розрахунків. Проведено адаптацію методики швидкого перетворення Фур'є для розрахунку спектру модульованих сигналів на основі ряду Фур'є двох змінних, для чого додатково здійснюється процедура сумування та перегрупування гармонік за номером. Проведено аналіз трудомісткості розрахунків за запропонованою методикою розрахунку спектру та показано в скільки разів вона зменшується у порівнянні з безпосереднім розрахунком спектру за початковими формулами.

Ключові слова: ряд Фур'є двох змінних; швидке перетворення Фур'є; модульований сигнал

A FAST FOURIER TRANSFORM OF MODULATED SIGNALS BASED ON DOUBLE FOURIER SERIES

I. VERBYTSKYI

Department of Industrial Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT Pulse modulated signals is useful to represent based on double Fourier series. The article describes the principle of representation of modulated signals based on double Fourier series. The advantages of an independent description of carrier and modulating functions are shown. The expediency of using the double Fourier series to analyze the spectrum of modulated signals, where the modulation multiplicity does not have an integer value, or the law of modulation or carrier functions change is parametric, which may cause the appearance of subharmonic oscillations, is shown. The formulas for calculating the spectral components and harmonics on the basis of the Fourier series of two variables are given. The discrete formulas for calculating the spectrum based on Fourier series of one and two variables are obtained. It is shown the expediency of using Fourier transforms to reduce the amount of mathematical calculations. The adaptation of the Fast Fourier Transform method to the calculation of the spectrum of modulated signals based on the double Fourier series is carried out, in addition, the procedure of summation and rearrangement of harmonics by the number is carried out. The number of the function discrete values for given number of spectrum harmonics based on Kotelnikov theorem are estimated. An analysis of the complexity of calculations according to the proposed method for calculating the spectrum and shows how many times it decreases in comparison with the direct calculation of the spectrum by the initial formulas. The recommendations for spectrum calculation proposed based on proposed procedure depend on discrete values of primary function are given.

Keywords: double Fourier series; fast Fourier transform; modulated signal

Вступ

Сигнали з імпульсною модуляцією можуть бути описані у компактній формі на основі ряду Фур'є двох змінних [1-3]. Одна зміна ряду описує несучу функцію закону модуляції, а інша – модулюючу функцію. Завдяки незалежному опису модулюючої і несучої функцій, аналітичний запис модульованого сигналу на основі ряду Фур'є двох змінних описує набір модульованих сигналів з кратністю модуляції P , що лежить в межах від нуля до нескінченності, $P \in [0..∞]$. Тому вказану форму опису модульованих сигналів доцільно використовувати для аналізу спектру модульованих сигналів, де параметр P має не ціле значення або

закон зміни модулюючої або несучої функцій є параметричним, що може спричинити виникнення субгармонічних коливань [4-9].

Коефіцієнти ряду Фур'є двох змінних C_{mn} , які є спектральними складовими сигналу з кратністю m відносно частоти несучої функції і кратністю n відносно частоти модулюючої функції, розраховують за формулою [10,11]:

$$C_{mn} = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{2\pi b_2(y)} \int_{b_1(y)} f(x,y) e^{j(mx+ny)} dx dy, \quad (1)$$

де $f(x,y)$ – функція, спектр якої розраховується,

$b_1(y), b_2(y)$ – аналітичні вирази від функції y у межах інтегрування за змінною x .

Очевидно, що подвійний ряд (1) утворено штучно для зручного опису впливу несучої і модулючої функцій на сигнал однієї змінної. При цьому особливістю подвійного ряду (1) є залежність зовнішнього інтегралу за змінною y від внутрішнього за змінною x .

Застосування ряду Фур'є двох змінних дає можливість розрахувати спектральну характеристику модульованого сигналу в аналітичній формі. Формула для розрахунку амплітуди гармоніки k вихідної напруги C_k на основі ряду Фур'є двох змінних є такою [12]:

$$C_k = \sum_{m=0}^{\infty} C_{m(k-mP)}. \quad (2)$$

Згідно з формулою (2) лише частина спектральних складових C_{mn} (1) використовується для розрахунку модульованого сигналу.

При чисельному розрахунку спектру інтеграл (1) дискретизується і з нього утворюється ряд. Для зменшення обсягу математичних операцій при розрахунку спектру у дискретній формі часто використовують швидке перетворення Фур'є для функцій однієї або декількох змінних [13,14]. В даному випадку коефіцієнти інтегралу (1) використовуються для обчислення ряду (2), при цьому для цього потрібно порахувати лише незначну частину коефіцієнтів C_{mn} . У статті пропонується методика розрахунку параметрів C_{mn} і C_k з мінімальною кількістю математичних операцій.

Мета статті

У статті описуються особливості розрахунку спектру модульованих сигналів на основі ряду Фур'є двох змінних та показуються переваги опису модульованого сигналу як функції двох змінних: перша змінна описує модулюючу функцію, друга змінна описує несучу функцію. Аналізується можливість використання алгоритмів швидкого перетворення Фур'є для зменшення трудомісткості розрахунків при використанні ряду Фур'є двох змінних та оцінюється кількість математичних операцій при використанні швидкого перетворення Фур'є.

Основні теоретичні положення

При обчисленні подвійного інтегралу (1) можливі варіанти, коли внутрішній інтеграл виразу (1) може бути розраховано аналітично. Для цього необхідно:

1) можливість розділення функції двох змінних $f(x,y)$ на добуток двох функцій однієї змінної $f_1(x), f_2(y)$:

$$f(x,y) = f_1(x)f_2(y); \quad (3)$$

2) існування аналітичного інтегралу функції:

$$F_1(x) = \int_{b_1(y)}^{b_2(y)} f_1(x)e^{jmx} dx. \quad (4)$$

У цьому випадку спектральні компоненти C_{mn} розраховуються через інтеграл однієї змінної:

$$C_{mn} = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{2\pi} f_2(y)e^{jny} \times (F_1(m, b_2(y)) - F_1(m, b_1(y))) dy. \quad (5)$$

Тому для пришвидшеного розрахунку спектрального складу модульованого сигналу за формулою (2) доцільно розробити методики для двох випадків представлення спектральних компонент C_{mn} у виді (1) та (5). Якщо дискретизувати ці інтеграли і підставити до формули (2), отримаємо:

$$C_k = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{l=1}^{N_y} f(i\Delta x, l\Delta y) e^{j(mi\Delta x + (k-mP)l\Delta y)} \Delta x \Delta y; \quad (6)$$

$$C_k = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=1}^{N_y} f_2(l\Delta y) e^{j(k-mP)l\Delta y} \times (F_1(m, b_2(l\Delta y)) - F_1(m, b_1(l\Delta y))) \Delta y. \quad (7)$$

Внутрішні суми в формулах (6) і (7) є дискретними формулами перетворення Фур'є для розрахунку спектру. Формула (6) – для функції двох змінних, (7) – для однієї змінної. Відмінністю між класичними формулами дискретного перетворення Фур'є і аналізованими є те, що в даних формулах у показнику ступеня за змінною y замість значення k використовується вираз $(k-mP)$, тому після використання формули швидкого перетворення Фур'є необхідно змінити індексацію розрахованих гармонік. Також необхідно враховувати сумування за параметром m . Для точного розрахунку значення гармонік за формулами (6) і (7) до N_{\max} включно значення параметра m повинно змінюватись від нуля до значення M_{\max} :

$$M_{\max} = \left\lceil \frac{2N_{\max}}{P} \right\rceil + 1. \quad (8)$$

Крок дискретизації Δx і Δy розраховується згідно з теоремою Котельникова. Максимально можливе значення кроку визначається з найвищої гармоніки, значення якої розраховується N_{\max} . Для ряду Фур'є однієї змінної (7) максимальний крок Δy_{\max} розраховується за формулою:

$$\Delta y_{\max} = \frac{\pi}{N_{\max}}, \quad (9)$$

для ряду Фур'є двох змінних (6):

$$\Delta x_{\max} = \frac{\pi}{M_{\max}}; \Delta y_{\max} = \frac{\pi}{N_{\max}}. \quad (10)$$

Для забезпечення необхідної точності кроки Δx і Δy доцільно брати на порядок меншими, ніж кроки Δx_{\max} і Δy_{\max} :

$$\Delta x = \frac{\pi}{10M_{\max}}; \Delta y = \frac{\pi}{10N_{\max}}. \quad (11)$$

Кроки інтегрування Δx і Δy , розраховані за формулою (11) є наближеними і залежно від необхідної похибки розрахунків можуть бути, як більше так і менше, ніж розраховані за формулою (11).

Принцип розрахунку спектру модульованого сигналу на основі швидкого перетворення Фур'є

При безпосередньому використанні алгоритму швидкого перетворення Фур'є використовуються формули:

$$C_{k,m}^* = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{l=1}^{N_y} f(i\Delta x, l\Delta y) e^{j(mi\Delta x + l\Delta y)} \Delta x \Delta y; \quad (12)$$

$$C_{k,m}^* = \sum_{l=1}^{N_y} f_2(l\Delta y) e^{jkl\Delta y} \times (F_1(m, b_2(l\Delta y)) - F_1(m, b_1(l\Delta y))) \Delta y. \quad (13)$$

Для подальшого обчислення значення гармонік за формулами (6) і (7) потрібно здійснити сумування по змінній m та перегрупування гармонік за номером, оскільки в формулах (12) і (13) номер гармоніки відповідає значенню k , а в формулах (6) і (7) – $(k - mP)$.

$$C_k = \sum_{m=0}^{M_{\max}} C_{k-mP,m}^*. \quad (14)$$

Отже, розрахунок спектру є двоетапним: спочатку використовуються формули для швидкого перетворення Фур'є, потім здійснюється сумування гармонік з перегрупуванням за формулою (14).

Аналіз трудомісткості розрахунків

Існуючі методи розрахунку спектру швидкого перетворення Фур'є [15] для функції однієї змінної мають трудомісткість $O_{III}(N \log(N))$, де N – кількість розрахованих гармонік. При розрахунку трудомісткості беруться до уваги лише операції

множення, оскільки час їх розрахунку значно більше ніж операцій додавання.

Якщо для функції двох змінних $f(x,y)$ за змінною x необхідно розрахувати N_1 гармонік, а за змінною y – N_2 , сумарна кількість спектральних компонент C_{mn} складає $N = N_1 \cdot N_2$. Трудомісткість розрахунку O спектральних компонент C_{mn} функції двох змінних $f(x,y)$ у загальному випадку є такою ж як і для функції однієї змінної – $O_{III}(N \log(N))$. Оскільки сумування гармонік з перегрупуванням за формулою (14) не потребує додаткових операцій множення, то трудомісткість алгоритму залишається такою ж.

За умови розрахунку спектру безпосередньо за формулами (6) і (7) трудомісткість розрахунків складає $O(N^2)$, де $N = N_1 \cdot N_2 \cdot M_{\max}$. Отже зменшення трудомісткості розрахунків за умови використання швидкого перетворення Фур'є складає:

$$\frac{O}{O_{III}} = \frac{M_{\max}^2 N_1 N_2}{\log(N_1 N_2)}. \quad (15)$$

Згідно з формулою (15) доцільність формули зростає зі збільшенням кількості гармонік, що розраховується, та зі збільшенням значення параметра M_{\max} .

Висновки

В статті показано можливість використання функції двох змінних для опису модульованих сигналів, де перша змінна описує модульовану, а друга несучу функцію сигналу, що доцільно використовувати для аналізу спектру модульованих сигналів з довільним значенням кратності модуляції або параметричного закону зміни модулюючої або несучої функції, що може спричинити виникнення субгармонічних коливань.

Запропоновано методику використання швидкого перетворення Фур'є для розрахунку спектру модульованих сигналів, що додатково містить операції сумування гармонік з їх подальшим перегрупуванням. Проаналізовано зменшення обсягу математичних операцій у порівнянні з безпосереднім використанням формул для розрахунку спектру і показано, що доцільність запропонованої методики розрахунку спектру зростає зі збільшенням кількості гармонік, що розраховується, та зі збільшенням значення параметра m .

Список літератури

1. **Holmes, D. Grahame.** Pulse width modulation for power converters. Principles and practice / **D. Grahame Holmes, Thomas A. Lipo** // *IEEE Press Series on Power Engineering*, 2003, 724 p. – doi: 10.1109/9780470546284.
2. **Vasca, F.** Dynamics and Control of Switched Electronic Systems: Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters (Advances in Industrial Control) / **F. Vasca, L. Iannelli** // *Springer-Verlag London*, 2012, 493 p. – doi: 10.1007/978-1-4471-2885-4.

3. **McGrath, Brendan Peter.** Natural Capacitor Voltage Balancing for a Flying Capacitor Converter Induction Motor Drive / **Brendan Peter McGrath, Donald Grahame Holmes** // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2009. – Vol. 24, Issue: 6. – P. 1554-1561. – doi: 10.1109/TPEL.2009.2016567.
4. **Cortés, J.** Accurate Analysis of Subharmonic Oscillations of V^2 and V^2I_c Controls Applied to Buck Converter // **J. Cortés, V. Šviković, P. Alou, J. Oliver, J. Cobos, R. Wisniewski** // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2015. – Vol. 30, Issue 2. – P. 1005-1018. – doi: 10.1109/TPEL.2014.2308015.
5. **Giaouris, D.** Application of Filippov method for the analysis of subharmonic instability in dc–dc converters / **D. Giaouris, S. Maity, S. Banerjee, V. Pickert, B. Zahawi** // *International Journal of Circuit Theory and Applications*. – 2009. – Vol. 37, Issue 8. – P. 899-919. – doi: 10.1002/cta.505.
6. **Bierhoff, Michael H.** DC-Link Harmonics of Three-Phase Voltage-Source Converters Influenced by the Pulsewidth-Modulation Strategy—An Analysis / **Michael H. Bierhoff, Friedrich Wilhelm Fuchs** // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2008. – Vol. 55, Issue 5. – Pp. 2085–2092. – doi: 10.1109/TIE.2008.921203.
7. **Jiang, S. Z.** Spectral analysis of a new six-phase pole-changing induction motor drive for electric vehicles / **S. Z. Jiang, K. T. Chau, C. C. Chan** // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2003. – Vol. 50, Issue 1. – P. 123-131. – doi: 10.1109/TIE.2002.807662.
8. **Li, Binbin.** Analysis of the Phase-Shifted Carrier Modulation for Modular Multilevel Converters / **Binbin Li, Rongfeng Yang, Dandan Xu, Gaolin Wang, Wei Wang, Dianguo Xu** // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2015. – Vol. 30, Issue 1. – P. 297-310. – doi: 10.1109/TPEL.2014.2299802.
9. **Zhuiko, V. J.** Kotelnikov double series of modulating signals with limited spectrum / **V. J. Zhuiko, I. V. Verbitskyi and A. G. Kyselova** // *2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv. – 2014. – P. 18-20. – doi: 10.1109/IEPS.2014.6874177.
10. **Вербицкий, Е. В.** Использование двойного ряда Фурье для расчета спектра модулированных сигналов / **Е. В. Вербицкий** // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – № 4. – с. 96-98.
11. **Verbytskyi, I.** Spectrum calculation of frequency pulse modulation voltage using double Fourier series / **I. Verbytskyi** // *IEEE 3rd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, Riga. – 2015. – p. 1-4. – doi: 10.1109/AIEEE.2015.7367287.
12. **Bing, Z.** Frequency-Domain Modeling of Multipulse Converters by Double-Fourier Series Method / **Z. Bing, J. Sun** // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2011. – Vol. 26, Issue 12. – P. 3804-3809. – doi: 10.1109/TPEL.2011.2105504.
13. **Rokhlin, Vladimir.** Fast Algorithms for spherical harmonic expansions / **Vladimir Rokhlin, Mark Tygert** // *SIAM Journal on Scientific Computing*. – 2006. – Vol. 27, No. 6. – P. 1903–1928. – doi: 10.1137/050623073.
14. **Rockmore, Daniel N.** Recent Progress and Applications in Group FFTs / **Daniel N. Rockmore, Jim Byrnes** // *Computational Noncommutative Algebra and Applications*. NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. Springer Netherlands. – 2004. – Vol. 136. – P. 227-254. – doi:10.1007/1-4020-2307-3_9.
15. **Liu, Q. H.** An accurate algorithm for nonuniform fast Fourier transforms (NUFFT's) / **Q. H. Liu, N. Nguyen** // *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*. – 1998. – Vol. 8, Issue 1. – P. 18-20. – doi: 10.1109/75.650975.

Bibliography (transliterated)

1. **Holmes, D. Grahame, Lipo, Thomas A.** Pulse width modulation for power converters. Principles and practice. *IEEE Press Series on Power Engineering*, 2003, 724 p., doi: 10.1109/9780470546284.
2. **Vasca, F., Iannelli, L.** Dynamics and Control of Switched Electronic Systems: Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters (Advances in Industrial Control). *Springer-Verlag London*, 2012, 493 p., doi: 10.1007/978-1-4471-2885-4.
3. **McGrath, Brendan Peter, Holmes, Donald Grahame.** Natural Capacitor Voltage Balancing for a Flying Capacitor Converter Induction Motor Drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24, 6, 1554-1561, doi: 10.1109/TPEL.2009.2016567.
4. **Cortés, J., Šviković, V., Alou, P., Oliver, J., Cobos, J., Wisniewski, R.** Accurate Analysis of Subharmonic Oscillations of V^2 and V^2I_c Controls Applied to Buck Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30, 2, 1005-1018, doi: 10.1109/TPEL.2014.2308015.
5. **Giaouris, D., Maity, S., Banerjee, S., Pickert, V., Zahawi, B.** Application of Filippov method for the analysis of subharmonic instability in dc–dc converters. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2009, 37, 8, 899-919, doi: 10.1002/cta.505.
6. **Bierhoff, Michael H., Fuchs, Friedrich Wilhelm.** DC-Link Harmonics of Three-Phase Voltage-Source Converters Influenced by the Pulsewidth-Modulation Strategy—An Analysis *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55, 5, 2085–2092, doi: 10.1109/TIE.2008.921203.
7. **Jiang, S. Z., Chau, K. T., Chan, C. C.** Spectral analysis of a new six-phase pole-changing induction motor drive for electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003, 50, 1, 123-131, doi: 10.1109/TIE.2002.807662.
8. **Li, Binbin, Yang, Rongfeng, Xu, Dandan, Wang, Gaolin, Wang, Wei, Xu, Dianguo.** Analysis of the Phase-Shifted Carrier Modulation for Modular Multilevel Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30, 1, 297-310, doi: 10.1109/TPEL.2014.2299802.
9. **Zhuiko, V. J., Verbitskyi, I. V., 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, doi: 10.1109/IEPS.2014.6874177.
10. **Verbytskyi, Ye. V.** Ispol'zovaniye dvoynogo ryada Fur'ye dlya rascheta spektra modulirovannykh signalov [Double Fourier series using for calculating modulating signals spectrum]. *Tekhnichna elektrodynamika [Technical electrodynamicity]*, 4, 2014, 96-98.
11. **Verbytskyi, I.** Spectrum calculation of frequency pulse modulation voltage using double Fourier series. *IEEE 3rd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, Riga, 2015, 1-4, doi: 10.1109/AIEEE.2015.7367287.
12. **Bing, Z., Sun, J.** Frequency-Domain Modeling of Multipulse Converters by Double-Fourier Series Method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26, 12, 3804-3809, doi: 10.1109/TPEL.2011.2105504.

13. **Rokhlin, Vladimir, Tygert, Mark.** Fast Algorithms for spherical harmonic expansions. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2006, **27**, 6, 1903–1928, doi: 10.1137/050623073.
14. **Rockmore, Daniel N., Byrnes, Jim.** Recent Progress and Applications in Group FFTs. *Computational Noncommutative Algebra and Applications. NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. Springer Netherlands*, 2004, **136**, 227-254, doi:10.1007/1-4020-2307-3_9.
15. **Liu, Q. H., Nguyen, N.** An accurate algorithm for nonuniform fast Fourier transforms (NUFFT's). *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1998, **8**, 1, 18-20, doi: 10.1109/75.650975.

Відомості про авторів (About authors)

Вербицький Євген Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри промислової електроніки; м. Київ, Україна; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

Ievgen Verbitskiy – Ph. D., asociated professor, Department of Industrial Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Вербицький, Є. В. Швидке перетворення Фур'є модульованих сигналів, представлених рядом Фур'є двох змінних / **Є. В. Вербицький** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 102-106. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.15.

Please cite this article as:

Verbitskiy, I. A fast Fourier transform of modulated signals based on double Fourier series. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 102-106, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.15.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Вербицкий, Е. В. Быстрое преобразование Фурье модулированных сигналов, представленных рядом Фурье двух переменных / **Е. В. Вербицкий** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 102-106. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.15.

АННОТАЦИЯ В статье описан принцип представления модулированных сигналов на основе ряда Фурье двух переменных. Показаны преимущества независимого описания несущей и модулирующей функций. Приведены формулы расчета спектральных составляющих и гармоник на основе ряда Фурье двух переменных. Получено дискретизированные формулы для расчета спектра на основе ряда Фурье одной и двух переменных. Показана целесообразность использования формул быстрого преобразования Фурье для уменьшения объема математических расчетов. Проведено адаптацию методики быстрого преобразования Фурье к для расчета спектра модулированных сигналов на основе ряда Фурье двух переменных, для чего дополнительно осуществляется процедура суммирования и перегруппировки гармоник по номеру. Проведен анализ трудоемкости расчетов по предлагаемой методике расчета спектра и показано в сколько раз она уменьшается по сравнению с непосредственным расчетом спектра по начальным формулами.

Ключевые слова: ряд Фурье двух переменных быстрое преобразование Фурье; модулированный сигнал.

Надійшла (received) 01.05.2018

УДК 004.07

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.16

ПОБУДОВА СЕНСОРНОЇ MESH-МЕРЕЖІ ПРОМИСЛОВОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ BLUETOOTH 4.2

Ю. Є. ГРУДЗИНСЬКИЙ*, Я. Ю. ЛУКОМСЬКИЙ

кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського", м. Київ, УКРАЇНА
*email: jug@sonettele.com

АННОТАЦІЯ У даній статті розглянуто особливості технології сенсорних mesh-мереж на базі технології Bluetooth Low Energy (BLE) для моніторингу об'єктів управління. Описана технологія BLE. Проаналізовано можливість використання Bluetooth як бази для mesh-мережі. Розглянуто варіанти ініціалізації вузлів мережі, а також, адресацію і передачу даних між ними. Розглянуто способи реалізації mesh-мережі з використанням Bluetooth. Наведено реалізацію простої мережі на прикладі моніторингу температури і вологості повітря в лікарні.

Ключові слова: бездротовий моніторинг; промислова система; сенсорні мережі; mesh-мережі; Bluetooth; BLE.

BUILDING THE SENSORY MESH NETWORK OF IIoT BASED ON BLUETOOTH 4.2 TECHNOLOGY

YU. GRUDZYNSKYI*, YA. LUKOMSKYI

Department Automation of heat-and-power engineering processes National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT This paper considered features of technology of sensory networks based on the BLE format for monitoring objects of management. BLE format is described. The possibility of using Bluetooth as the basis of the mesh topology network is analyzed. Options for initializing network nodes as well as addressing and transmitting data between them are considered. The ways of creating of Bluetooth mesh-network are considered. The main goal of this paper is to show, that there is technology, that can be used for creating low energy and secure mesh networks without complicated realization on existing routing protocols. There are three main solution directions of creating bluetooth mesh networks communication: standart, academic and proprietary. Academic is the most ordinary and simple. So if network require dynamic reorganization of nodes, for example cars on roads — flooding based or dynamic routing will be the most effective, and if all nodes won't be able to change its position like sensors in industrial manufacture — static routing solution will be exactly workable. The implementation of a simple network is illustrated by the example of monitoring the temperature and humidity in the hospital. As a result, we have easy implementational mesh topology network, built with the use of Bluetooth technology as the base. That also have Low Energy and high secure connection features along low price. Although there are no routing protocols created exactly for BLE — existing solutions can be integrated in implementations of similar systems. Also, description of the technology can give impuls to create an adapted communication protocol for routing between the nodes of the Bluetooth mesh network.

Keywords: wireless monitoring; industrial systems; sensor networks; mesh networks; Bluetooth; BLE.

Вступ

У світі технологій триває гонка за перше місце в об'єднанні всіх оточуючих нас речей за допомогою протоколів бездротового зв'язку, головною особливістю яких є низьке енергоспоживання.

Mesh-мережі, або інакше сітчасті мережі, - це децентралізовані мережі, засновані на ряді пристроїв з'єднаних один з одним. Кожен з вузлів в них може виступати ретранслятором повідомлень інших вузлів. В основу покладена концепція ретрансляції повідомлень вузлами з метою розширення покриття мережі, при обмеженому радіусі дії кожного окремого вузла. Такий підхід дозволяє достатньо легко масштабувати діючу мережу при підключенні до неї нових вузлів – пристроїв.

Мета статті

Метою статті є намагання показати можливість використання технології Bluetooth в якості базової при побудові сітчастих мереж всередині окремих будинків, або на невеликій території.

Загальний огляд

Новий стандарт протоколу Bluetooth 4.2 побачив світ 3-го грудня 2014 року і встиг завоювати провідне місце в галузі безпроводних технологій. Він містить у собі три модернізації старого протоколу: безпечне з'єднання (Secure Connections), збільшення швидкості передачі даних за рахунок збільшеної довжини інформаційного пакета (Data Length

Extension, DLE) і захист конфіденційності (Privacy 1.2) [1]. Bluetooth 4.2 представив нові переваги, які покращують швидкість і безпеку передачі інформації, але найголовнішою перевагою є можливість використання Bluetooth, завдяки підтримки протоколу IPv6, для прямого доступу в Інтернет. Це ще більше розширює застосування Bluetooth при використанні його у якості протокола зв'язку для промислового Інтернету речей при моніторингу технологічних систем.

Mesh-мережа

Протокол Bluetooth BLE підтримує не тільки з'єднання «point-to-point» (P2P), а й з'єднання «point-to-multipoint». При створенні мережі використовується архітектура Bluetooth-mesh, при якій кожен з вузлів може виступати ще й у якості ретранслятора пакетів іншого вузла, що суттєво збільшує площу, яку можна покрити одною бездротовою персональною мережею (WPAN), навіть при невеликому радіусі дії окремого вузла. На відміну від P2P, mesh-мережа дозволяє кожному пристрою взаємодіяти з будь-яким іншим пристроєм в мережі. Зв'язок здійснюється шляхом передачі повідомлень, а пристрої ці повідомлення можуть як передавати, так і ретранслювати іншим пристроям, таким чином, збільшуючи радіус зв'язку далеко за межі діапазону радіозв'язку кожного окремого вузла [2].

Ініціалізація вузла мережі

Ініціалізація (provisioning) - це процес, за допомогою якого пристрій включається у mesh-мережу і стає її вузлом. Процес включає до себе кілька етапів, призводить до створення різних ключів безпеки і сам по собі є безпечним процесом. Ініціалізація здійснюється за допомогою програми на пристрої, такому, наприклад, як планшет. Прилад, що використовується для управління процесом ініціалізації, називається "Provisioner". Процес підготовки складається з п'яти кроків, описаних нижче.

1. "Я маяк" (Beaconing). Для підтримки різних функцій мережі bluetooth, були додані нові типи адвертайзінг профілю Bluetooth GAP (GAP AD), зокрема тип AD «Mesh Beacon». Непідготовлений пристрій вказує свою доступність в ефірі, використовуючи в пакетах адвертайзінг цей тип. Для того, щоб пристрій почав передавати такі дані, користувачеві може знадобитися примусово перевести його в цей режим, наприклад, натиснувши комбінацію кнопок або утримуючи спеціальну кнопку на пристрої протягом певного періоду часу.

2. Запрошення (Invitation). На цьому етапі пристрій, що використовується для управління процесом ініціалізації, надішле запрошення. Пристрій «Маяк», у відповідь на запрошення, відправляє інформацію про себе.

3. Обмін публічними ключами. Обидва пристрої

обмінюються своїми відкритими ключами або безпосередньо, або використовуючи метод OOB (out-of-band).

4. Аутентифікація. На цьому етапі пристрій, який повинен увійти в мережу, в тій чи іншій формі відображає користувачеві випадкове число. Користувач вводить це число в пристрій управління, після чого між двома пристроями відбувається певний обмін зашифрованими даними. Результатом даного обміну є обопільне підтвердження автентичності двох пристроїв.

5. Розсилка наданих даних. Після завершення перевірки автентичності створюється ключ сеансу, який використовується для забезпечення безпеки подальшого обміну даними, необхідними для завершення процесу ініціалізації, включаючи генерацію ключа безпеки «NetKey». Після завершення ініціалізації підготовлений пристрій стає володарем трьох речей:

- мережевого ключа «NetKey»;
- параметром безпеки мережі, що має назву «індекс IV» (IV Index);
- адресою unicast, виділеною пристроєм управління.

Після завершення п'ятого етапу пристрій стає вузлом мережі [3].

Передача даних

Bluetooth використовує спосіб модуляції FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum). Передавач розбиває пакети і передає їх по псевдовипадковому алгоритму стрибкоподібного перестроювання частоти (до 1600 разів в секунду), або шаблоном (pattern), складеним з 79 окремих частот. "Зрозуміти" один одного можуть тільки ті пристрої, які налаштовані на один і той же шаблон передачі - для сторонніх приладів передана інформація буде звичайним шумом [4].

Основним структурним елементом мережі Bluetooth є так звана "пікомережа" (piconet) - сукупність від 2 до 8 пристроїв, що працюють на одному і тому ж шаблоні. У кожній пікомережі один пристрій працює як master, а решта як slave. Master визначає шаблон, на якому будуть працювати всі slave-пристрої його пікомережі, і синхронізує її роботу. Стандарт Bluetooth передбачує з'єднання незалежних і навіть не синхронізованих між собою пікомереж (до 10) в так звану "scatternet". Для цього кожна пара пікомереж повинна мати як мінімум один спільний пристрій, який буде master'ом в одній і slave'ом в іншій пікомережі. Таким чином, в межах окремої scatternet з інтерфейсом Bluetooth може бути одночасно пов'язано максимум 71 пристрій, однак ніхто не обмежує застосування пристроїв-шлюзів, що використовують вже мережу Internet для більш далекого зв'язку [5].

Бездротова сенсорна мережа, складена з вузлів, які підтримують стандарт Bluetooth версії 4.2 має здатність до ретрансляції повідомлень по ланцюжку від одного вузла до іншого, що дозволяє в разі виходу

з ладу одного з вузлів організувати передачу інформації через сусідні вузли без значної втрати якості. Це, у свою чергу, підвищує живучість самої мережі при виході з ладу окремих вузлів. Сама мережа визначає оптимальний маршрут руху інформаційних потоків. Як вже було сказано, така мережа може бути організована як сукупність підмереж або кластерів, пов'язаних центрами збору інформації, що виконують роль шлюзів взаємодії «сенсорна мережа - FieldBus». Шлюзи є більш складні програмно-апаратні пристрої, ніж сенсори, володіють значними обчислювальними можливостями і підтримують стандартні інтерфейси (такі як Industrial Ethernet, GPRS, IEEE 802.11, CAN та RS-485). Центри збору інформації можуть мати у своєму розпорядженні виходи на дротові мережі, потужний радіопередавач і бути менш залежні від обмежень в енергоспоживанні [6].

Bluetooth для IoT та mesh-мереж

Початково Bluetooth сфокусований на топологію "зірка", яка обмежує діапазон охоплення мережі. Для того, щоб впоратися з обмеженнями покриття мережі BLE, були запропоновані два основні підходи.

Перший з них базується на зменшенні пропускну здатності сигналу BLE на фізичному рівні щоб збільшити діапазон на каналному рівні. Однак ця схема все ще страждає від жорсткого обмеження покриття.

Другий підхід полягає у включенні BLE пристрою до mesh-мережі. Хоча ця модель передбачає складність і вимагає приутності додаткових мережевих механізмів, вона дозволяє подолати обмеженість топології зірки.

Mesh-мережі на базі BLE можна релізувати декількома способами (Рис. 1).

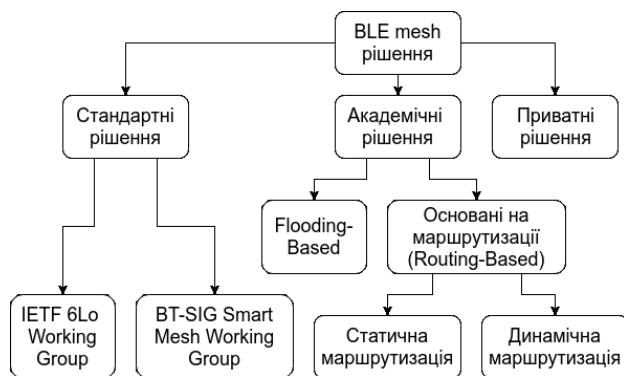


Рис. 1 – Рішення для BLE mesh-мереж

Рішення для BLE mesh-мереж:

1. Стандартні: BT-SIG Smart Mesh Working Group; IETF 6Lo Working Group;
2. Академічні: Flooding-based; Routing-based (static/dynamic);
3. Приватні рішення;

Стандартні рішення розроблені компаніями BT-SIG та IETF. Приватні (пропріетарні) рішення – розроблено окремими компаніями для власних цілей: CSRmesh, BLE-MESH.com, NXP, Silvar, Cypress, Estimote та інші.

Серед академічних рішень - Routing-based та Flooding-based.

Routing-based - рішення для організації вузлів в мережі з визначеними адресами і шляхами до вузлів. Flooding-based рішення для реалізації сітчастої мережі, яка потребує динамічну реорганізацію вузлів [7].

Адресація Bluetooth пристроїв

Bluetooth пристрої використовують 48-розрядні адреси, які класифікуються як публічна адреса пристрою (Public Device Address) і випадкова адреса пристрою (Random Device Address), яка у свою чергу може бути статичною чи приватною.

Статична випадкова адреса попередньо програмується виробником на пристрої до його поставки, або це значення оновлюється при кожному циклі ввімкнення і вимкнення пристрою. Приватна випадкова адреса може бути двох типів: невизначена (Non-Resolvable Private Address - NRPA) і визначена (Resolvable Private Address - RPA). Невизначена генерується випадковим чином і змінюється при кожному новому з'єднанні.

Визначена адреса RPA становить основу конфіденційності BLE пристроїв. Ця адреса генерується за допомогою випадкового числа і загальнодоступного секретного ключа IRK. Ключ IRK, який використовується двома пристроями при їх поєднанні, зберігається у власній пам'яті пристрою під час з'єднання з іншим пристроєм [8].

Адресація в mesh мережі

Основною характеристикою mesh мереж являється змінна топологія. Протоколи маршрутизації діляться на два класи:

1. Проактивні (табличні) - кожен вузол буде свою таблицю маршрутизації і ділиться інформацією про зміну топології мережі зі своїми сусідами. Наприклад OLSR, DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector).

2. Реактивні (працюючі по запиті) - таблиці маршрутизації не будуються, маршрут створюється при необхідності - використовується широкомовна трансляція для визначення шляху надсилання повідомлення. Наприклад DSR (Dynamic Source Routing), AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) [9].

Побудова mesh-мережі лікарні на базі технології BLE

Основні параметри, які повинні регулюватись в

лікарні - це температура і вологість в палатах. Отож маємо 5-ти поверхову будівлю по 10 кімнат на кожному поверсі. Всього 50 функціональних вузлів, які збирають інформацію. 5 центрів збору інформації та базова станція. Статична побудова мережі приводить до використання Routing-based рішення зі статичними 2-х байтними адресами вузлів і використанні проактивного протоколу маршрутизації OLSR.

OLSR заснований на механізмі ширококомовного розсилання для оновлення інформації про топологію мережі. Ця інформація відома кожному вузлу мережі. В OLSR вузол мережі відправляє так зване HELLO-повідомлення. Зміни в топології мережі вузли виявляють за допомогою прийнятих HELLO-повідомлень від сусідів. У цих повідомленнях міститься власна адреса вузла, що відправив дане повідомлення, а також перелік усіх його доступних сусідів і їх адреси. Таким чином вузол повідомляє своїм сусідам про доступні йому зв'язки. Кожен вузол зберігає у себе інформацію про своїх безпосередніх сусідів і сусідів "за два кроки". Відправка HELLO-повідомлень проводиться через встановлені проміжки часу. У разі, якщо протягом певного часу вузол не приймає HELLO-повідомлення від сусіда, то зв'язок з ним вважається розірваним. Відповідна зміна вноситься в таблицю топології мережі сусідів. Крім цього в мережі вузли періодично передають ширококомовне TC-повідомлення (topology control). У цьому повідомленні міститься інформація про з'єднання абонента з однокроковими сусідами. За отриманою інформацією з TC і HELLO-повідомлень, вузол будує граф, який описує уявлення про побудову мережі для даного вузла. За допомогою цього графа будується таблиця найкоротших шляхів передачі інформації до кожного вузла [10].

Обговорення результатів

Як результат маємо не складну в реалізації мережу сітчастої топології, побудовану з використанням технології Bluetooth 4.2 в якості базової. Хоча на даний момент конкретно адаптованих протоколів маршрутизації для реалізації mesh на основі Bluetooth не створено — існуючі варіанти при цьому можуть сміливо застосовуватись при впровадженні таких систем.

Висновки

Bluetooth версії 4.2 завойовує собі місце у списку технологій здатних до реалізації mesh мереж. Крім цього дана версія володіє перевагами безпечної передачі даних та низьким енергоспоживанням. Отже, Bluetooth 4.2 може стати міцною основою для будь-яких сфер діяльності людини, де потрібно ввести дешеву, надійну і безпечну бездротову технологію передачі даних на невеликих площах (наприклад, в межах багатоповерхового будинку), або для створення

різного роду сенсорних мереж з використанням усіх їх переваг.

При використанні у промисловому інтернеті речей Bluetooth 4.2 може бути використаний при побудові дешевої високозахисної сенсорної мережі невеликої площі для моніторингу технологічних процесів.

Список літератури

1. **Соколов, М.** BLE v4.2: быстрее, безопаснее, энергоэффективнее. Часть 1. / **М. Соколов** // *Chip News Украина*. – 2017. – №4.
2. Bluetooth Core Specification, ver. 4.2, Bluetooth SIG, 2014.
3. **Ren, K.** Provisioning a Bluetooth Mesh Network Part 1 / **К. Ren**. – 2017. URL: <https://blog.bluetooth.com/provisioning-a-bluetooth-mesh-network-part-1>.
4. **Hossam, E. A.** Frequency Hopping Spread Spectrum Transceiver Implementation Using Floating-Point DSP / **E. A. Hossam, A. A. Zekry, A. E. Elhennawy, A. M. Hassan**. // *International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*. — 2009.
5. **Камшилин, А.** Bluetooth: технология и ее применение / **А. Камшилин**. – 2001. URL: <https://www.ixbt.com/mobile/review/bluetooth-2.shtml>.
6. **Грудзинський, Ю. Є.** Бездротовий моніторинг технологічних об'єктів управління на основі технології сенсорних мереж / **Ю. Є. Грудзинський, Я. Ю. Лукомський** // *Матеріали другої міжнародної конференції "Проблеми знання з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO'17* – 2017. – С. 95–99.
7. **Darroudi, S.M.** Bluetooth Low Energy Mesh Networks: A Survey / **S.M. Darroudi, C. Gomez** // *Sensors*. – 2017. – 17. – 1467. – doi: 10.3390/s17071467.
8. **Grace, K. H.** An approach for modestly directional communications in mobile ad hoc networks / **K. H. Grace, J. A. Stine, R. C. Durst** // *Springer Telecommun. Sys. J.* – 2005. – 28, 3-4. – 281-296. – doi: 10.1007/s11235-004-5573-0.
9. **Гусс, С. В.** Самоорганизующиеся mesh-сети для частного использования / **С. В. Гусс** // *МсuM*. – 2016. – №4 (40). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/samoorganizuyuschie-sya-mesh-seti-dlya-chastnogo-ispolzovaniya>.
10. **Clausen, T.** Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) / **T. Clausen, P. Jacquet, C. Adjih, A. Laouiti, P. Minet** // *Network Working Group*. – 2003.

Bibliography (transliterated)

1. **Sokolov, M.** BLE v4.2: bystree, bezopasnee, energoeffektivnee. Chast 1. *Chip News Ukraina*, 2017, №4.
2. Bluetooth Core Specification, ver. 4.2, Bluetooth SIG, 2014.
3. **Ren, K.** Provisioning a Bluetooth Mesh Network Part 1. 2017. Available at: <https://blog.bluetooth.com/provisioning-a-bluetooth-mesh-network-part-1>.
4. **Hossam, E. A., Zekry, A. A., Elhennawy, A. E., Hassan, A. M.** Frequency Hopping Spread Spectrum Transceiver Implementation Using Floating-Point DSP. *International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*, 2009.
5. **Kamshilin, A.** Bluetooth: tekhnologiya i ee primenenie. 2001, Available at: <https://www.ixbt.com/mobile/review/bluetooth-2.shtml>.

6. **Grudzinskiy, Yu. Ye., Lukomskiy, Ya. Yu.** Bezdrotniy monitoring tekhnologichnikh ob'ektiv upravlinnya na osnovi tekhnologiyi sensornikh mrezh. *Materiali drugoyi mizhnarodnoyi konferentsiyi "Problemi znyattya z ekspluatatsiyi ob'ektiv yadernoyi energetiki ta vidnovlennya navkolishnogo seredovischa" INUDEC0'17*, 2017, 95–99.
7. **Darroudi, S. M., Gomez, C.** Bluetooth Low Energy Mesh Networks: A Survey. *Sensors*, 2017, **17**, 1467. – doi: 10.3390/s17071467.
8. **Grace, K. H., Stine, J. A., Durst, R. C.** An approach for modestly directional communications in mobile ad hoc networks. *Springer Telecommun. Sys. J.*, 2005, **28**, 3-4, 281-296. – doi: 10.1007/s11235-004-5573-0.
9. **Guss, S. V.** Samoorganizuyuschiesya mesh-seti dlya chastnogo ispolzovaniya. *MsiM*, 2016, №4 (40). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/samoorganizuyuschiesya-mesh-seti-dlya-chastnogo-ispolzovaniya>.
10. **Clausen, T., Jacquet, P., Adjih, C., Laouiti, A., Minet, P.** Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). *Network Working Group*, 2003.

Відомості про авторів (About authors)

Грудзинський Юліан Євгенович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», старший викладач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів, м. Київ, Україна; e-mail: jug@sonettele.com.

Yulian Grudzynskyy – Senior Teacher, Department of Automation of Heat-Power Processes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: jug@sonettele.com.

Лукомський Ярослав Юрійович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», магістр кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів, м. Київ, Україна; e-mail: yar.lukomsky@gmail.com.

Yaroslav Lukomskiy – Master Student, Department of Automation of Heat-Power Processes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: yar.lukomsky@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Грудзинський, Ю. Є. Побудова сенсорної mesh-мережі промислового інтернету речей на основі технології Bluetooth 4.2 / **Ю. Є. Грудзинський, Я. Ю. Лукомський** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 107-111. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.16.

Please cite this article as:

Grudzynskyy, Yu., Lukomskiy, Ya. Building the sensory mesh network of IIoT based on Bluetooth 4.2 technology. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 107-111, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.16.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Грудзинский, Ю. Е. Построение сенсорной mesh-сети промышленного интернета вещей на основе технологии Bluetooth 4.2 / **Ю. Е. Грудзинский, Я. Ю. Лукомский** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 107-111. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.16.

АННОТАЦИЯ В данной статье рассмотрены особенности технологии сенсорных mesh-сетей на базе технологии Bluetooth Low Energy (BLE) для мониторинга объектов управления. Описана технология BLE. Проанализирована возможность использования Bluetooth в качестве базы для mesh-сети. Рассмотрены варианты инициализации узлов сети, а также адресация и передачу данных между узлами. Рассмотрены способы реализации mesh-сети с использованием Bluetooth. Показана реализация простой сети на примере мониторинга температуры и влажности воздуха в больнице.

Ключевые слова: беспроводной мониторинг; промышленная система; сенсорные сети; mesh-сети; Bluetooth; BLE.

Поступила (received) 07.05.2018

УДК 004.9

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.17

ДЕЯКІ ПИТАННЯ ЗАПОБІГАННЯ ІНЦИДЕНТАМ ПРИ ЗОВНІШНІХ КІБЕРАТАКАХ НА АВТОМАТИЗОВАНУ СИСТЕМУ КЕРУВАННЯ КОТЛОАГРЕГАТОМ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ

Ю. Є. ГРУДЗИНСЬКИЙ*, Д. Ю. ХАРЧЕНКО

кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського", м. Київ, УКРАЇНА
*email: jug@sonettele.com

АННОТАЦІЯ У даній статті розглянуто деякі питання запобігання критичних інцидентів, що можуть виникнути при впливі кібератак на автоматизовану систему керування котлоагрегатом системи опалення. Описано найважливіші параметри автоматизованої системи керування (АСК) котла. Наведено можливі види uszkodжень котлоагрегату АСК. Проведено аналіз наслідків певних uszkodжень у зв'язку з кібер-інцидентом. Було також наведено перелік профілактичних заходів для попередження uszkodжень котлоагрегату внаслідок кібер-інциденту.

Ключові слова: АСК ТП; безпека; котлоагрегат; бойлер; кібератака; інцидент; кібер-інцидент.

SOME INCENDENT PREVENTION ISSUES AT EXTERNAL CYBERATTACKS ON HEATING BOILER ICS

YU. GRUDZYNSKYI*, D. KHARCHENKO

Department Automation of heat-and-power engineering processes National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT This article discusses some issues of preventing critical incidents that may arise when cyberattacks are exposed to an boiler industrial control system for heating complexes. The most important parameters of the ICS boiler are described. A list of preventive measures to prevent damage to the boiler unit as a result of the cyber incident was also provided.

For existing industrial control systems, cyberattacks that transfer the system to a previously known dangerous state are usually not expected and not compensated for normal operating parameters.

If the attacker has access to the ASC boiler, he can block its work by changing the corresponding values of the operating modes, passing the wrong statements from the sensors, or completely shutting off the boiler. Interrupting the flow of water and fuel fed into the boiler and the furnace will disrupt the combustion process and it is already a problem, but for the boiler boiling water (when turning off the feeding water) can be extremely dangerous.

That is why in this article the possible types of damage to the boiler unit ICS are given. An analysis of the consequences of certain injuries due to the cyber incident has been carried out. A list of preventive measures to prevent damage to the boiler unit as a result of the cyber incident was also provided.

Keywords: ICS; security; boiler unit; boiler; cyber-attack; incident; cyber-incident.

Вступ

З кожним днем стає все більше і більше фактів порушення безпеки в комп'ютерних системах автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСК ТП). Це призводить до того, що відповідні менеджери та інженерний персонал повинні постійно та ретельно визначати, класифікувати та зменшувати ризики в системах управління з метою успішного недопущення як самих кібератак, так і швидкого подолання їх наслідків, якщо така кібератака сталася.

Як засвідчує досвід, у багатьох випадках найбільший ризик для компанії, людей, технологічних процесів та прибутку спричинюється компромісним (недосконалим) рішенням існуючого промислового управління, а не втраченою чи пошкодженою даних, як в інформаційних (ІТ) системах.

Захищеність компанії вимірюється успішним вирішенням наступних питань [1]:

1. Які можливості в системі управління існують для злому?
2. Які незахищеності існують у компанії і якими можуть бути їх наслідки?
3. Який максимальний збиток може бути заподіяно, якщо станеться одне з таких порушень?
4. Які конкретні засоби безпеки захищають кожен з наявних об'єктів управління?
5. Якщо системи мають вразливі місця в кібербезпеці, то як ці вразливості впливають на цілі, пов'язані з безпекою?
6. Хто в організації відповідає за заходи безпеки? Чи працюють команди з ІТ та відділу контрольно-вимірювальних приладів та автоматизації (КВПТА) разом, щоб забезпечити максимум безпеки в організації?

7. Чи було виділено потрібні ресурси, реалізовані правильні стандарти та придбано необхідне обладнання, щоб досягнути найкращого результату?

По-перше, для того, щоб створювати і підтримувати безпечні системи, необхідно спочатку забезпечити, щоб як самі технологічні процеси, так і зв'язок між ними були безпечними.

По-друге, треба переконатися в тому, що експлуатаційний персонал КВПтА має досвід у кібербезпеці промислових систем управління і тісно зкоординований з ІТ-персоналом, для того, щоб захистити усі системи та процеси.

По-третє, потрібно переконатися, що саме обладнання є безпечним і вирішує відомі проблеми кібербезпеки за допомогою використання галузевих стандартів та програм відповідності [2].

Автоматизована система керування технологічними процесами є системою, що складається з декількох компонентів, призначених для моніторингу та управління фізичними процесами та забезпечення безпечних операцій в межах конкретних відомих станів системи. Така її будова дозволяє безпечніше керувати зміною станів системи, щоб мінімізувати ризики переходів між ними. Таким чином, існуюча керованість станів та переходів призначена для захисту від випадкових збоїв одного, або декількох компонентів. Однак, для існуючих промислових систем керування направлені кібератаки, що переводять систему у заздалегідь відомий небезпечний стан, зазвичай не очікуються і не компенсуються до нормальних робочих параметрів.

Мета статті

Метою статті є висвітлення і дослідження деяких проблем кібербезпеки котлоагрегатів, а також аналіз методів запобігання їх виникненню.

Проблеми кібербезпеки котлоагрегату

Котел є закритим об'єктом під тиском, в якому вода або інша рідина використовується для підігріву води з метою подальшого обігріву будівлі конвекторами та батареями, в той час як опалювальна піч використовує тепле повітря для обігріву. При цьому, способи поширення тепла в будівлі і в першому, і в другому випадку, відрізняються один від одного. Параметри котлоагрегату та системні дані, які повинні контролювати АСК котла, наведені нижче [3]:

- температура води, що подається;
- температура димових газів;
- тиск палива;
- наявність полум'я;
- фактична пропускна здатність паливних трубопроводів;
- ефективність спалювання палива;
- обсяг газу, що спалюється;
- значення процента кисню O_2 ;
- питомий тиск гарячої води на виході;

- історія несправностей;
- кількість запусків котла;
- лічильник часу роботи;
- температура повітря в приміщенні.

Після того, як зловмисник отримав доступ до АСК котла, він має змогу заблокувати його роботу, змінивши відповідні значення робочих режимів, чи передавши невірні показання від датчиків, або і зовсім вимкнути котел. Переривання потоку води і палива, які подаються в котел та топку, порушить процес згоряння і само по собі, в кращому випадку, вже являє собою проблему, але для котла википання води (при відключенні живильної води) може бути надзвичайно небезпечним. Якщо подача води за якийсь час навіть і відновлюється в порожній котел, навіть невелика кількість живильної води закипає миттєво при контакті з перегрітою металеву оболонкою і призводить до сильного вибуху пари, з яким не зможе справитися наявні запобіжні клапани для пари.

Існує два типи блокування, які можуть виникнути у котла при відключенні пристрою ручного обмеження кількості помилок (код помилки для низької води, високого або низького тиску, відсутності факела, забрудненого димоходу або низького процента кисню). Ручний перезапуск блокування вимагає, щоб оператор натиснув кнопку скидання. Автоматичне скидання блокування здійснюється самостійно, коли стан помилки очищено.

Розглянемо деякі можливі види ушкоджень котла, як результат впливу кібератаки.

Вибух котла

Звичайно, інженери вважають, що це не може відбутися через системи безпеки, призначені для запобігання катастрофі. Згадаємо, що на Чорнобильській АЕС були вимкнені функції безпеки, що і призвело до вибуху і подальшого руйнування реактора. Зловмисник теж постарается вимкнути функції безпеки без вашого відома. Відсутність в АСК котла захисту від подібної кібератаки може (і швидше за все) призведе до катастрофи. Найпоширеніші способи "знищити котел" кібератакою наведено нижче [4]:

- вибух палива;
- низький рівень води у котлі;
- неправильний розігрів котла;
- неправильний рівень тиску у котлі;
- згасання полум'я;
- надмірне полум'я.

Найбільш небезпечною ситуацією є вибух палива в бойлері або топці котла. Умови для вибуху можуть бути створені зловмисником, який примусово змінює профіль конфігурації (робочі параметри) системи, тому АСК ТП "вважає", що бойлер або топка працюють належним чином, коли насправді параметри вже давно вийшли за виробничі налаштування. Сигнал тривоги при цьому звучати не буде. Зловмисник може викликати вибух котла кількома способами [5]:

• **надлишок паливної суміші:** зловмисник може використовувати АСК для створення високих концентрацій незгорілого палива, вимикаючи полум'я чи, навпаки, перекриваючи автоматичне вимикання, що дозволяє продовжувати безперервну подачу палива. Коли полум'я знову запалюється, це накопичене незгоріле паливо спалахує і призводить до сильного вибуху. Суміш, багата на паливо, також може виникнути, коли недостатньо повітря (кисню) для повного спалення палива. Зловмисник розраховує, при цьому, на відповідні дії обслуговуючого персоналу, який буде намагатися посилити потік повітря у зону згоряння топки, що призведе до величезного вибуху;

• **погана фрагментація мазутного палива:** накопичення будь-якого незгорілого палива в топці може призвести до вибуху. Котли вибухали через недостатню фрагментацію мазуту, що призводить до його неповного згоряння, що у свою чергу спричиняє скупчення незгорілого палива в топці. Зловмисник досягає такого ефекту, збільшуючи тиск пари (або повітря) і збільшуючи тиск подачі палива набагато вище рекомендацій виробника котлоагрегату.

• **недостатнє очищення топки:** вибух виникає після проблем з горінням, що спричиняється відсутністю факела. Зловмисник може загасити полум'я. Відділ технічного обслуговування намагатиметься відновити полум'я, а весь цей час паливо активно розпилялося у топці. Незгоріле паливо, що накоплюється внизу гарячої топки, випускає горючі гази. Коли обслуговуючий персонал нарешті запалить паливо, спалахне велика кількість неспалених горючих газів у топці, внаслідок чого станеться величезний вибух.

Катастрофі можна запобігти, *ретельно очищуючи топку*, перш ніж намагатись поновлювати горіння. Це особливо важливо, якщо паливо вже попало в топку. Чистка повинна знижувати будь-яку кількість незгорілих горючих газів у топці до концентрації нижче вибухонебезпечної.

Вибух гарячого бойлера

Пожежні підрозділи знайомі з вибуховим потенціалом навіть невеликого гарячого бойлера. Якщо зловмисник стане причиною того, що водяний резервуар бойлера, що знаходиться під значним тиском, вибухне при 167 °С, вибух буде мати величезну силу. Декілька кімнат від місця вибуху перетворяться в пил, а люди в них чи поряд будуть вбиті чи поранені. Важливо пам'ятати, що енергія вибуху із котельної проходить через будівельні канали конструкцій будинку.

Прикладом руйнівної сили вибуху котла високого тиску є вибух на амфібійному десантному кораблі ВМС США Iwo Jima [6]. У жовтні 1990 року судно вже працювало в Перській затоці приблизно два місяці, і виникли деякі витікання води з парогенератора корабля.

Було заплановано технічне обслуговування, в тому числі капітальний ремонт головного парового

клапана, що постачає пару одній з турбін електрогенераторів корабля. Цей клапан може розглядатися як запірний. Коли було запущено другий генератор турбін, і нещодавно відремонтований клапан було відкрито, щоб дозволити парі при тиску 270 кг на квадратний дюйм і 450 °С проходити, то протягом декількох хвилин цей клапан дуже сильно пропускав пару.

До того, як капітан зміг зупинити корабель і вимкнути подачу пари, кришка клапану повністю відлетіла і пара від двох великих котлів була уся скинута до котельні. Всі десять членів екіпажу в котельній були вбиті. Причиною цієї катастрофічної аварії стало використання вугілля неналежної якості. Підвищення тиску котла вище максимального дасть такий ж фатальний результат.

Низький рівень води в барабані котла

Серйозні пошкодження котла стають результатом низького рівня води в барабані котла, оскільки типова температура топки перевищує 900 °С, а міцність сталі зменшується, коли вона перевищує 430 °С. Наявність води у всіх трубах топки є єдиним, що дозволяє котлу витримувати високу температуру. За низького рівня води сталевий котел може зруйнуватися. Сучасний котел обладнаний автоматичним вимикачем низького рівня води, який відключає паливо і вмикає примусовий вентилятор. Це припиняє доступ тепла. Якщо зловмисник зможе отримати доступ до цього вимикача, у вас станеться вибух.

Зловмисник може створювати ці умови низького рівня води за допомогою будь-яких з наступних дій: відключення насоса живильної води; відкрити випускний клапан управління; втрата води в системі деаератора або в системі повторного запуску; відключення контролера рівня в барабані; втрата тиску повітря у приводі керуючого клапана; піднімання запобіжного клапана; велика раптова зміна споживання пари.

На жаль, котли, оснащені автоматичним вимикачем низького рівня води, руйнуються кожен рік, тому що обслуговуючий персонал намагається відключити цю схему, щоб зменшити кількість докучливих повідомлень [7]. Встановлення пристрою самоконтролю з наступним автоматичним рутинним тестуванням дозволить двом незалежним схемам перевірити, чи функціонує вимірювальний електрод правильно. Перша схема буде виробляти головний сигнал тривоги коли виявляється низький рівень води. Друга схема встановлюється повністю незалежною від АСК котла, вона теж фіксує низький рівень води, і якщо так, то вона буде безпечно вимикати котел.

Вирішення проблем

Пошук і усунення несправностей є формою вирішення проблем, що стосуються ремонту несправного обладнання або систем. Логічно, що систематичний пошук джерела проблеми, призводить

до того, що вона може бути вирішена, і обладнання або система можуть бути введені в дію. У разі кібератаки проти обладнання або системи, симптоматика проблеми може бути доволі великою [8]. Для довільної системи керування очікується, що вхідні сигнали системи будуть генерувати відповідні результуючі вихідні сигнали. Будь-яка несподівана або небажана поведінка може бути ознакою атаки. Проста заміна зламані частини обладнання, такої як насос або двигун, буде марною без відновлення нормального функціонування програмної частини «хакнутої» АСК ТП [9].

Багато АСК ТП можуть генерувати звіти в процесі своєї роботи, що є дуже корисним при усуненні неполадок. Якщо проблема помічена, то важливо подивитися на всі початкові налаштування і будь-які можливі подальші перевизначення параметрів, щоб чимскоріше визначити причину. Використання таких функцій в АСК ТП, як моніторинг даних, пов'язаних із керуванням енергоспоживання будівлі, буде корисним, але слід мати на увазі, що і ця функція теж може бути «скомпрометованою» Таким чином, показання енергоспоживання можуть здаватися абсолютно нормальними, коли насправді фактичне споживання енергії може бути значно вище [10].

Кроки вирішення проблем

КРОК 1. Впевнитися в тому, що подія є кібератакою

КРОК 2. Старатися стримувати атаку, виходячи з того, що АСК ТП вже не під вашим контролем.

КРОК 3. Зупинити атаку.

КРОК 4. Оцінити пошкодження у всьому несправному обладнанні, вважаючи що все обладнання було «хакнуте».

КРОК 5. Замінити заражені сервери та відновити пошкоджене обладнання.

КРОК 6. Перезавантажити систему керування та перезапустити автоматичне керування.

Обговорення результатів

Наступні заходи повинні бути дотримані, щоб перешкодити зловмисникам зруйнувати котел [3]:

- обов'язково досліджувати і перевірити причину аварії, перш ніж намагатися знову запалити топку котла;
- періодично спостерігати за полум'ям пальника, щоб своєчасно дізнаватися про проблеми згоряння;
- перед розпалюванням котла, завжди треба продувати топку повністю, щоб видути незгорілі гази. Це особливо важливо, якщо попередньо було зафіксовано виток палива;
- слід переконатися, що система очищення води працює належним чином;
- ніколи не відключати індикатори низького рівня води в котлі;

- слід переконатися в тому, що вода покидає деаератор вільною від кисню, і що деаератор працює при належному тиску, а також і в тому, що бак для зберігання води знаходиться при температурі насичення. Безперервна вентиляція деаератора необхідна для продування незконденсованих газів;

- слід постійно стежити за якістю конденсату для того, щоб забезпечити своєчасний виток конденсату в разі катастрофічної відмови технологічного обладнання;

- ніколи не продувати стінки топки в той час як котел працює;

- крива розігріву котла повинна бути строго дотримана (зазвичай, швидкість підвищення температури в барабані котла не повинна бути більшою за 40 °C / годину);

- слід переконатися, що випускний клапан барабану котла відкривається, коли тиск в котлі стає менше технологічно коректного значення.

Висновки

Таким чином, в даній статті показано, що для запобігання кібер-інцидентам у АСК ТП котлоагрегату слід враховувати:

- можливі види ушкоджень внаслідок кібератаки;
- шляхи вирішення проблем;
- профілактичні заходи, які зменшать вірогідність кібер-інциденту.

Список літератури

1. NIST Special Publication 800-82 rev. 2. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security, 2015, 5, URL: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-82/rev-2/final>
2. **Ackerman, P.** Industrial Cybersecurity / **P. Ackerman** // Birmingham: Packt Publishing. – 2017, p. 515.
3. **Ayala, L.** Cyber-Physical Attack Recovery Procedures. A Step-by-Step Preparation and Response Guide / **L. Ayala** // New York: Shpringer Apress. – 2016, p. 176.
4. **Macaulay, T.** Cybersecurity for Industrial Control Systems. SCADA, DCS, PLC, HMI and SIS / **T. Macaulay, B. Synger** // New York: CRC Press. – 2011, p. 330.
5. **Knapp, E. D.** Industrial Network Security. Securing Critical Infrastructure Networks for Smart Grid, SCADA, and Other Industrial Control Systems / **E. D. Knapp** // New York: Syngress. – 2011, p. 360.
6. **Peterson, D.** Anatomy of a Catastrophic Boiler Accident. 82nd General Meeting Speaker Presentation. / **D. Peterson** // National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors. 2013. URL: <http://www.nationalboard.org/PrintPage.aspx?NewsPageID=521>.
7. **Mochizuki, A.** On experimental verification of model based white list for PLC anomaly detection / **A. Mochizuki, K. Sawada, S. Shin, S. Hosokawa** // Control Conference (ASCC) 2017 11th Asian. – 2017. - p. 1766-1771.
8. **Pollitt, M. M.** A Cyberterrorism Fact or Fancy? / **M. M. Pollitt** // Proceedings of the 20th National Information Systems Security Conference. – 1997. – p. 285–289.
9. **Neumann, P.** Computer-Related Risk / **P. Neumann** // ACM Press. Addison Wesley. – 1995, p. 300.

10. **Li, X.** Asset-Based Dynamic Impact Assessment of Cyberattacks for Risk Analysis in Industrial Control Systems / **X. Li, Ch. Zhou, Yu-Chu Tian, N. Xiong, Yu. Qin** // *Industrial Informatics IEEE Transactions on.* – 2018. – Vol. 14. – p. 608-618.
- Bibliography (transliterated)**
1. NIST Special Publication 800-82 rev. 2. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security, 2015, 5. Available at: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-82/rev-2/final>
 2. **Ackerman, P.** Industrial Cybersecurity. Birmingham: Packt Publishing, 2017, p. 515.
 3. **Ayala, L.** Cyber-Physical Attack Recovery Procedures. A Step-by-Step Preparation and Response Guide. New York: Shpringer Apress, 2016, p.176.
 4. **Macaulay, T., Synger, B.** Cybersecurity for Industrial Control Systems. SCADA, DCS, PLC, HMI and SIS. New York: CRC Press, 2011, p. 330.
 5. **Knapp, E. D.** Industrial Network Security. Securing Critical Infrastructure Networks for Smart Grid, SCADA, and Other Industrial Control Systems. New York: Syngress, 2011, p. 360.
 6. **Peterson, D.** Anatomy of a Catastrophic Boiler Accident. 82nd General Meeting Speaker Presentation. *National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors*, 2013. Available at: <http://www.nationalboard.org/PrintPage.aspx?NewsPageID=521>.
 7. **Mochizuki, A., Sawada, K., Shin, S., Hosokawa, S.** On experimental verification of model based white list for PLC anomaly detection. *Control Conference (ASCC) 2017 11th Asian*, 2017, p. 1766-1771.
 8. **Pollitt, M. M.** A Cyberterrorism Fact or Fancy? Proceedings of the 20th National Information Systems Security Conference, 1997, 285–289.
 9. **Neumann, P.** Computer-Related Risk. ACM Press. Addison Wesley, 1995.
 10. **Li, X., Zhou, Ch., Tian, Y.-C., Xiong, N., Qin, Yu.** Asset-Based Dynamic Impact Assessment of Cyberattacks for Risk Analysis in Industrial Control Systems. *Industrial Informatics IEEE Transactions on*, 2018, **14**, 608-618.

Відомості про авторів (About authors)

Грудзинський Юліан Євгенович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», старший викладач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів, м. Київ, Україна; e-mail: jug@sonettele.com.

Yulian Grudzynskyy – Senior Teacher, Department of Automation of Heat-Power Processes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: jug@sonettele.com.

Харченко Денис Юрійович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», магістр кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів, м. Київ, Україна; e-mail: denisxar@gmail.com.

Denys Kharchenko –Master Student, Department of Automation of Heat-Power Processes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: denisxar@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Грудзинський, Ю. Є. Деякі питання запобігання інцидентам при зовнішніх кібератаках на автоматизовану систему керування котлоагрегатом системи опалення / **Ю. Є. Грудзинський, Д. Ю. Харченко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ«ХПІ». – 2018. – №16 (1292). – С.112-116. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.17.

Please cite this article as:

Grudzynskyy, Yu., Kharchenko, D. Some incident prevention issues at external cyberattacks on heating boiler ICS. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16**(1292), 112-116, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.17.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Грудзинский, Ю. Е. Некоторые вопросы предотвращения инцидентов при внешних кибератаках на автоматизированную систему управления котлоагрегатом системы отопления / **Ю. Е. Грудзинский, Д. Ю. Харченко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 112-116. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.17.

АННОТАЦИЯ В этой статье обсуждаются некоторые проблемы предотвращения инцидентов, которые могут возникнуть при проведении кибератаки на систему управления котлоагрегатом в системах отопления. Описаны наиболее важные для системы управления параметры котла. В этой статье приводятся возможные типы повреждений для ICS котла, проведен анализ их последствий. Представлен перечень превентивных мер по предотвращению повреждения котельного агрегата в результате кибер-инцидента.

Ключевые слова: АСУ ТП; безопасность; котлоагрегат; бойлер; кибератака; инцидент; кибер-инцидент.

Надійшла (received) 07.05.2018

УДК 004.9

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.18

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ РИЗИКУ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Ю. Є. ГРУДЗИНСЬКИЙ*, А. М. ШУЛЕПА

кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського", м. Київ, УКРАЇНА

*email: jug@sonettele.com

АННОТАЦІЯ У даній статті наведено особливості оцінювання ризиків, що виникають при впливі кібератак на автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСК ТП). Описані відмінності при оцінці ризиків типових ІТ-систем та АСК ТП. Наведено потенційні наслідки інцидентів у АСК ТП. Проведено аналіз наслідків порушення технологічного процесу в АСК ТП у зв'язку з кібер-інцидентом. Обґрунтовано важливість врахування нецифрових (аналогових) складових АСК ТП при оцінці впливу кібер-інциденту. Проаналізовано важливість врахування розповсюдження впливу на пов'язані системи та процеси.

Ключові слова: АСК ТП; безпека; ризик; оцінка ризику; інцидент; кібер-інцидент.

SPECIAL CONSIDERATIONS FOR DOING RISK ASSESSMENT OF INDUSTRIAL CONTROL SYSTEMS

YU. GRUDZYNSKYI*, A. SHULEPA

Department Automation of heat-and-power engineering processes National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT This paper provides special considerations that organizations have to pay attention for while doing risk assessment. The culture of safety and safety assessments is well established within the majority of the Industrial Control Systems (ICS) user community. Information security risk assessments should be seen as complementary to such assessments though the assessments may use different approaches and cover different areas. Safety assessments are concerned primarily with the physical world. Information security risk assessments primarily look at the digital world. However, in an ICS environment, the physical and the digital are intertwined and significant overlap may occur. It is important that organizations consider all aspects of risk management for safety (e.g., risk framing, risk tolerances), as well as the safety assessment results, when carrying out risk assessments for information security. The personnel responsible for the information security risk assessment must be able to identify and communicate identified risks that could have safety implications. Conversely, the personnel charged with safety assessments must be familiar with the potential physical impacts and their likelihood developed by the information security risk assessment process. This paper describes potential physical impacts of an ICS incident, shows impact, physical disruption of an ICS process can make. It demonstrates importance of incorporating non-digital aspects of ICS into impact evaluations, provides main categories of non-digital ICS control component and shows basic considerations when considering the possible mitigation effects of non-digital control mechanisms. Also, this paper considering the propagation of impact to connected systems.

Keywords: ICS; security; risk; risk assessment; incident; cyber-incident.

Вступ

На початковому етапі автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСК ТП) мало нагадували традиційні системи інформаційних технологій (ІТ), тому що АСК ТП були ізольованими системами з власними протоколами управління, що використовували спеціалізоване обладнання та програмне забезпечення. Багато компонентів АСК ТП перебували на фізично захищених ділянках, а самі компоненти не були підключені до ІТ-мереж або систем. Сьогодні, оскільки АСК ТП все більше використовують ІТ-рішення для можливості підключення до корпоративних бізнес-систем та використання віддаленого доступу, то вони починають нагадувати ІТ-системи у сфері кібербезпеки. Ця

інтеграція підтримується новими можливостями ІТ, але вона забезпечує значно меншу ізоляцію АСК ТП від зовнішнього світу, порівняно з попередніми системами, що створює підвищену потребу в безпеці цих систем. Незважаючи на те, що типові рішення вже були раніше розроблені для вирішення проблем безпеки в ІТ-системах, слід застосовувати спеціальні запобіжні заходи при впровадженні цих самих рішень для середовищ АСК ТП. У деяких випадках потрібні нові рішення безпеки, більш пристосовані до АСК ТП.

Хоча деякі характеристики між обома типами систем схожі, проте АСК ТП мають і власні особливості, які сильно відрізняють їх від традиційних систем обробки інформації. Багато з цих відмінностей обумовлено тим фактом, що логіка, яка виконується в АСК ТП, безпосередньо впливає на фізичний світ.

Деякі з цих характеристик включають значний ризик для здоров'я та безпеки людського життя та серйозну шкоду для навколишнього середовища, а також серйозні фінансові наслідки для організації, такі як втрати виробництва, негативний вплив на економіку країни та компрометація приватної інформації [1]. АСК ТП мають унікальні вимоги до продуктивності та надійності, часто використовують операційні системи та програми, які можуть вважатися нетрадиційними для типового ІТ-персоналу [2]. Окрім цього, цілі безпеки та ефективності ІТ-рішень іноді суперечать безпеці при розробці та експлуатації АСК ТП.

Програми кібербезпеки АСК ТП завжди повинні бути частиною більш широких програм безпеки і надійності як окремого підприємства, так і в корпоративних програмах кібербезпеки усєї організації, оскільки кібербезпека має важливе значення для безпечної та надійної роботи сучасних технологічних процесів [3]. Загрози для систем керування можуть надходити з численних джерел, включаючи ворожі уряди [4], терористичні групи, незадоволені працівники, зловмисники, складності, аварії та стихійні лиха, а також зловмисні чи випадкові дії інсайдерів [5]. Пріоритети доступності (надійності роботи) та цілісності, за якими вже слідує конфіденційність, повинні передувати іншим цілям безпеки АСК ТП.

З самої природи АСК ТП впливає (оскільки вплив кібер-інциденту в АСК ТП може включати як фізичні, так і цифрові ефекти), що коли проводиться оцінка ризику впливу кібер-інциденту на систему керування та довілля, можуть існувати додаткові міркування, які відсутні при проведенні оцінки ризиків традиційної ІТ-системи.

Мета статті

Метою статті є намагання показати, які саме чинники і зв'язок між ними слід враховувати при оцінці ризику для АСК ТП при можливих кібератаках на неї.

Захист в межах оцінки ризику інформаційної безпеки АСК ТП

Оцінки безпеки стосуються перш за все фізичного світу. Оцінки ризику інформаційної безпеки в першу чергу розглядають цифровий світ. Проте в середовищі АСК ТП фізичний та цифровий світ тісно переплетені, і може відбуватися їх значне взаємопроникнення.

Важливим є те, що організації повинні враховувати всі аспекти керування ризиками для захисту (наприклад, розробка ризиків, стійкість до ризику), а також результати оцінки захисту при проведенні оцінки ризиків інформаційної безпеки. Персонал, відповідальний за оцінку ризику інформаційної безпеки, повинен мати можливість ідентифікувати усі виявлені ризики, які можуть мати

наслідки для безпеки та повідомляти про них. І навпаки, персонал, на який покладено оцінку безпеки, повинен бути в курсі потенційних фізичних впливів, розроблених процесом оцінки ризику інформаційної безпеки, та їх вірогідності [6].

Потенційні фізичні наслідки інцидентів в АСК ТП

Оцінка потенційного фізичного збитку від кібер-інциденту повинна включати до себе наступні питання [7]:

- як інцидент може змінювати роботу датчиків та виконавчих механізмів для впливу на фізичне середовище;
- які резервні елементи керування існують в АСК ТП для запобігання впливу;
- як може виникнути фізичний інцидент на основі цих умов.

Фізичний вплив може негативно позначитися на довкіллі багатьма засобами, включаючи викид небезпечних матеріалів (наприклад, сирої нафти), пошкодження за допомогою кінетичних сил (наприклад, вибухів) та впливу джерел енергії (наприклад, електроенергії, пари). Фізичний інцидент може негативно вплинути і на саму АСК ТП та підтримку прилеглої інфраструктури: вплинути на різні технологічні процеси, якими керує АСК ТП, або на довілля. Оцінка потенційних фізичних впливів повинна включати в себе всі частини АСК ТП, починаючи з оцінки потенційного впливу на підключені датчики та приводи. Кожна з цих частин буде розглянута нижче.

Оцінка впливу кібер-інциденту на фізичне середовище має зосереджуватися на потенційному нанесенні шкоди безпеці людини, природного довкілля та інших прилеглих критичних інфраструктур. Наслідки впливу на безпеку людини повинні оцінюватися на основі того, чи це можлива травма, чи професійне захворювання, або навіть смерть від відмови АСК ТП. Також до оцінки повинні включатися будь-які раніше проведені оцінки впливу на безпеку, що проводяться організацією стосовно як працівників, так і широкої громадськості. Необхідно також вирішити вплив на довілля. Цей аналіз повинен включати будь-які доступні оцінки впливу на довілля, що проводиться організацією для визначення того, як цей інцидент може вплинути на природні ресурси та дику природу в короткостроковій та довгостроковій перспективі. Крім того, слід зазначити, що АСК ТП може не розташовуватися в одному контрольованому місці, а може бути розподіленою на великій території та знаходитися у неконтрольованому середовищі. Нарешті, вплив на фізичне середовище має досліджувати, наскільки інцидент може спричинити шкоду інфраструктурі, що оточує АСК ТП (наприклад, виробництво/передача електроенергії, транспортна інфраструктура та послуги з водопостачання).

Оцінка впливу порушення технологічного процесу в АСК ТП

Окрім впливу на фізичне середовище, оцінка ризику також повинна включати можливі наслідки для технологічного процесу, що виконується розглянутою АСК ТП, а також іншими системами. Інцидент, який впливає на АСК ТП та порушує залежний процес, може спричинити каскадний вплив на інші процеси, пов'язані з АСК ТП, та на широку громадськість, що залежить від виду отримуваних продуктів та послуг. Вплив на пов'язані процеси АСК ТП може включати в себе як системи, так і процеси в організації (наприклад, процес виробництва, який залежить від процесу, що керується розглянутою системою), або системи та процеси, не пов'язані з організацією (наприклад, комунальне підприємство, що продає вироблену електроенергію найближчому заводу).

Кібер-інцидент також може негативно вплинути і на саму фізичну АСК ТП. Цей тип впливу в першу чергу включає в себе фізичну інфраструктуру заводу (наприклад, резервуари, клапани, двигуни) разом із цифровими та аналоговими механізмами керування (наприклад, кабелі, ПЛК, манометри). Фізичне пошкодження АСК ТП, або заводу може спричинити як короткострокові, так і довгострокові збої в залежності від ступеня інциденту. Прикладом кібер-інциденту, який таким чином вплинув на АСК ТП, є шкідливе програмне забезпечення Stuxnet, яке нанесло фізичну шкоду центрифугам, а також порушило залежні процеси [8].

Включення аналогових аспектів АСК ТП до оцінок впливу

Вплив на АСК ТП не може бути адекватно визначений, зосереджуючись лише на цифрових аспектах системи, оскільки існують аналогові механізми, що забезпечують відмовостійкість та запобігають функціонуванню АСК ТП за межами прийнятних параметрів. Ці механізми можуть допомогти зменшити будь-який негативний вплив, який може мати цифровий інцидент на АСК ТП, і повинні бути включені до процесу оцінки ризику. Наприклад, АСК ТП часто має аналогові керуючі механізми, які можуть перешкодити АСК ТП працювати поза безпечними межами, і тим самим обмежити вплив атаки (наприклад, механічний запобіжний клапан тиску). Крім того, аналогові механізми (наприклад, лічильники, сигналізатори) можуть використовуватися для спостереження за станом фізичної системи, щоб забезпечити операторам надійні дані, якщо цифрові показники недоступні або пошкоджені. У таблиці нижче наведено категорію аналогових механізмів керування, які можуть допомогти зменшенню впливу інциденту на АСК ТП [9].

Таблиця 1 – Категорії аналогових компонентів керування АСК ТП, що повинні бути взяті до уваги при оцінці ризику

Тип системи	Опис
Аналогові реєстратори чи сигналізатори	Аналогові механізми, які вимірюють і відображають стан фізичної системи (наприклад, температуру, тиск, напругу, струм) і можуть забезпечити оператора точною інформацією в ситуаціях, коли цифрові дисплеї недоступні або пошкоджені. Інформація може бути надана оператору на деякому аналоговому індикаторі (наприклад, термометри, манометри) та через звукові сигнали.
Механізми ручного керування	Ручні механізми керування (наприклад, ручні елементи управління клапанами, фізичні вимикачі) надають операторам можливість ручного керування виконавчим механізмом, не покладаючись на цифрову систему керування. Це гарантує, що приводом можна керувати, навіть якщо система управління недоступна або пошкоджена.
Аналогові системи керування	Аналогові системи керування використовують нецифрові датчики та виконавчі механізми для контролю та керування фізичним процесом. Вони можуть запобігти виходу фізичного процесу в небажаний стан у ситуаціях, коли цифрова система керування недоступна або пошкоджена. Аналогові системи керування включають у себе такі пристрої, як регулятори, обмежувачі пристрої та електромеханічні реле.

Визначення потенційної шкоди, який кібер-інцидент може нанести АСК ТП, має включати аналіз усіх аналогових механізмів керування та ступінь, до якого вони можуть пом'якшити можливі негативні наслідки для АСК ТП. При розгляді можливих ефектів пом'якшення наслідків аналоговими механізмами керування, варто враховувати багато факторів, серед яких [10]:

- аналогові механізми керування можуть вимагати додаткового часу та залучення людей для виконання необхідних функцій моніторингу або керування, і ці зусилля можуть бути суттєвими. Наприклад, такі механізми можуть вимагати від

операторів переміщення на віддалену ділянку для виконання певних керуючих функцій. Такі механізми також можуть залежати від часу реагування людини, який може бути довшим, ніж час автоматичного керування;

- ручні та аналогові системи можуть не забезпечувати можливості моніторингу та керування з таким же ступенем точності та надійності, що й цифрова система керування. Це може чинити ризик (якщо основна система керування недоступна або пошкоджена) зниження якості, безпеки або ефективності усієї системи. Наприклад, захисне цифрове реле забезпечує більшу точність і надійність виявлення несправностей, ніж аналогові/статичні реле, тому, якщо цифрові реле недоступні, то у системі можуть бути хибні спрацювання релейних схем.

Включення впливу самої системи безпеки в оцінку ризику

Системи захисту також можуть зменшити вплив кібер-інцидентів на АСК ТП. Системи захисту часто використовуються для виконання спеціальних функцій моніторингу та керування для гарантування безпеки людей, навколишнього середовища, параметрів технологічного процесу та самої АСК ТП. Незважаючи на те, що ці системи традиційно впроваджуються таким чином, щоб бути повністю дублюючими до основних АСК ТП, вони можуть не забезпечувати повного резервування при кібер-інциденті, зокрема, у випадку, коли цей інцидент чинить досвідчений атакуючий. Вплив впроваджених заходів безпеки на систему захисту також має бути оцінено, щоб переконатися в тому, що при всіх випадках вони не стануть негативно впливати на систему.

Врахування розповсюдження впливу на пов'язані системи (каскадний ефект)

Оцінка впливу інциденту також повинна включати до себе і оцінку того, як вплив від АСК ТП може поширюватися на пов'язані з нею АСК ТП, або фізичні системи. АСК ТП можуть бути взаємопов'язані з іншими системами таким чином, що збої в одній системі або технологічному процесі можуть легко каскадно поширюватись на інші системи всередині або поза межами організації. Поширення впливу може відбутися завдяки фізичним і логічним залежностям. Своєчасна передача результатів оцінки ризиків операторам пов'язаних або взаємозалежних систем та технологічних процесів є одним із засобів пом'якшення наслідків шкоди від дії кібератаки.

Пошкодження пов'язаної АСК ТП може виникнути, якщо кібер-інцидент поширюється на пов'язані системи керування. Яскравим прикладом може бути поширення вірусу або черв'яка на підключену АСК ТП, і подальше нанесення шкоди вже цій системі. Фізична шкода також може поширюватися на інші залежні АСК ТП. Якщо інцидент впливає на

фізичне середовище АСК ТП, він також може вплинути і на інші пов'язані з нею фізичні зони. Наприклад, вплив може призвести до фізичної небезпеки, яка погіршує навколишні фізичні умови. Крім того, вплив може також послабити загальні спільні залежності (наприклад, енергопостачання) або призвести до дефіциту матеріалу, необхідного для виконання пізнішого етапу в промисловому технологічному процесі.

Висновки

Таким чином, в даній статті показано, що при розробці оцінки ризику в АСК ТП слід враховувати:

- оцінку впливу кібер-інциденту на захист та використання загальних оцінок безпеки;
- фізичний вплив кібер-інциденту на АСК ТП, включаючи як саме довкілля, так і вплив на керований технологічний процес;
- наслідки оцінки ризику не цифрових (аналогових) компонентів керування в межах АСК ТП.

Список літератури

1. **Patrice, B.** Ukrainian power grids cyberattack. A forensic analysis based on ISA/IEC 62443 / **B. Patrice, J.-P. Hauet, R. Françoise, R. Foley** // *InTech Magazine*. – 2017. – 3-4.
2. **Марков, А. С.** Организационно - технические проблемы защиты от целевых вредоносных программ типа Stuxnet / **А. С. Марков, А. А. Фадин** // *Вопросы кибербезопасности*. – 2013. – 28-36.
3. **Behr, P.** SECURITY: Utilities look back to the future for hands-on cyberdefense / **P. Behr, B. Sobczak** // *E&E News*. – 2016. – 7.
4. **Goedeker, M.** Результаты предварительного расследования и реинжиниринга злоредов, использованных в кибератаке класса "Обрушение" в Украине / **M. Goedeker**. – 2015. – 11. URL: <https://socprime.com/blog-ru/results-of-initial-investigation-and-malware-reverse-analysis-of-fire-sale-ukraine-2/>
5. **Ніколайчук, С.** Хакерська атака в Україні: як працює вірус Petya.A і що робити? / **С. Ніколайчук**. – 2017. – 6. URL: <https://24tv.ua/hackerska-ataka-v-ukrayini-virus-petya-a-yak-pratsyuye-i-shho-robity-n835033>
6. NIST Special Publication 800-82 rev. 2. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security. – 2015. – 5. URL: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-82/rev-2/final>
7. **Ackerman, P.** Industrial Cybersecurity / **P. Ackerman** // Birmingham: Packt Publishing, 2017. – p. 515.
8. **Ayala, L.** Cyber-Physical Attack Recovery Procedures. A Step-by-Step Preparation and Response Guide / **L. Ayala** // New York: Shpringer Apress, 2016. – p.176.
9. **Macaulay, T.** Cybersecurity for Industrial Control Systems. SCADA, DCS, PLC, HMI and SIS / **T. Macaulay, B. Synger** // New York: CRC Press, 2011. – p. 330.
10. **Knapp, E. D.** Industrial Network Security. Securing Critical Infrastructure Networks for Smart Grid, SCADA, and Other Industrial Control Systems / **E. D. Knapp** // New York: Syngress, 2011. - p. 360.

Bibliography (transliterated)

1. **Patrice, B., Hauet, J.-P. Françoise, R., Foley, R.** Ukrainian power grids cyberattack. A forensic analysis based on ISA/IEC 62443, *InTech Magazine*, 2017, 3-4.
2. **Markov, A. S., Fadin, A. A.** Organizatsionno-tekhnicheskie problemy zashhity ot tselevykh vredonosnykh program tipa Stuxnet, *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2013, 28-36.
3. **Behr, P., Sobczak, B.** SECURITY: Utilities look back to the future for hands-on cyberdefense, *E&E News*, 2016, 7.
4. **Goedecker, M.** Rezultaty predvaritel'nogo rassledovaniya I reinzheneringa zlovredov, ispol'zovannykh v kiberatake klassa "Obrushenie" v Ukraine, 2015, 11. Available at: <https://socprime.com/blog-ru/results-of-initial-investigation-and-malware-reverse-analysis-of-fire-sale-ukraine-2/>
5. **Nikolaychuk, S.** Hakerc'ka ataka v Ukraini: yak pratsyue virus Petya A I shho robyty, 2017, 6. Available at: https://24tv.ua/hakerska_ataka_v_ukrayini_virus_petya_a_yak_pratsyuye_i_shho_robiti_n835033.
6. NIST Special Publication 800-82 rev. 2. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security. 2015, 5. Available at: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-82/rev-2/final>.
7. **Ackerman, P.** Industrial Cybersecurity. Birmingham: Packt Publishing, 2017, p. 515.
8. **Ayala, L.** Cyber-Physical Attack Recovery Procedures. A Step-by-Step Preparation and Response Guide, New York: Shpringer Apress, 2016, p.176.
9. **Macaulay, T., Synger, B.** Cybersecurity for Industrial Control Systems. SCADA, DCS, PLC, HMI and SIS, New York: CRC Press, 2011, p. 330.
10. **Knapp, E. D.** Industrial Network Security. Securing Critical Infrastructure Networks for Smart Grid, SCADA, and Other Industrial Control Systems, New York: Syngress, 2011, p. 360.

Відомості про авторів (About authors)

Грудзинський Юліан Євгенович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», старший викладач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів, м. Київ, Україна; e-mail: jug@sonettele.com.

Julian Grudzynskyy – Senior Teacher, Department of Automation of Heat-Power Processes, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: jug@sonettele.com.

Шулепа Андрій Миколайович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», магістр кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів, м. Київ, Україна; e-mail: shulepaa@gmail.com.

Andriy Shulepa – Master Student, Department of Automation of Heat-Power Processes, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: shulepaa@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Грудзинський, Ю. Є. Особливості оцінки ризику в автоматизованих системах керування технологічними процесами / **Ю. Є. Грудзинський, А. М. Шулепа** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 117-121. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.18.

Please cite this article as:

Grudzynskyy, Yu., Shulepa, A. Special considerations for doing risk assessment of industrial control systems. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16**(1292), 117-121, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.18.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Грудзинский, Ю. Е. Особенности оценки риска в автоматизированных системах управления технологическими процессами / **Ю. Е. Грудзинский, А. М. Шулепа** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 117-121. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.18.

АННОТАЦИЯ В данной статье приведены особенности оценки рисков, возникающих при воздействии кибератак на автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП). Описанные различия при оценке рисков типовых ИТ-систем и АСУ ТП. Приведены потенциальные последствия инцидентов в АСУ ТП. Проведен анализ последствий нарушения технологического процесса в АСУ ТП в связи с кибер-инцидентом. Обоснована важность учета нецифровых (аналоговых) составляющих АСУ ТП при оценке влияния кибер-инцидента. Проанализированы важность учета распространения влияния на связанные системы и процессы.

Ключевые слова: АСУ ТП; безопасность; риск; оценка риска; инцидент; кибер-инцидент.

Поступила (received) 08.05.2018

УДК 615.47

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.19

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В НОСОВОЙ ПОЛОСТИ ПРИ ДЫХАНИИ

Я. В. НОСОВА^{1*}, О. Г. АВРУНИН², И. С. ХУШАМ ФАРУК

¹ аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА

² заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА

³ преподаватель, медицинский колледж ИНАЙЯ, Эль-Рияд, САУДОВСКАЯ АРАВИЯ

*email: nyav007@gmail.com

АННОТАЦИЯ Статья посвящена определению степени травматизации слизистой оболочки носовой полости с турбулентным воздушным потоком. Прохождение воздуха через верхний носовой ход обеспечивает доставку молекул одориантатора в чувствительные области обонятельного анализатора. Изучение характеристик воздушного потока в верхнем носовом проходе позволяет определить границы пристеночного ламинарного воздушного подслоя и изучить назальную аэродинамику на микроуровне. Турбулентный поток способствует чрезмерному высушиванию слизистой оболочки носовой полости, что приводит к ее морфологической перестройке к субтрофическому процессу. Было обнаружено, что толщина ламинарного подслоя составляет около 1 мм, поэтому участок слизистой оболочки подвергается сушке с увеличением турбулентности течения в местах сужения носовой полости (обонятельной щели).

Ключевые слова: воздушный поток; обонятельная щель; ламинарный пограничный слой; слизистая оболочка; носовая полость; турбулентный поток

DETERMINATION OF MICROCHARACTERISTICS OF AIR FLOW IN THE NASAL CAVITY DURING BREATHING

Ya. NOSOVA^{1*}, O. AVRUNIN², H. I. FAROUK³

¹ Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE

² Professor of Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE

³ преподаватель, медицинский колледж ИНАЙЯ, Эль-Рияд, Саудовская Аравия

ABSTRACT The aim of the work is to determine the degree of traumatization of the mucous membrane of the nasal cavity by turbulent air flow. It should be noted that it is especially important to determine in the narrowing of the nasal cavity (olfactory gap), where the mucous membrane is subjected to drying with increasing turbulence of the air flow. Achieving this goal will increase the effectiveness of diagnosis and treatment of respiratory and olfactory disorders and will help to identify the pathogenesis of chronic rinological diseases. An important characteristic of nasal breathing is the distribution of air flow rates along the sections of the nasal cavity. When analyzing the existing approaches, it was determined that the main method of studying the aerodynamics of the nasal cavity is rhinomanometry. However, there is not always a clear correlation between anatomical and functional indicators, as well as subjective feelings of the patient and rhinomanometric data. The passage of air through the upper nasal passage ensures the delivery of odorivector molecules to sensitive areas of the olfactory analyzer. The study of the characteristics of the air flow in the upper nasal passage allows us to determine the boundaries of the near-wall laminar air sublayer and to study nasal aerodynamics at the micro level. Turbulent flow contributes to the excessive drying of the mucous membrane of the nasal cavity, leading to its morphological rearrangement towards the subatrophic process. It was found out that the thickness of the laminar layer is of the order of 1 mm, therefore the protuberances of the mucosa are subjected to drying with increasing turbulence of the flow at the sites of narrowing of the nasal cavity (olfactory gap). The prospect of work is the study of the characteristics of the boundary layer in typical pathologies in various respiratory regimes, which will improve the efficiency of diagnosis and treatment of respiratory and olfactory disorders and will help to identify the pathogenesis of chronic rinological diseases.

Keywords: air flow; olfactory cleft; laminar air sublayer; nasal cavity; mucous membrane; turbulent flow

Введение

Исследование обонятельного анализатора не только позволяет выявлять на ранних стадиях различные заболевания, но являться инструментом для оценки эффективности ринохирургического вмешательства, также полноценное восприятие запахов влияет на качество жизни человека. При

нарушениях обоняния становится невозможным выполнение пахучими веществами сигнальных функций: пищевой, половой, охранной, ориентировочной [1-3]. При этом значительно снижается качество жизни, увеличивается уровень риска при использовании бытовых газовых приборов.

Для некоторых авторов обонятельная щель соответствует обонятельной области, покрытой

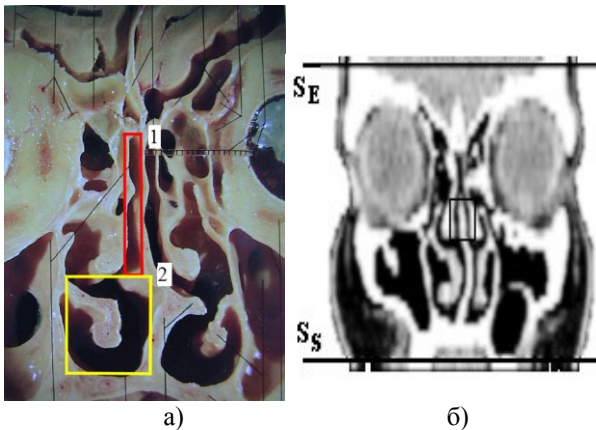
обонятельной слизистой оболочкой, с крибриформной пластинкой и 1 см² с каждой стороны, на боковой стенке носа и на перегородке.

Для большинства авторов обонятельная щель определяется в соответствии с физиологическим подходом с учетом воздушного потока. Кроме того, воздух проходит вдоль нижнего носового хода во время спокойного дыхания [4].

Таким образом, можно различать две физиологически различные зоны в полости носа (рис.1):

- широкая зона, обеспечивающая низкоскоростной поток воздуха: респираторная щель;
- узкая зона, обеспечивающая высокоскоростной поток воздуха в обонятельную область: обонятельная щель.

В этом понятии нижний предел обонятельной щели соответствует нижнему концу средней носовой раковины.



а) б)
Рис. 1 – Обонятельная щель

а) широкая зона, проводящая высокоскоростной воздушный поток: респираторная щель (a2); узкая зона, проводящая низкоскоростной поток воздуха в обонятельную область: обонятельная щель (a1)
б) мультипланарной реконструкции верхних дыхательных путей во фронтальной плоскости (обонятельная щель отмечена прямоугольником) [4]

Актуальными являются задачи связанные с прогнозированием и оценкой функциональных результатов эндоназального оперативного вмешательства, которыми в случае респираторно-обонятельных нарушений, являются условие прохождения воздуха через верхний носовой ход и восстановление обонятельной чувствительности.

Изменение направления основной воздушной струи при носовом дыхании ведет к постоянному раздражению определенных участков слизистой оболочки, (например участок слизистой оболочки полости носа, который содержит обонятельные рецепторы, так называемая обонятельная зона) что в последующем приведет к клеточной инфильтрации в этой области и затем к гипертрофии слизистой оболочки.

Цель работы

Целью работы является определение степени травматизации слизистой оболочки полости носа турбулентным воздушным потоком. Следует заметить, что это особенно важно определять в местах сужения носовой полости (обонятельная щель), где слизистая оболочка подвергается высушиванию при увеличении турбуликации воздушного потока. Достижение поставленной цели позволит повысить эффективность диагностики и лечения дыхательно-обонятельных нарушений и будет способствовать выявлению патогенеза хронических ринологических заболеваний.

При анализе существующих подходов было определено, что основным методом исследования аэродинамики полости носа является риноанометрия. Однако не всегда есть четкая корреляция между анатомическими и функциональными показателями, а также субъективными ощущениями пациента и риноанометрическими данными [5-12].

Изложение основного материала

Важной характеристикой носового дыхания является распределение скоростей потока воздуха по сечениям носовой полости.

Для ламинарного режима в сечении с радиусом a получим параболическую зависимость скоростей W от расстояния от центра r .

$$W = 2W_{cp} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right),$$

где W_{cp} – средняя скорость, r – расстояние от центра, a – радиус.

Для турбулентного режима скорость определяется так:

$$U = U_{max} \left(\frac{r}{a} \right)^{0.9\sqrt{\lambda}},$$

U_{max} – максимальная скорость, λ – коэффициент потерь.

С увеличением скорости воздушного потока (при форсированном дыхании – физическая нагрузка, сужение носового хода) толщина ламинарного пограничного слоя будет уменьшаться, слизистая оболочка будет подвергаться воздействию высокоскоростного турбулентного течения. Обонятельная зона узкая, поэтому турбулизация воздушного потока будет способствовать высушиванию слизистой оболочки, и как следствие морфологическая перестройка. Турбулизация воздушного потока будет способствовать высушиванию отдельных областей слизистой оболочки носовой полости, и как следствие

травматизация слизистой с последующей морфологической перестройкой отдельных областей.

Каким бы ни был закон распределения скоростей в сечении турбулентного потока, скорость у стенки равна 0, увеличиваясь к оси потока. Следовательно, должен существовать низкоскоростной слой, толщина которого зависит от Re , а скорость увеличивается от 0 до 90 % скорости ядра потока (рис.2) [5-7].

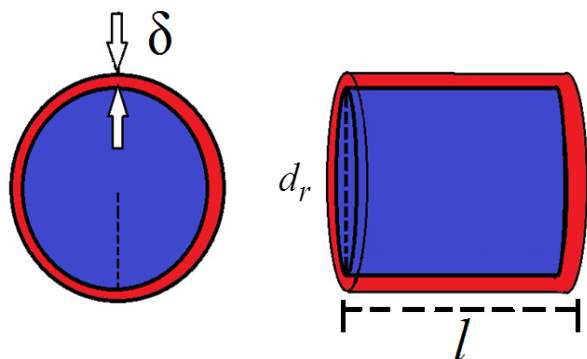


Рис. 2 – Схематическое изображение турбулентного ядра потока (синий цвет) и ламинарного пограничного слоя (красный цвет)

Число Рейнольдса Re , по значению которого определяется режим течения воздуха, вычисляется по формуле:

$$Re = \frac{V \cdot d_r}{\nu}$$

где V – средняя скорость воздуха в носовой полости (задается для разных режимов дыхания – спокойного (0,3 л/с), нормального (1 л/с), форсированного (2 л/с));

ν – коэффициент динамической вязкости что равно для воздуха при нормальных условиях $1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с.; d_r – гидравлический или эквивалентный диаметр, который для каналов сложной формы, которыми и являются носовые ходы, определяется их формулы:

$$d_r = \frac{4S}{P}$$

где S – средняя площадь сечения носового хода; P – периметр сечения носового хода.

Толщина ламинарного пограничного слоя, который выстилает стенки носовой полости можно вычислить как

$$\delta = \frac{32,4 \cdot d_r}{Re^{0,875}} \tag{1}$$

При этом можно видеть, что толщина ламинарного пограничного слоя нелинейно уменьшается с увеличением числа Рейнольдса в соответствии с формулой (1), то есть снижается при увеличении гидравлического диаметра носовой полости и скорости воздушного потока – фактически от режима носового дыхания.

Обсуждение результатов

Так как толщина ламинарного пограничного слоя зависит от гидравлического диаметра носа и числа Рейнольдса, то можно построить соответствующую зависимость (рис.3). Значения типичных гидравлических диаметров равны 4, 5 и 6 миллиметров [8-11].

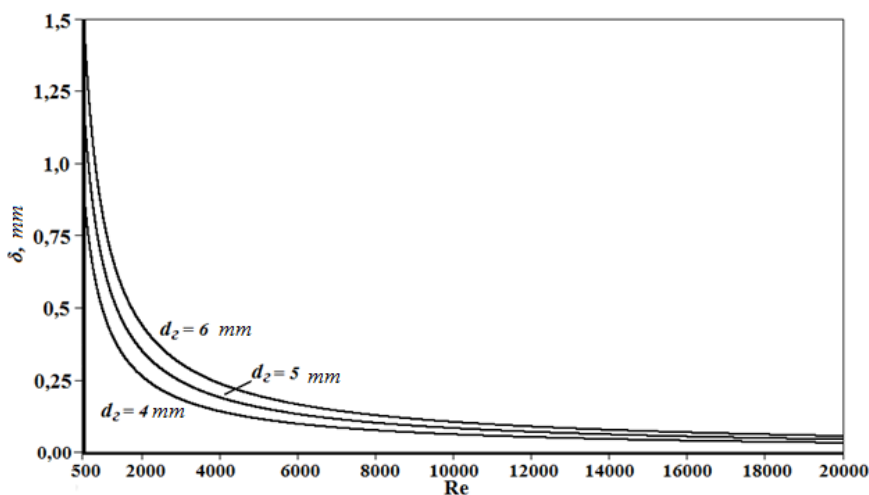


Рис. 3 – График зависимости толщины ламинарного пограничного слоя от числа Рейнольдса при типичных гидравлических диаметрах носовой полости

Определение шероховатости слизистой оболочки осуществляется на основе томографических данных и рассчитывается по формуле:

$$\Delta_i = l_{i+1} - l_i + \left(\frac{I_{i+1} - I_i}{I_{max}} h \right),$$

l_i и l_{i+1} – толщина слизистой оболочки на i -м и $i+1$ – м томографических срезах носовой полости, соответственно;

I_i и I_{i+1} – уровни интенсивности на границе между слизистой оболочкой и воздухом на i -м и $i+1$ фронтальном томографических срезах, соответственно;

I_{max} – максимальный уровень интенсивности на КТ-изображении;

h – пространственное разрешение КТ-изображений.

Пример распределения микронеровностей вдоль заданной линии на участке томографического изображения представлен на рисунке 4.

При сравнении толщины пограничного ламинарного слоя и величины шероховатости можно судить о степени травматизации слизистой оболочки полости носа в обонятельной области.

Существует три состояния:

- $\Delta_i < \delta_i$ – отсутствует негативное влияние (рис.4, зона 1, 4). Выступы слизистой полностью находятся в ламинарном пограничном слое;
- $\Delta_i \approx \delta_i$ – выступы слизистой оболочки находятся вблизи границы ламинарного пограничного слоя воздушного потока (рис.4, зона 2), при дальнейшем повышении интенсивности дыхания или сужении участка носовой полости будет присутствовать негативное влияние потока на слизистую оболочку, которое связано с турбулентным высушиванием;
- $\Delta_i > \delta_i$ – устанавливается негативное влияние, связанное с турбулентным высушиванием слизистой оболочки воздушным потоком (рис.5, зона 3).

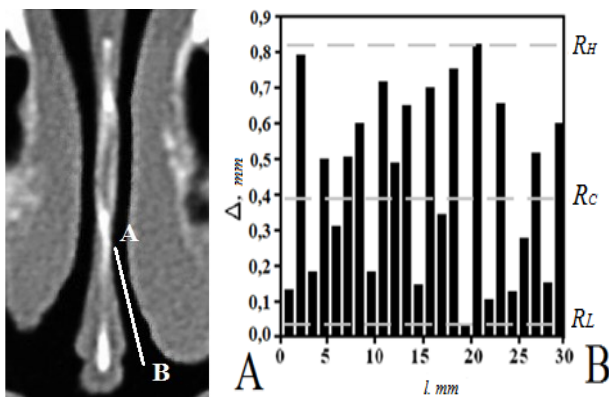


Рис. 4 – Распределение микронеровностей на участке АВ

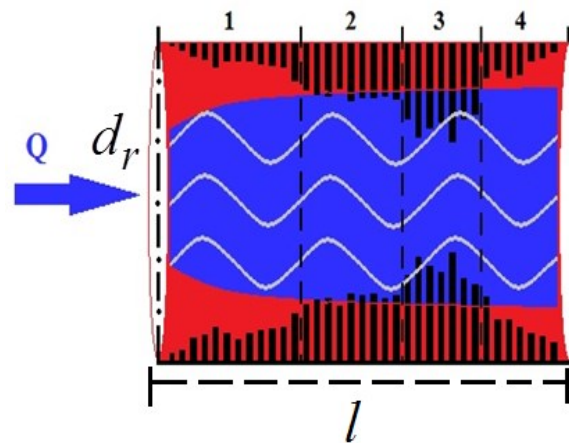


Рис. 5 – Схематическое представление отношения толщины пограничного ламинарного слоя и внутренних микровыступов носовой полости

Таким образом, в настоящем исследовании предпринята попытка объяснить механизм негативного воздействия воздушного потока на слизистую оболочку полости носа. Данный механизм приводит к субатрофическому изменению слизистой оболочки. Это полностью коррелируется с технической аэродинамикой, где выход поверхности трубы за пределы ламинарного слоя приводит к явлению эрозии. Толщина ламинарного пограничного слоя существенно зависит от конфигурации носовой полости и режима дыхания.

Выводы

Прохождение воздуха через верхний носовой ход обеспечивает подачу молекул одоривектора к чувствительным участкам обонятельного анализатора. Исследование характеристик воздушного потока в верхнем носовом ходе позволяет определить границы пристеночного ламинарного подслоя воздуха и изучить назальную аэродинамику на микроуровне как раз в районе верхней носовой ходы – самой узкой области носовой полости. Турбулентный поток способствует чрезмерному высушиванию слизистой оболочки полости носа, приводя к ее морфологической перестройки в сторону субатрофического процесса.

Выяснено что толщина ламинарного слоя составляет порядка 1 мм, поэтому выступы слизистой оболочки подвергаются высушиванию при увеличении турбулизации потока в местах сужения носовой полости (обонятельная щель).

Перспективой работы является изучение характеристик пограничного слоя при типичных патологиях в различных режимах дыхания, что позволит повысить эффективность диагностики и лечения дыхательно-обонятельных нарушений и будет способствовать выявлению патогенеза хронических ринологических заболеваний.

Список литературы

1. **Manesse, C.** Dysosmia-Associated Changes in Eating Behavior / **C. Manesse, C. Ferdenzi, M. Sabri, et al.** // *Chem. Percept.* – 2017. – 10: 104. – doi:10.1007/s12078-017-9237-3.
2. **Nosova, Ya.** Biotechnical system for integrated olfactometry diagnostics / **Ya. V. Nosova, O. G. Avrunin, V.V. Semenets** // *Innovative technologies and scientific solutions for industries.* – 2017. – No. 1 (1). – P.6 4 – 68. – doi:10.30837/2522-9818.2017.1.064.
3. **Boesveldt, S.** Gustatory and olfactory dysfunction in older adults: a national probability study / **S. Boesveldt, S. T. Lindau, M. K. McClintock, T. Hummel, J. N. Lundström** // *Rhinology.* – 2011. – 49 (3). – P. 324 – 330. – doi: 10.4193/Rhino10.155.
4. **Henrot, P.** To rediscover the olfactory cleft / **P. Henrot, P. Gallet, B. Grignon, T. Georgel, R. Jankowski** // *European Society of Radiology.* – 2010. – C-1701. – doi:10.1594/ecr2010/C-1701.
5. **Tavakola, M. M.** Deposition fraction of ellipsoidal fibers in a model of human nasal cavity for laminar and turbulent flows / **M. M. Tavakola, E. Ghahramanib, O. Aboualib, M. Yaghoubibc, G. Ahmadid** // *Journal of Aerosol Science.* – 2017. – Volume 113. – P. 52-70. – doi: 10.1016/j.jaerosci.2017.07.008.
6. **Curle, N.** The Laminar Boundary Layer Equations / **N. Curle** // *Courier Dover Publications.* – 2017. – 176 p.
7. **Lee, J. H.** Unsteady flow characteristics through a human nasal airway / **Jong-Hoon Lee, Yang Na, Sung-Kyun Kim, Seung-Kyu Chung** // *Respiratory Physiology & Neurobiology.* – 2010. – Volume 172, Issue 3. – P. 136-146. – doi:10.1016/j.resp.2010.05.010.
8. **Avrunin, O.** Extended of diagnostic capabilities for the Rhinomanometry method / **O. Avrunin, N. Shuslyapina, J. Ivanchenko** // Chapter 5.1 (315-321 p) in Spatial aspects of socio-economic systems' development: the economy, education and health care. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. – *Publishing House WSZiA.* – 2015. – 380 p.
9. **Nosova, Ya.** The use of statistical characteristics of measured signals to increasing the reliability of the rhinomanometric diagnosis / **Ya. Nosova, N. Shushliapina, S. V. Kostishyn, L. G. Koval, Z. Omiotek, et al.** // *Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments.* – 2016. – 100312M. – doi:10.1117/12.2248364.
10. **Ismail, H. F.** The Role of Paranasal Sinuses in the Aerodynamics of the Nasal Cavities / **H. F. Ismail, E. Osman, A. K. AL-Omari, O. G. Avrunin** // *International Journal of Life Science and Medical Research.* – 2012. – Vol. 2, 3. – P. 52-55. – doi:10.5963/LSMR0203004.
11. **Лукьянов, Г. Н.** Моделирование конвективных потоков в каналах нерегулярной формы на примере полости носа и околоносовых пазух человека / **Г. Н. Лукьянов, А. А. Воронин, А. А. Рассадина** // *Журнал технической физики.* – 2017. – том 87, вып. 3. – doi: 10.21883/JTF.2017.03.44256.1919.
12. **Farouk, H.** An attempt of the Determination of Aerodynamic Characteristics of Nasal Airways / **H. Farouk, A. Khaleel, O. Avrunin** // *Advances in Intelligent and Soft. Computing: Image Processing and*

Communications. Challenges 3. – Springer, 2011. – Vol. 102. – S. 311-322.

Bibliography (transliterated)

1. **Manesse, M., Ferdenzi, C., Sabri, M., et al.** Dysosmia-Associated Changes in Eating Behavior. *Chem. Percept.* 2017, **10**: 104, doi:10.1007/s12078-017-9237-3.
2. **Nosova, Ya., Avrunin, O. G., Semenets, V. V.** Biotechnical system for integrated olfactometry diagnostics *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 2017, No. **1** (1), 64 – 68, doi:10.30837/2522-9818.2017.1.064.
3. **Boesveldt, S., Lindau, S. T., McClintock, M. K., Hummel, T., Lundström, J. N.** Gustatory and olfactory dysfunction in older adults: a national probability study. *Rhinology*, 2011, **49** (3), 324 – 330, doi: 10.4193/Rhino10.155.
4. **Henrot, P., Gallet, P., Grignon, B., Georgel, T., Jankowski, R.** To rediscover the olfactory cleft. *European Society of Radiology*, 2010, C-1701, doi:10.1594/ecr2010/C-1701.
5. **Tavakola, M. M., Ghahramanib E., Aboualib, O., Yaghoubibc, M., Ahmadid, G.** Deposition fraction of ellipsoidal fibers in a model of human nasal cavity for laminar and turbulent flows *Journal of Aerosol Science*, 2017, **113**, 52-70, doi: 10.1016/j.jaerosci.2017.07.008.
6. **Curle N.** The Laminar Boundary Layer Equations. *Courier Dover Publications*, 2017, 176.
7. **Lee, J. H., Na, Ya., Kim, S.-K., Chung, S. K.** Unsteady flow characteristics through a human nasal airway. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 2010, **172**, 3, 136-146, doi:10.1016/j.resp.2010.05.010.
8. **Avrunin, O., Shuslyapina, N., Ivanchenko, J.** Extended of diagnostic capabilities for the Rhinomanometry method. Chapter 5.1 (315-321 p) in Spatial aspects of socio-economic systems' development: the economy, education and health care. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. *Publishing House WSZiA*, 2015, 380.
9. **Nosova, Ya. Shushliapina, N., Kostishyn, S. V., Koval, L. G., Omiotek, Z., et al.** The use of statistical characteristics of measured signals to increasing the reliability of the rhinomanometric diagnosis. *Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2016, 100312M, doi:10.1117/12.2248364.
10. **Ismail, H. F., Osman, E., AL-Omari, A. K., Avrunin, O. G.** The Role of Paranasal Sinuses in the Aerodynamics of the Nasal Cavities. *International Journal of Life Science and Medical Research*, 2012, **2**, 3, 52-55, doi:10.5963/LSMR0203004.
11. **Luk'yanov, H. N., Voronin, A. A., Rassadyna, A. A.** Modelyuvannya konvektyvnykh potokiv v kanalakh neregulyarnoyi formy na prykladi porozhnyny nosa i navkolonosovykh pazukh lyudyny. *Zhurnal tekhnichnoyi fizyky*, 2017, **87**, 3, doi: 10.21883/JTF.2017.03.44256.1919.
12. **Farouk, H., Khaleel, A., Avrunin, O.** An attempt of the Determination of Aerodynamic Characteristics of Nasal Airways. *Advances in Intelligent and Soft. Computing: Image Processing and Communications. Challenges 3*, Springer, 2011, **102**, 311-322.

Сведения об авторах (About authors)

Носова Яна Витальевна – аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники; г. Харьков, Украина; e-mail: nyav007@gmail.com.

Yana Nosova – Scientific Degree (Ph. D.), Docent/Professor, Position, Affiliation, Company, City, Ukraine; e-mail: nyav007@gmail.com.

Аврунин Олег Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, г. Харьков, Украина; e-mail: oleh.avrunin@nure.ua.

Oleh Avrunin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair of Biomedical Engineering, Kharkov, Ukraine; e-mail: oleh.avrunin@nure.ua.

Фарук Хушам Исмаил – преподаватель, медицинский колледж ИНАЙЯ, Эль-Рияд, Саудовская Аравия; e-mail: info@inaya.edu.sa.

Husham Farouk Ismail – teacher, medical college INAIA, Riyadh, Saudi Arabia; e-mail: info@inaya.edu.sa.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Носова, Я. В. Определение микрохарактеристик воздушного потока в носовой полости при дыхании / **Я. В. Носова, О. Г. Аврунин, Х. И. Фарук** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 122-127. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.19.

Please cite this article as:

Nosova, Ya., Avrunin, O., Farouk, H. Determination of microcharacteristics of air flow in the nasal cavity during breathing. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 122-127, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.19.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Носова, Я. В. Визначення мікрохарактеристик повітряного потоку в носовій порожнині при диханні / **Я. В. Носова, О. Г. Аврунин, Х. И. Фарук** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 16 (1292). – С. 122-127. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.19.

АНОТАЦІЯ Стаття присвячена визначенню ступеня травматизації слизової оболонки носової порожнини з турбулентним повітряним потоком. Прохід повітря через верхній носовий хід забезпечує доставку молекул одоривертора в чутливі області нюхового аналізатора. Вивчення характеристик повітряного потоку в верхньому носовому проході дозволяє визначити межі пристінкового ламінарного повітряного підслою та вивчити назальну аеродинаміку на мікрорівні. Турбулентний потік сприяє надмірному висушуванню слизової оболонки носової порожнини, що призводить до її морфологічної перебудови до субтрофного процесу. Було виявлено, що товщина ламінарного підслою становить близько 1 мм, тому прошарок слизової оболонки піддається сушці із збільшенням турбулентності течії в місцях звуження носової порожнини (нюхової щілини).

Ключові слова: повітряний потік; нюхова щілина; ламінарний пристінковий шар; слизова оболонка; носова порожнина; турбулентний потік

Поступила (received) 02.05.2018

УДК 504: 004.6

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.20

ОНТОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ В Е–ОСВІТІ

Ю. Л. ТИХОНОВ^{*1}, В. А. ЛАХНО²¹кафедра ІТС, ЛНУ ім. Тараса Шевченка, Старобільськ, УКРАЇНА²кафедра організації комплексного захисту інформації, Європейський університет, Київ, УКРАЇНА

*e-mail: t2003i17@meta.ua

АНОТАЦІЯ У даній роботі пропонується онтологічний підхід до перевірки засвоєння знань, виявлення погано засвоєваних розділів навчального курсу. Це дозволяє на основі комп'ютерної онтології побудувати систему автоматизованого синтезу тестових завдань. Онтологічна БЗ забезпечує єдність міждисциплінарного простору знань. Підхід відрізняється застосуванням КО, що забезпечують систематизацію концептів, врахування їх взаємозв'язку. КО використовуються при автоматизації побудови тестів, що передбачають врахування відхилень сформованої в учня структури понять від реального онтографу ЕК, його структурування та розбивку на гілки, що відповідають певним фрагментам ЕК. Використовується ієрархічність онтографу (як сформованого в учня, так і реального).

Ключові слова: Онтологічний підхід; комп'ютерна онтологія; онтограф; побудова тестів; ієрархічність; база знань.

ONTOLOGICAL APPROACH TO KNOWLEDGE CONTROL IN E- LEARNING

U. TIKHONOV¹, V. LAKHNO²¹Department of ITS, LNU. Taras Shevchenko, Starobelsk, UKRAINE²Department of Integrated Information Securit, European University, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT There are a number of methods that determine the content, form, structure and procedure of the test. However, there is no toolkit based on a systematized and structured description of the objects of study. One of the successful approaches is ontological, where the knowledge of the subject domain is represented in a formalized form. The ontological aspects of the description include a range of issues ranging from structuring information to the linkages of objects. Among the features of the ontological description, we note the presence of levels of concepts and explicit indication of categories of higher order. In this paper we propose an ontological approach to the verification of knowledge acquisition, the discovery of poorly digestible sections of the training course. Computer ontology provides efficient machine processing of knowledge It allows to build on the basis of computer ontology a system of automated synthesis of test tasks. In contrast to the usual subjective approach, the ontological approach involves strict structuring of terms and concepts. Ontological knowledge base provides the unity of the interdisciplinary knowledge space. The approach is different in applying of computer ontologies, which ensures the systematization of concepts, taking into account their interconnection. Computer ontologies are used for automation of construction of tests, which involve taking into account the deviations of the pupil's structure of concepts from the real e-course ontograph, its structuring and division into branches corresponding to certain fragments of e-course. Used hierarchy ontograph (both formed in the student, and real). The algorithm of automated synthesis of tests is presented, which implements the above-mentioned ontological approach.

Key words: Ontological approach; computer ontology; ontographer; construction of tests; hierarchy; knowledge base.

Вступ

Перевірка знань для кожного ВНЗ є яка суб'єктивізована. Перевірка та оцінка рівня засвоєння навчального матеріалу учнями є складною процедурою, невід'ємною складовою частиною процесу навчання, що включає [1]:

- навчальну функцію;
- діагностичну функцію;
- прогностичну функцію;
- розвиваючу функцію;
- орієнтуючу функцію;
- виховуючу функцію.

Всі ці функції, зрозуміло, повинні бути присутніми і при контролі знань в е-освіті.

Оцінка виступає як результат, формальний вираз процесу оцінювання.

В е-освіті оцінка може бути отримана в автоматизованому або ж в автоматичному режимі. Суб'єктивний фактор буде залежати або від викладача, або від автора алгоритму розрахунку оцінки в автоматичному режимі, наприклад, у тесті.

Оцінка - це не просто показник відповідності його компетенції державним освітнім стандартам вищої освіти, а можливість коректувати весь навчально-виховний процес, що для е-освіти означає можливість удосконалювання ЕК [2].

Існуючі автоматизовані системи контролю знань діляться на дві категорії [3]:

- враховуючі тільки правильні відповіді;
- враховуючі правильні відповіді та частково правильні відповіді.

Для реалізації модуля аналізу питань використовується:

- база знань (БЗ).

– математична модель.

У модулях використовується поняття відстані між правильною відповіддю і відповіддю, наданою студентом [4, 5].

У підході, названому «застосування семантичної мережі» предметна галузь об'єкта, який тестується, представлена онтологією. Використовується апарат кольорових «мереж Петрі». Недоліком такого підходу є значна трудомісткість їхньої побудови та, як наслідок, реалізації [6].

В [7] запропонована поняттєво-тезова модель подання знань, на базі якої можна розробити систему автоматизованої генерації тестів для контролю знань. Разом з тим у ній відсутнє згадування про повноту тесту.

Деякі автори пропонують структурно-онтологічний підхід до контролю знань. Навчальний курс (V) представляється сукупністю $V = \langle P, Z, Q, Mo, Me, K, A \rangle$, де P – сукупність проблем; Z – безліч цілей; Q – сукупність завдань; Mo, Me – сукупність моделей і методів відповідно; A – сукупність засобів; K – сукупність критеріїв для оцінки елементів сукупностей Mo, Me, A [8]. Реалізація такої оцінки знань трудомістка й суб'єктивізована.

Відома методика «еталонної онтології», підготовленої експертом, або співтовариством студентів [9, 10]. Реалізація трудомістка, крім того, «еталонна онтологія» суб'єктивізована. Щоб отримати найкращі результати відповідності державним освітнім стандартам вищої освіти, планування навчального процесу потребує підходити максимально виважено до всіх питань е-освіти [11].

Викладене підкреслює складність проблеми якості ЕК, значну трудомісткість реалізації комп'ютерної оцінки знань та її суб'єктивний характер. Необхідна методологія оцінки знань учня в е-освіті і якості електронних курсів.

При онтологічному підході суб'єктивність цього показника зменшується, що потенційно дозволяє якісно поліпшити використання е-освіти для професійно-особистісного розвитку, що є однією з вимог розвитку професіонала як суб'єкта глобального інформаційного процесу.

Мета роботи

Розглянути підходи на основі онтології до формалізації опису процесу тестування та автоматизованої системи контролю знань.

Основна частина

1. Онтологізований опис .

Для автоматизованого складання ТЗ з дисциплін, що характеризуються слабкою формалізованістю знань, видається перспективним онтологічний підхід, що дозволяє структурувати предметну область [12], а також зберігати і обробляти знання в машинно-читається поданні. При

онтологічному підході к синтезу ТЗ реалізується: 1) візуальна розмітка навчального матеріалу з метою виділення базових елементів і відносин між ними; 2) збереження виділених елементів і відносин у БЗ; 3) використання шаблонів ТЗ; 4) генерація дистракторів ТЗ (неправильних, але правдоподібних варіантів відповіді) ; 5) контроль цілісності, зв'язності і повноти знань.

У порівнянні з існуючими способами формування БЗ для синтезу ТЗ [13], онтологічний підхід має наступні переваги: 1) спрощення процедури формалізації вихідного навчального матеріалу; 2) онтологія не вимагає доопрацювання системи синтезу ТЗ під кожну конкретну дисципліну.

У онтологічних БЗ враховуються такі вимоги [14-18]:

1. Комп'ютерна онтологія забезпечує ефективну машинну обробку знань

2. На відміну від звичайного суб'єктивного підходу до розробки БЗ, онтологічний підхід передбачає строгу структурування термінів і понять.

3. Необхідне використання засобів підтримки автоматизованої побудови онтології ПдГ.

Для автоматизації розробки подібних тестів зручніше використовувати онтограф з нотацією (рис.1).

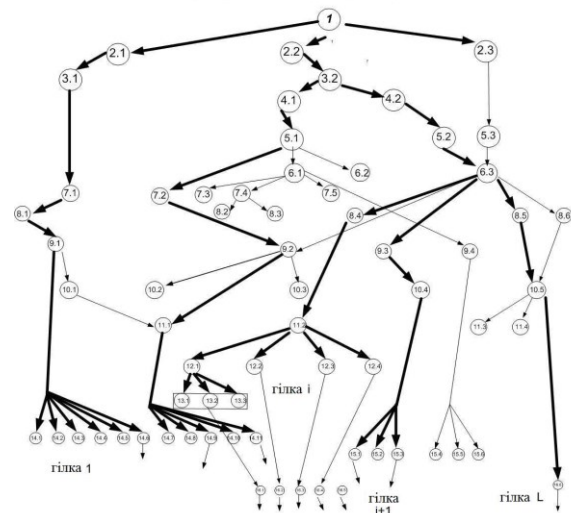


Рис. 1 – Фрагмент онтографу ПдГ БД із виділеними фрагментами гілок, обраних для ЕК

На рис. 1 цифрами в колі позначені концепти ПдГ. Імена концептів наведені в таблиці. Зображений фрагмент онтографу ПдГ БД і виділені фрагменти його гілок, обраних для ПдД. На рисунку наведені не всі концепти ПдГ БД. У нотації концепту 1-я цифра означає рівень концепту в онтографі, 2-я цифра - номер концепту в рівні.

Таблиця 1 – Нотація концептів для фрагменту ПдД БД

N	Нотація концепту	Концепт	N	Нотація концепту	Концепт
1	1.	Інформатика	37	11.3	SQL у комерційних реалізаціях
2	2.1	Інформаційні технології	38	11.4	Функції й основні можливості
3	2.2	Обчислювальна техніка	39	12.1	Технології Microsoft для BD
4	2.3	Інформаційна система	40	12.2	Інтерфейс прикладного програмування на Java
5	3.1	Технологія БД	41	12.3	Навігаційний доступ до БД у C++
6	3.2	Засоби ОТ	42	12.4	Інтерфейс із прикладними програмування Delphi
7	4.1	HardWare	43	13.1	Active Data Objects(ADO)
8	4.2	SoftWare	44	13.2	Remote Data Objects(RDO)
9	5.1	Обчислювальна система (OC)	45	13.3	Data Access Objects(DAO)
10	5.2	Програмний продукт	46	14.1	Домен
11	5.3	Автоматизована на ІС	47	14.2	Тип даних
12	6.1	Апаратні засоби	48	14.3	Кортеж
13	6.2	Програмне забезпечення	49	14.4	Схема БД
14	6.3	Інструментарій	50	14.5	Схема відношення
15	7.1	БД	51	14.6	Відношення
16	7.2	система керування ОТ	52	14.7	Керування буферами
17	7.3	Mainfram	53	14.8	Керування даними в зовнішній пам'яті
18	7.4	Сервера зберігання даних	54	14.9	журналізація
19	7.5	засобу захисту інформації	55	14.10	Підтримка мов БД
20	8.1	Реляційна база даних	56	14.11	Керування транзакціями
21	8.2	HP Oracle Exadata	57	15.1	Проектування з нормалізацією
22	8.3	Sun Ultra Enterprise 450	58	15.2	Entity-Relationship(ER) - діаграми

23	8.4	інтерфейси для БД	59	15.3	Семантичне моделювання даних
24	8.5	Обчислення предикатів	60	15.4	Зберігання відносин
25	8.6	Алгебра логіки	61	15.5	Журнал
26	9.1	Базові поняття БД	62	15.6	Службова інформація
27	9.2	Система керування БД (СКБД)	63	16.1	Стандарт Open Database Connectivity API (ODBC)
28	9.3	Система проектування	64	16.2	Стандарт Java DataBase Connectivity (JDBC)
29	9.4	Структури зовнішньої пам'яті	65	16.3	компонент Ttable
30	10.1	Базисні засоби маніпулювання	66	16.4	Integrated Database Application Programming Interface (IDAPI).
31	10.2	Клієнт-Серверні СКБД	67	16.5	Borland Database Engine (BDE)
32	10.3	Локальні СКБД	68	16.6	Стандарти SQL
33	10.4	Проектування реляційних БД			
34	10.5	Мова SQL			
35	11.1	Функції			
36	11.2	Application Programm Interfase (API)			

Кожна гілка онтографу ЕК визначає цілісну тему. Наприклад, ланцюжок - 1 (Інформатика),2.1 (Інформаційні технології), 3.1 (Технологія БД), 7.1 (БД), 8.1 (Реляційна база даних), 14.1 (Домен), 14.2 (Тип даних), 14.3 (Кортеж)...ставиться до теми «Основні поняття БД». Ланцюжок - 1(Інформатика), 2.2 (Обчислювальна техніка), 3.2 (Засоби ОТ), 4.1 (HardWare), 5.1 (Обчислювальна система), 7.2 (Домен), 9.2 (СКБД), 11.1 (Функції), 14.7 (Керування буферами)...ставиться до теми «Основні функції СКБД».

В учня створюється своє бачення ПдД із набором понять і зв'язками між ними. При тестовій перевірці відхилень сформованого в учня онтографу предметної дисципліни від реального досить переконатися в знанні змісту поняття і його зв'язків. КО містить інтерпретацію понять та їх зв'язки.

Використовується ієрархічність онтографу (як сформованого в учня, так і реального). Очевидно, що чим більше номер рівня в онтографі до якого відноситься засвоєний концепт, тим глибше учень знає ПдД.

Алгоритм автоматизованого синтезу тестів, що реалізує вищевказані функції представлений на рис. 2.

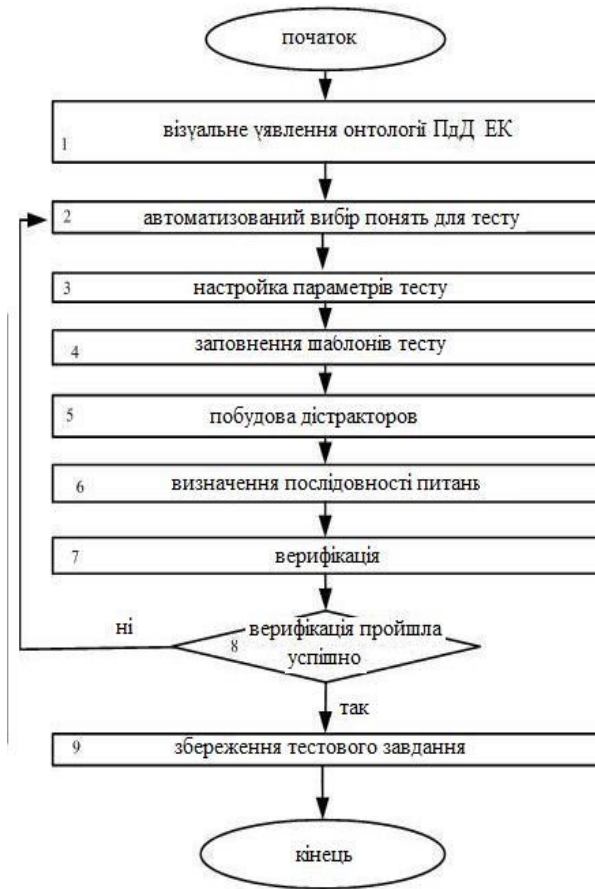


Рис. 2 – Укрупнена блок-схема алгоритму автоматизованого синтезу тестів

У блоці 1 - виведення на екран у вигляді онтографу візуального подання онтології ПдД ЕК.

У блоці 2 - автоматизований візуальний вибір концептів ЕК як базових елементів тесту для ЕК з використанням онтографу (аналогічно вибору концептів для ЕК у модулі БДІ). Відзначається гілка онтографу ЕК 1, до якої відноситься концепт.

У блоці 3 - настроювання параметрів тесту (кількість питань, форми відповідей, розподіл обраних концептів по номерах 1 гілок онтографу ЕК і т.д.).

У блоці 4 - автоматизоване заповнення шаблонів тестів з використанням описів концептів онтології ПдД, обраних для тесту.

У блоці 5 - автоматизоване складання з використанням описів онтології неправильних, але правдоподібних варіантів відповіді тесту з тієї ж предметної області що і правильна відповідь.

У блоці 6 - завдання логіки послідовності питань тестів, оцінювання та збереження балів для гілки, до якої ставиться концепт даного питання.

У блоці 7, 8 - ручна верифікація та напрямок (при необхідності) тесту на коректування.

Висновки

Онтологічна БЗ забезпечує єдність міждисциплінарного простору знань. Підхід охоплює як процес навчання, так і перевірку засвоєння знань, виявлення погано засвоєваних розділів навчального курсу. КО використовуються при автоматизації побудови тестів, що передбачають врахування відхилень сформованої в учня структури понять від реального онтографу ЕК, його структуризацію та розбивку на гілки, що відповідають певним фрагментам ЕК. Використовується ієрархічність онтографу (як сформованого в учня, так і реального). Перед вивченням концепту учень повинен освоїти всі концепти даної гілки на попередніх рівнях КО. Чим більше номер рівня в онтографі, до якого відноситься засвоєний концепт, тим глибше учень знає ПдД

Список літератури

1. **Бордовская, Н. В.** Педагогика / **Н. В. Бордовская, А. А. Реан.** – Санкт-Петербург: Питер, 2000. – 304 с.
2. **Полат, Е. С.** Метод проектов: типология и структура / **Е. С. Полат** // *Лицейское и гимназическое образование.* – 2002. – №9. – С. 10–15.
3. **Ковтун, С. А.** О концепции создания интеллектуальных тестирующих систем / **С. А. Ковтун, С. Н. Капитан, О. О. Савельев** // *Искусственный интеллект.* – 2009. – № 4. – С. 360 – 364.
4. **Антонов, Ю. С.** Методика аналізу тестових завдань на основі отриманих результатів тестування / **Ю. С. Антонов, О. М. Космінська** // *Інформаційні технології і засоби навчання.* – 2009. – № 4. URL: <http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/ITZN/em12/emg.html>.
5. **Антонов, Ю. С.** Деякі аспекти створення комп'ютерних систем тестування та використання нової методики аналізу результатів / **Ю. С. Антонов** // *Матеріали IV Всеукр. наук.-практ. конф. „Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці”.* – Луганськ: Phoenix, 2010. – С. 153 – 155.
6. **Копылова, Е. В.** Тестирование объектов методом адаптивного обхода онтологии. / **Е. В. Копылова** // *Сб. трудов НГТУ.* – 2005. – №4. – С. 17–23.
7. **Титенко, С. В.** Семантична модель знань для цілей організації контролю знань у навчальній системі / **С. В. Титенко, О. О. Гагарін** // *Сб. трудов VI Межд. конф. „Интеллектуальный анализ информации”.* – 2006. – Киев. – 2006. – С. 298–307.
8. **Нетавская, Е. Т.** Структурно-онтологический подход к оптимизации процессов контроля знаний / **Е. Т. Нетавская** // *Штучный интеллект.* – 2006. – №4. – С. 541–547.
9. **Amagasa, M.** Structural modeling in a class of systems using fuzzy sets theory / **M. Amagasa, E. Tazaki** // *Fuzzy Sets and Systems.* – 1979. – №2. – С. 87–103.
10. **Морозова, О. И.** Метод нечеткого структурного анализа онтологий / **О. И. Морозова, А. Ю. Соколов, В. М. Хуссейн** // *Системы обработки информации: сб. науч. пр.* – X. – 2010. – (Вып. 5 (86)). – С. 104–107.
11. **Lisi, F. A.** Nonmonotonic onto-relational learning / **F. A. Lisi, F. Esposito** // *Chapter Inductive Logic Programming.* – 2009. – Vol. 5989. – p. 88–95. – doi: 10.1007/978-3-540-85928-4_15.

12. **Давыдова, Н. А.** Автоматизированный синтез тестовых заданий для систем педагогического контроля знаний / **Н. А. Давыдова, И. Д. Рудинский** // *Информатизация образования и науки.* – 2013. – № 1 (17). – С. 77-90.
13. **Титенко, С. В.** Практична реалізація технології автоматизації тестування на основі понятійно-тезисної моделі. Образование и виртуальность / **С. В. Титенко, О. О. Гагарін** // *Сборник научных трудов 10-й Международной конференции Украинской ассоциации дистанционного образования.* - Харьков-Ялта: УАДО. – 2006. – С. 401-412.
14. **Ondřej, Šváb-Zamazal.** Detection and Transformation of Ontology Patterns / **Ondřej Šváb-Zamazal, Vojtěch Svátek, François Scharffe, Jérôme David** // *Chapter Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management.* – 2011. – Vol. 128. – p. 210–223. – doi:10.1007/978-3-642-19032-2_16.
15. **Moon, B. M.** Applied Concept mapping: Capturing, analyzing, and organizing knowledge / **B. M. Moon, R. R. Hoffman, J. D. Novak, J. J. Cañas** // New York.: CRC Press. – 2011. URL: http://planet.uwc.ac.za/nisl/ESS/ESS132/documents/ESS132_concept_map.pdf.
16. **Starr, R. R.** Concept maps as the first step in an ontology construction method / **R. R. Starr, J. M. P. Oliveira** // *Information Systems.* – 2013. – vol. 38. – № 5.
17. **Nuntawong, C.** A Semantic Similarity Assessment Tool for Computer Science Subjects Using Extended Wu & Palmer's Algorithm and Ontology / **C. Nuntawong, S.N. Chakkrit, M. Brückner** // *Information Science and Applications. LNEE.* – 2015. – 339. – P. 989-996.
18. **Палагин, А. В.** Онтологические методы и средства обработки предметных знаний / **А. В. Палагин, С. Л. Кривый, Н. Г. Петренко.** – Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2012. – 323 с.
19. **informatsiynyykh tekhnolohiy v nauksi, osviti ta ekonomitsi**", Luhansk : Phoenix, 2010, 153-155.
6. **Kopylova, E. V.** Testyrovanye obektov metodom adaptivnoho obkhoda ontolohyy. *Sb. trudov NHTU*, 2005, 4, 17–23.
7. **Tytenko, S. V., Haharin, O. O.** Semantychna model znan dlya tsiley orhanizatsiyi kontrolyu znan i navchalniy systemi *Sb. trudov VI Mezhd. konf. "Yntellektualnyy analiz ynformatsyy"*, Kyev, 2006, 298–307.
8. **Netavskaya, E. T.** Strukturno-ontolohycheskyy podkhod k optymyzatsyy protsessov kontrolya znanyy. *Shtuchniy yntellekt*, 2006, 4, 541–547.
9. **Amagasa, M., Tazaki, E.** Structural modeling in a class of systems using fuzzy sets theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 1979, 2, 87–103.
10. **Morozova, O. Y., Sokolov, A. Yu., Khussey, V. M.** Metod nechetkoho strukturnoho analiza ontolohyy *Systemy obrobky informatsiyi: zb. nauk. pr.*, 2010, 5 (86), 104–107.
11. **Lisi, F. A., Esposito, F.** Nonmonotonic onto-relational learning. *Chapter Inductive Logic Programming*, 2009, 5989, 88–95, doi: 10.1007/978-3-540-85928-4_15.
12. **Davydova, N. A., Rudinskiy, I. D.** Avtomatizirovannyi sintez testovykh zadaniy dlya sistem pedagogicheskogo kontrolya znaniy. *Informatsiya obrazovaniya i nauki*, 2013, 1 (17), 77-90.
13. **Titenko, S. V., Gagarin, O. O.** Praktichna realizatsiya tekhnolohiy avtomatizatsiyi testuvannya na osnovi ponyatiynno-tezysnoy modeli. *Obrazovaniye i virtual'nost'*. *Sbornik nauchnykh trudov 10-y Mezhdunarodnoy konferentsii Ukrainskoy assotsiatsii distantsionnogo obrazovaniya.* Khar'kov-Yalta: UADO, 2006, 401-412.
14. **Ondřej, Šváb-Zamazal, Vojtěch, Svátek, François, Scharffe, Jérôme, David.** Detection and Transformation of Ontology Patterns. *Chapter Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*, 2011, 128, 210-223, doi:10.1007/978-3-642-19032-2_16.
15. **Moon, B. M., Hoffman, R. R., Novak, J. D., Cañas, J. J.** Applied Concept mapping: Capturing, analyzing, and organizing knowledge. New York.: CRC Press, 2011. Available at: http://planet.uwc.ac.za/nisl/ESS/ESS132/documents/ESS132_concept_map.pdf.
16. **Starr, R. R., Oliveira, M. P.** Concept maps as the first step in an ontology construction method. *Information Systems*, 2013, 38, № 5.
17. **Nuntawong, C. A., Chakkrit, S. N., Brückner, M.** Semantic Similarity Assessment Tool for Computer Science Subjects Using Extended Wu & Palmer's Algorithm and Ontology. *Information Science and Applications. LNEE*, 2015, 339, 989-996.
18. **Palagin, A. V., Krivyy, S. L., Petrenko, N. G.** Ontologicheskiye metody i sredstva obrabotki predmetnykh znaniy. *Lugansk: izd-vo VNU im. V. Dalya*, 2012, 323.

Bibliography (transliterated)

1. **Bordovskaya, N. V., Rean, A. A.** Pedahohyka. Sankt-Peterburh: Pyter, 2000, 304.
2. **Polat, E. S.** Metod proektov: typolohyya i struktura. *Lytseyskoe y gymnazycheskoe obrazovanye*, 2002, 9, 10–15.
3. **Kovtun, S. A., Kapytan, C. N., Savelev, O. O.** O kontseptsyyi sozdannyya intelektualnykh testyruyushchykh system. *Yskusstvennyy yntellekt*, 2009, 4, 360 – 364.
4. **Antonov, Yu. S., Kosminska, O. M.** Metodyka analizu testovykh zavdan na osnovi otrymanykh rezul'tativ testuvannya. *Informatsiyni tekhnolohiyi i zasoby navchannya*, 2009, 4. Available at: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/ITZN/em12/emg.html>.
5. **Antonov, Yu. S.** Deyaki aspekty stvorennyya kompyuternykh system testuvannya ta vykorystannya novoyi metodyky analizu rezul'tativ. *Materialy IV Vseukr. nauk.-prakt. konf. „Suchasni tendentsiyi rozvytku*

Відомості про авторів (About authors)

Тихонов Юрій Леонітович – кандидат технічних наук, PhD, доцент, ЛНУ ім. Тараса Шевченка, доцент кафедри ІТС, Старобільськ, Україна; e-mail: t2003i17@meta.ua.

Yuriy Tikhonov – Ph. D., Docent, LNU them. Taras Shevchenko, Associate Professor, ITS Department, Starobelsk, Ukraine; e-mail: t2003i17@meta.ua.

Ляхно Валерій Анатолійович – доктор технічних наук, Європейський університет, професор, завідувач кафедри організації комплексного захисту інформації, м. Київ, Україна; E-mail: lva964@gmail.com.

Valeriy Lakhno – Doctor of Technical Sciences, European University, professor, Head of the Department of Integrated Information Securit, Kyiv, Ukraine, E-mail: lva964@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Тихонов, Ю. Л. Онтологічний підхід до контролю знань в е-освіті / **Ю. Л. Тихонов, В. А. Лахно** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 16 (1292). – С. 128-133. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.20.

Please cite this article as:

Tikhonov, Y., Lakhno, V. Ontological approach to knowledge control in e-learning. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 128-133, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.20.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Тихонов, Ю. Л. Онтологический подход к контролю знаний в электронном обучении / **Ю. Л. Тихонов, В. А. Лахно** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 128-133. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.20.

АННОТАЦИЯ В данной работе предлагается онтологический подход к проверке усвоения знаний, выявления плохо усваиваемых разделов учебного курса. Это позволяет на основе компьютерной онтологии построить систему автоматизированного синтеза тестовых заданий. Онтологическая БЗ обеспечивает единство междисциплинарного пространства знаний. Подход отличается применением КО, обеспечивающих систематизацию концептов, учета их взаимосвязи. КО используются при автоматизации построения тестов, предусматривающие учета отклонений сложившейся у ученика структуры понятий от реального онтографа ЭК, его структурирование и разбику на ветви, соответствующие определенным фрагментам ЭК. Используется иерархичность онтографу (как сложившегося у ученика, так и реального).

Ключевые слова: онтологический подход; компьютерная онтология; онтограф; построение тестов; иерархичность; база знаний.

Поступила (received) 11.05.2018

УДК 66.01.011

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.21

СУЧАСНІ ВИМОГИ ДО ТЕПЛОМАСООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ. КОНСТРУКТИВНА ЕВОЛЮЦІЯ ВИХРОВИХ РОЗПИЛЮВАЛЬНИХ АПАРАТІВ

А. О. ГРУБНИК^{1*}

¹каф. ХТПЕ, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*email: alina.hrubnik@gmail.com

АНОТАЦІЯ У роботі розглядаються сучасні вимоги створення нової техніки. Показані напрямки розвитку науки і техніки з проблеми тепло- і масопереносу. У зв'язку з високою вартістю енергоресурсів і дефіцитом водних ресурсів сучасні тепломасообмінні апарати повинні бути енергоємними, високоефективними і інтенсивними, бути універсальними, простими конструктивно і забезпечувати зручність монтажу і експлуатації. Запропоновано нову багатоступеневу конструкцію вихрового апарату.

Ключові слова: тепломасообмін; вихрові апарати; багатоступінчасті апарати; розпилювання рідини; промислові газові викиди; очищення газів

MODERN REQUIREMENTS FOR HEAT-EXCHANGE EQUIPMENT. CONSTRUCTIVE EVOLUTION OF VORTEX SPRAYING DEVICES

A. HRUBNIK^{1*}

¹ Department of Chemical techniques and industrial ecology, NTU «KhPI», Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The paper deals with the modern requirements of a new technology. Indicate the direction of the development of science and technology on the problem of heat and mass transfer. Due to the sharp rise in price of energy in the world and a deficit of water resources modern heat and mass transfer devices shall meet the requirements such as: energy-intensive, highly efficient and intensive, to be universal, simple to constructively and to provide convenience of installation and operation. The possibility of combining and intensifying physical and chemical processes in gas-liquid systems due to the creation of a developed turbulent phase movement in one apparatus allows us to achieve high efficiency of mass transfer and gas purification. Despite the fact that the construction of hollow vortex spray devices have been developed for a long time, they did not find until recently widespread use for a number of reasons, among which should be noted as deficient researched description of their work and the lack of scientifically grounded methods of calculation and disinterest of enterprises in qualitative clearing of industrial gas emissions.

Based on the experience of use industrial vortex equipment, the main requirements for the design of new heat and power equipment have been developed and the possibility of creating such equipment, which meets the proposed criteria, is shown. Based on the above it can be argued that further research aimed at a thorough study of issues related to the problem of complex processing technology and industrial waste gases and the choice and design of highly vortex heat and mass transfer equipment is relevant and make it possible to reduce the environmental impact. A new multistage design of the vortex apparatus is proposed.

Key words: heat and mass transfer; vortex devices; multistage apparatuses; industrial gas emissions; purification

Вступ

Масообмінні процеси і апарати широко використовуються на підприємствах хімічної, нафтопереробної, нафтохімічної газопереробної, металургійної, харчової, хіміко-фармацевтичної та енергетичної галузей, а також у виробництвах агропромислового комплексу, будівельних матеріалів, в системах пило-газоуловлювання. Однією з основних причин їх простоявання і нерентабельної роботи є те, що використовувана технологія і техніка мають високі матеріальні і енергетичні витрати.

Мета роботи

При створенні нової техніки і технології необхідно виходити з перспективних напрямків наукових і проектно-конструкторських робіт в конкретній галузі знання з урахуванням реальних умов і вимог до експлуатації і виготовлення розробленого обладнання. Причому при розробці конструкції нового обладнання необхідно виходити з оцінки позитивних і негативних ознак відомих

аналогів. Тому метою роботи є критичний аналіз конструкцій діючих розпилювально-вихрових апаратів, та виявлення перспективної конструкції для проведення масообмінних процесів у галузі пилоочистки.

Викладення основного матеріалу

У найближчі роки розвиток науки і техніки в області тепло- і масопереносу буде визначатися наступними напрямками:

– створення методів, процесів і апаратів, що забезпечують отримання кінцевих продуктів високої якості, що відповідають наперед заданим технологічним вимогам;

– створення методів і процесів обробки капілярно-пористих матеріалів, а також методів сушіння різних матеріалів з мінімальними енергетичними витратами – при широкому використанні вторинних енергоресурсів (зокрема утилізації скидного тепла газів, що відходять, та відпрацьованого пара);

– створення високоінтенсивних апаратів малої матеріалоемності, що працюють при екстремальних параметрах, які використовують нові фізичні методи інтенсифікації процесів;

– розробка і реалізація процесів, піддаються комплексної автоматизації і управління, для вивільнення значної кількості обслуговуючого персоналу на промислових підприємствах;

– створення типових апаратів і комплексних установок (в тому числі великої одиничної потужності) з метою збільшення серійності виробництва, переведення на масове виробництво і, в кінцевому рахунку, різкого зростання реальної продуктивності машинобудівних галузей;

– розробка суміщених, комбінованих, комплексних процесів і апаратів з метою скорочення технологічної лінії, зменшення витрат на їх реалізацію;

– створення методів, розробка процесів і апаратів, які сприяють вирішенню проблем екології, а також поліпшенню умов праці.

Сучасні вимоги до тепломасообмінних апаратів змінювалися, тому що зазнають змін концепція зі створення хімічної, нафтохімічної харчового, енергетичного обладнання і колон нафтогазопереробних підприємств. Це пов'язано з різким подорожчанням енергоресурсів і з дефіцитом водних ресурсів [1].

Таким чином, сучасні тепломасообмінні апарати повинні відповідати наступним вимогам.

1. Енергоємність. При оцінці цього показника дослідники часто виходять з витрат на гідравлічний опір, що невірно. Наприклад, порожнисті скрубери мають відносно низький опір при низькій інтенсивності тепло- і масопереносу. Тоді як для досягнення необхідної ефективності, наприклад, ступеня очищення газів, буде потрібно ставити послідовно кілька таких апаратів.

При цьому досягнення необхідної інтенсивності сумнівні. У той же час збільшиться сумарна енергопотреб, а капітальні витрати (вартість виготовлення і монтажу, матеріаломісткість) зростуть на порядок.

Тому при оцінці енергоємності процесів і апаратів треба виходити зі співвідношення енерговитрат до інтенсивності процесу. Цей підхід реалізується як співвідношення числа Ейлера до числа Нуссельта або Шервуда.

2. Висока ефективність. Безумовно, що цей показник є найбільш важливим. Він є первинним при створенні екологічних процесів і технологій отримання чистих і особливо чистих речовин економічно раціональним способом. При цьому вимога досягнення більш високої ефективності за всяку ціну не завжди є доцільною.

3. Висока інтенсивність. Виконання цієї вимоги призводить до зниження габаритів і кількості створюваних апаратів, тобто до зниження

матеріаломісткості. Однак при цьому можуть зрости енерговитрати і складність конструкції.

4. Універсальність конструкції тепло-масообмінних апаратів. Це сучасна вимога, що дозволяє об'єднати проведення декількох процесів в одному апараті. Поєднання або сполучення різних дій сприятиме зменшенню кількості одиниць обладнання до мінімуму. При цьому скоротяться капітальні витрати, і енергоємність. Такий підхід дозволить вирішити багато проблем. Однак наукові основи таких суміщених або пов'язаних процесів ще не створені.

5. Простота конструкції. На перший погляд це завдання в сучасних умовах розвитку технології машинобудування і монтажу не повинне турбувати. Однак, відсутність в окремих галузях промисловості спеціалізованих машинобудівних підприємств, проектних і науково-дослідних інститутів вже ускладнює вирішення цього завдання.

6. Простота монтажу, також є важливим фактором, який забезпечується в тому числі і простотою конструкції.

7. Простота експлуатації забезпечується надійною конструкцією апаратури.

Найбільш компактними і зручними в експлуатації є вихрові апарати полого типу. Використання принципу рівної проточності газу в таких апаратах дозволяє знизити їх гідравлічний опір при збереженні значення ефективності тепло- і масообмінних процесів.

Сьогодні існують різні підходи до створення та значна кількість таких апаратів. Розглянемо з цих позицій існуючі конструкції вихрових і розпилювальних апаратів.

Основні конструкції масообмінних апаратів з примусовим розпиленням робочої рідини

Апарати з поверхнею контакту, що утворюється в вільному об'ємі, відомі достатньою кількістю масообмінного обладнання. Класичними представниками цього напрямку є розробки П.Л.Капіци [2] та М.І. Гельперіна [3].

В цих роторних колонах рідина з нерухою перегородки стікає на обертові елементи, на яких відбувається її диспергування. Рідина контактує з паром в вільному об'ємі апарату і по внутрішній частині корпусу стікає на наступний обертовий елемент.

Пара взаємодіє з рідиною, проходячи через кільцеві зазори, утворені рухомими та нерухомими частинами апарату (рис. 1., рис. 2).

Відомим прикладом такого типу апаратів є роторні ректифікаційні колони Кіршбаума-Штора (рис. 3).

В колоні на кожній ступені рідина диспергується конусами, що обертаються, контакт с паровою фазою на кожній ступені перехрестно течійний, в цілому по апарату схема протитечійна.

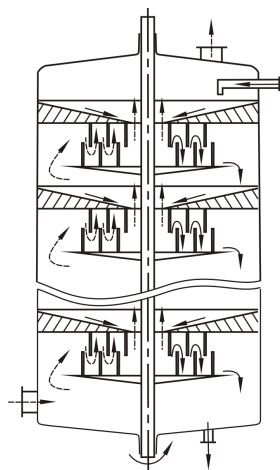


Рис. 1 – Відцентровий тепломасообмінний апарат П.Л. Капіци

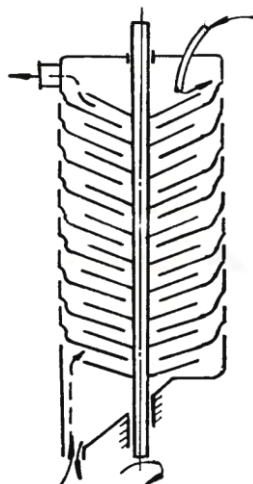


Рис. 2 – Відцентровий ректифікатор М.І. Гельперіна

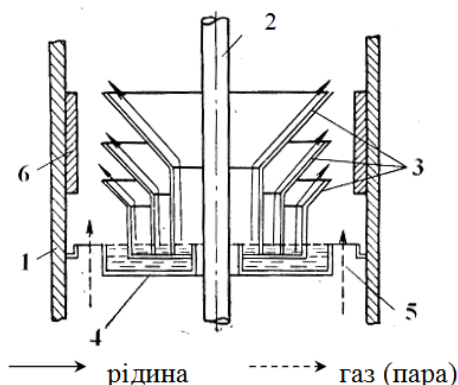


Рис. 3 – Колона Кіршбаума-Штора:
1 – корпус; 2 – вал; 3 – конуси, 4 – тарілка, 5 – паровий патрубок, 6 – відбивне кільце

Істотними недоліками колони такого типу є значний винос крапель, що зростає при зниженні остаточного тиску. Також практична експлуатація показала різке падіння ефективності із зростанням діаметру колони [4]. В колонах конструкції Кіршбаума-Штора та їм подібних відомим недоліком

є висока залежність продуктивності розпилювача від точності його виготовлення. При виготовленні таких апаратів на практиці не виключена можливість відхилення розмірів на кожному ступеню колони, що призводить до коливань продуктивності по рідині і негативно впливає на масообмінні показники апарату.

Тому була розроблена конструкцію багатоступеневого роторного апарату, масообмінна ступінь якого показана на рис. 4 [5]. В цьому апараті продуктивність практично не залежить від глибини занурення в рідину на тарілці за рахунок особливої конструкції живлячого пристрою.

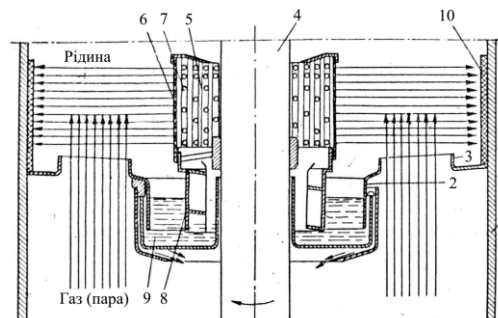


Рис. 4 – Схема масообмінного ступеню роторної колони [5]: 1 – корпус; 2 – тарілка; 3 – патрубок; 4 – вал; 5 – розпилюючі ротори; 6 – обертовий циліндр з гофрованою поверхнею; 7 – перфорація; 8 – гвинтова втулка; 9 – обертовий порожній циліндр; 10 – краплевідбійник

Конструкція роторної колони з організацією багатократного диспергування рідини [6], схема якої наведена на рис. 5, складається з конічних тарілок, встановлених на обертовому валу, на яких змонтовані контактні елементи у вигляді концентричних кілець. В корпусі встановлені тарілки-статори, на які закріплені контактні елементи у вигляді кілець трикутного перетину. Така конструкція забезпечує багатократне диспергування рідини та руйнування диспергованого потоку на елементах статора, при чому удар крапель відбувається по дотичній, що дозволяє максимально використати кінетичну енергію крапель.

Такі апарати мають високу розділову здатність, але обмежені у продуктивності.

В той же час організація взаємодії закрученого потоку газової фази із диспергованим потоком рідини є перспективним способом підвищення ступеню масопереносу.

Крім вказаних вище конструкцій є вихрові розпилюючі апарати, багатофункціонального призначення, які знайшли використання у процесах абсорбції та мокрої пилоочистки. Розглянемо їх найбільш характерні конструкції.

Скрубер Фельда (Рис. 6) [7] є класичним зразком роторного апарату для очищення газів, який знайшов широке застосування при апаратурному оформленні таких процесів як абсорбція, охолодження і пилоочистка.

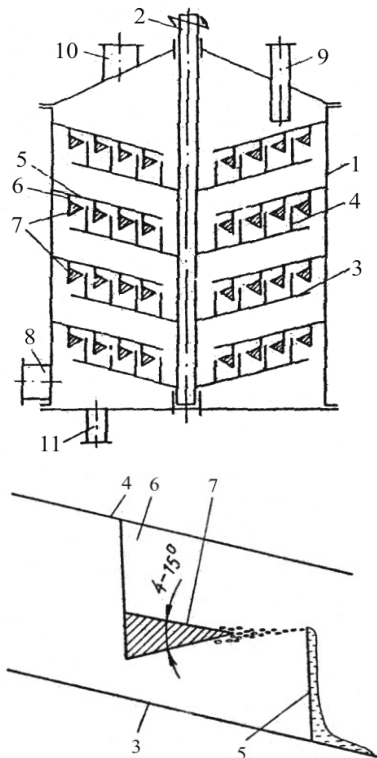


Рис. 5 – Роторна колона з багатократним диспергуванням рідини [6]: 1 – корпус; 2 – вал; 3 – тарілки-ротори; 4 – концентричні кільцеві елементи; 5 – тарілки-статори; 6 – опора; 7 – кільцеві контактні елементи; 8, 9 – патрубки подачі газу та рідини відповідно; 10, 11 – патрубки відведення газу та рідини, відповідно

Скрубер Фельда працює наступним чином – газ входить в штуцер 1 і проходить між тарілками по зигзагоподібному шляху, як показано стрілками на рис. 6. Рідина стікає зверху вниз від полки до полиці. Обертається насаджений на вертикальний вал 2 усічені конуси 3, які захоплюють і розбризкують рідину у вигляді дрібних крапель. Так як конус розширюється догори, то при цьому рідина передається вгору. Таке уповільнене стікання рідини по скрубєру призводить до кращого перемішування повітряного потоку з робочою рідиною при невеликій кількості останньої. У верхній частині апарату газ проходить через невеликий шар насадки 4, де звільняється від крапель рідини захопленої газовим потоком і виходить через штуцер 5. Рідина стікає по трубі 6. Насадка 4 може містити шар гранул з поглинаючого матеріалу для доочищення газу.

Перераховані фактори не тільки позитивно впливають на роботу скрубєра, але і негативно, так наявність насадки 4 і режими руху фаз значно збільшують гідродинамічний опір апарату та витрати енергії на проведення процесів.

Роторний дисковий апарат (Рис. 7) [8] має подібну конструкцію, як і скрубєр Фельда. Вода подається на обертові диски 6 через штуцер 3 і розбризкується, далі вода стікає по внутрішній

поверхні стінок апарату і потрапляє в сопла 7 за якими вона перетікає в жолоб 8 і далі на розташовані нижче розпилюючі диски.

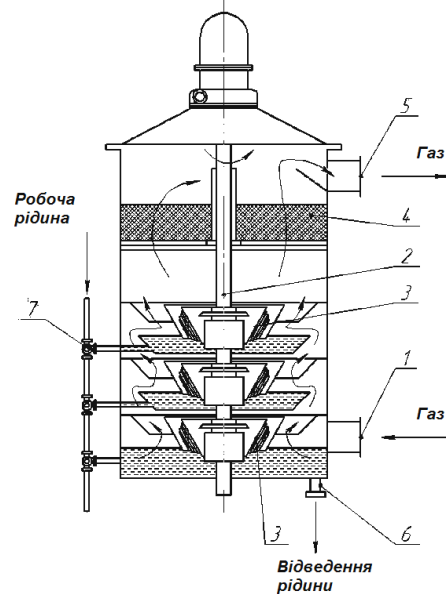


Рис. 6 – Скрубер Фельда.

1 – штуцер для входу газу; 2 – вал; 3 – конус; 4 – насадки для осушення газу; 5 – штуцер для виходу газу; 6 – штуцер для відводу робочої рідини; 7 – штуцер подачі робочої рідини

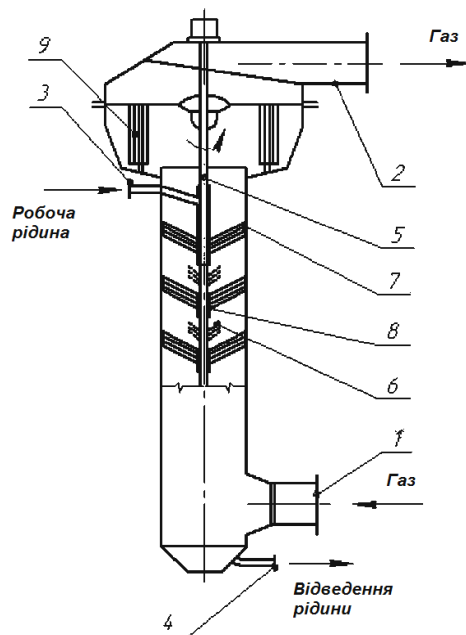


Рис. 7 – Роторний дисковий апарат

1 – штуцер входу газу; 2 – штуцер виводу газу; 3 – штуцер для входу рідини; 4 – штуцер для вивантаження шламу; 5 – вал, що обертається; 6 – похила тарілка; 7 – сопла; 8 – жолоб збірник; 9 – бризкоуловлювач

Коли вода досягає нижнього бункера, вона виводиться через штуцер 4. Повітряний (газовий) потік надходить в апарат через штуцер 1,

піднімаючись вгору за спіралеподібною траєкторією, проходить через струмені і краплі робочої рідини, очищається від зважених частинок. Для вловлювання рідини, що уноситься з газами у верхній частині апарату передбачений сепаратор 9. Очищений газ виводиться з апарату через штуцер 2.

До переваг даного апарату можна віднести тривалий час знаходження газової фази в зрештованому обсязі апарату за рахунок закрученого руху. До недоліків можна віднести громіздкість розпилювачів виконаних у вигляді пакету усічених конусів що збільшує витрати механічної енергії на проведення процесів.

Роторний розпилювальний газопромивач (рис. 8) [9].

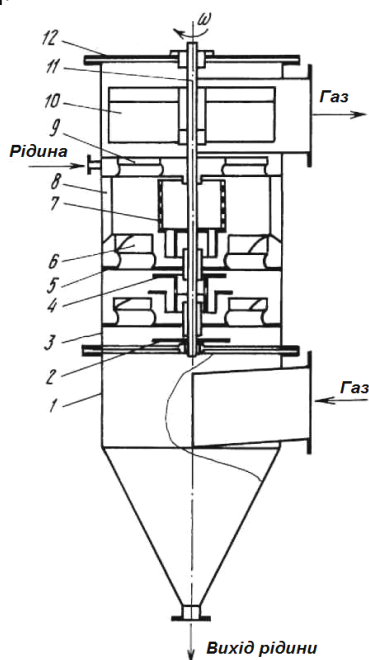


Рис. 8 – Роторний розпилювальний газопромивач:
1 – конічна частина; 2 – розподільник; 3 – корпус; 4 – дисковий промивач; 5 – зливна тарілка; 6 – напрямні лопатки; 7 – розпилювач; 8 – краплевідбійники; 9 – сепаратор; 10 – крильчатка; 11 – вал; 12 – кришка

Газопромивач працює наступним чином. Запилений газ надходить по похилому патрубку в конічну частину 1, де набуває обертового руху, як за рахунок тангенціального підведення газу, так і за рахунок нахилу під кутом патрубка. Газ піднімається вгору по спіралі за рахунок встановлених лопаток 6.

Після проходження всіх контактних елементів, що містять в себе тарілки 5, розпилювачі 7, краплевідбійники 8, газ надходить в сепаратор 9, де очищається від крапель рідини, що уноситься з повітряним потоком. Велика кількість контактних елементів збільшує гідравлічний опір і для його зменшення в апараті передбачена крильчатка 10 встановлена на валу 11.

Свіжа рідина надходить в сепаратор 9, звідки разом з уловленою в ньому рідиною подається всередину розпилювача 7. Розпилювач 7 являє собою

перфорований циліндр, в нижній частині якого є забірний пристрій, який подібно до осьового насоса забезпечує безперервну подачу рідини в розпилювач і циркуляцію рідини на контактному елементі.

З тарілки 5 рідина зливається в промивач 4, який також має забірний пристрій і призначений для відмивання газу від великих часток. Далі робоча рідина подається на розподільник 2, за допомогою якого утворюється додаткова поверхня контакту фаз і рідина рівномірно розподіляється на стінку конічної частини 1, де також взаємодіє з газовим потоком. Плівкова течія рідини в конічній частині 1 забезпечує змив уловлених частинок пилу. Далі рідина у вигляді шламу відводиться через нижній патрубок в конічній частині. На кожному контактному елементі газ і рідина рухаються проточією.

Перевагою даного апарату є те, що шляхом підбору відповідної кількості розпилювачів і промивачів можна забезпечити задану ступінь очищення в одному апараті без попередніх колекторів і сепараторів. До недоліків даної конструкції можна віднести підвищену складність у виготовленні і витрати механічної енергії в силу громіздкості ротора.

Вихровий апарат з пористими розпилювачами, які обертаються (рис. 9) [10] працює наступним чином – газ надходить в апарат через розташований тангенціально штуцер 2.

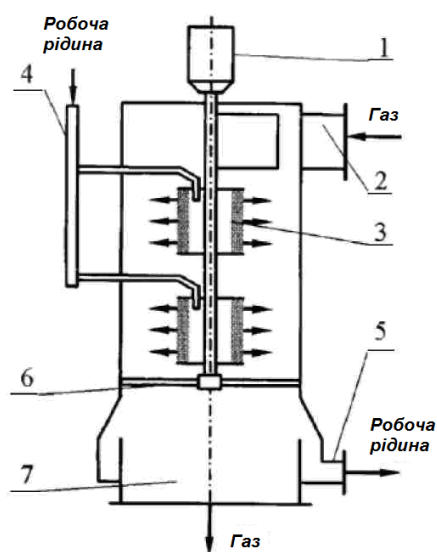


Рис. 9 – Вихровий апарат з пористими розпилювачами, які обертаються: 1 – двигун; 2 – штуцер для входу газу; 3 – пористі обертові розпилювачі; 4 – вузол розподілу рідини; 5 – штуцер для виходу рідини; 6 – опора підвісного вала; 7 – штуцер для виходу газу

Рідина через розподільний пристрій 4 подається в пористі обертові розпилювачі 3. Вал, на якому розташовані розпилювачі, приводиться в обертання двигуном 1. Нижній кінець вала кріпиться на опорі 6. При обертанні вала з розпилювача зривається монодисперсний потік крапель, який потрапивши в

закручений потік газу, рухаючись до стінки апарату, контактують із газовим потоком.

Таким чином, на внутрішній стінці апарату утворюється стікаюча вниз плівка рідини, яка виводиться з апарату через штуцер 5. Газ, проходячи через шар крапель, очищається від шкідливих газоподібних і твердих домішок, після чого видаляється з апарату через штуцер 7.

Перевагою даного апарату є низький аеродинамічний опір, високий ККД пилеочистки. До головного недоліку даного апарату і аналогічних можна віднести відсутність внутрішньої циркуляції рідини, що змушує витратити додаткову енергію на подачу робочої рідини на розпилювачі.

Вихоровий розпилючий масообмінний апарат [11] містить розпилювач рідини 1, тангенціальний вхід газу 2, відводи газу 3, кожна ступень містить корпус 4, торцеві кришки 5, відвод рідини 6 в кожній ступені.

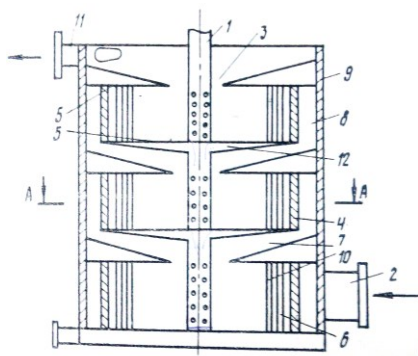


Рис. 10 – Багатоступінчастий вихровий апарат [11]

Відвод газу в 3 виконаний у вигляді радіаційного дифузора 7 і камери 8, утвореної з корпусом ступеня 4 і корпусом 9, тангенціальні отвори подачі газу 10 в кожну ступень і відведення рідини 6 виконані у вигляді вертикальних розривів по всій висоті корпусу ступеня 4, патрубков відводу газу 11 з апарату розташовані в периферії радіального дифузора останньої ступені. Недоліком цієї конструкції є нерівномірний розподіл рідини в нижніх ступенях апарату.

Ефективність роботи апаратів, розглянутих вище, висока і тому для вибору певної конструкції необхідно враховувати комплекс техніко-економічних характеристик. З огляду на, те що характеристики апаратів близькі, великий інтерес викликає зниження витрат енергії на їх роботу.

Апарати вихрового типу володіють рядом переваг, що вигідно відрізняє їх від інших апаратів «мокрого» очищення. У них можливе спільне очищення газів від газоподібних і дисперсних включень. Вони володіють великою пропускною спроможністю по газу, що дає можливість очищати великі об'єми газів; дозволяють створювати в апараті високу питому поверхню контакту фаз і добиватися високих швидкостей масопереносу газоподібного реагенту в рідину. Досить просто забезпечується

оптимальна температура у всій зоні контакту; вони стійко працюють в широких діапазонах робочих навантажень по газу і рідині, мають малі габарити і порівняно просте конструктивне оформлення. Велика швидкість взаємодіючих потоків викликає інтенсифікацію тепло - і масообміну, а наявність обертового руху забезпечує надійну сепарацію рідини від пару (газу) після контакту.

Малий час перебування газової і рідкої фаз дає можливість обробляти пожежно - і вибухонебезпечні суміші. Апарати володіють низькою утримуючою здатністю по рідині, що забезпечує малий час виходу на стабільний режим роботи. При цьому у вихрових апаратах легко вирішуються проблеми масштабного переходу і дані, отримані в лабораторних або дослідно-промислових умовах на одиночній вихровій камері, можуть бути перенесені на промисловий апарат.

Інтенсифікація масообмінного процесу у відцентровому полі здійснюється за рахунок зменшення діаметру крапель (збільшення поверхні контакту фаз) і збільшення відносної їх швидкості, що викликає посилення міжфазного тертя на кордоні розділу. Завдяки нерівномірності швидкісного градієнта газового потоку по радіусу, в робочій зоні досягаються багатократна безперервна трансформація поверхні рідини і її оновлення.

Таким чином, незважаючи на вже проведені роботи в цьому напрямку залишається певний потенціал для вдосконалення апаратів та інтенсифікації масообмінних процесів в системах рідина-газ (пара) в обладнанні цього типу. Шляхом його реалізації є організація протитечійної взаємодії в режимі багатостадійного диспергування рідини та використання кінцевих ефектів, що мають місце при утворенні та руйнуванні дисперсного потоку.

Гідродинаміка і енерговитрати в розпилювальних апаратах

Однією з основних вимог до конструкцій апаратів є забезпечення мінімального бризкоуносу рідини при невисокому гідродинамічному опорі. Фактором, що обмежує верхнє граничне навантаження по газу, є бризкоунос – кількість робочої рідини винесеної газом із зони їх контакту [12].

В роботах [12-13] відзначається що рідина, що виноситься з апарату це – дрібнодисперсні краплі, які утворилися в результаті зіткнення більших і дрібних крапель; вторинні краплі які утворилися при ударі крапель факела о пристінні відбійники; дрібнодисперсні краплі які утворилися при ударі основних і вторинних крапель.

Для зниження бризкоуносу також використовують різні крильчатки, бризкоуловлювач, відбійники. Для зниження виносу можна збільшити висоту сепарації простору, але останні десятиліття мають місце спроби щодо зниження висоти сепарації простору різних апаратів для проведення процесів абсорбції та мокрого очищення газів, що пов'язано з

прагненням зменшення габаритів і збільшенням корисного об'єму апаратів.

В роботах [12, 14] були досліджені основні параметри, що впливають на бризкоунос в роторному розпилювальному апараті. В результаті було отримано регресійні рівняння, які описують вплив різних чинників на винесення рідини:

$$e = 1,05 \cdot 10^{-21} \cdot \text{Re}_p^{-0,9} \cdot \text{We}_z^{1,9} \cdot \text{Fr}_m^{3,1} \cdot \left(\frac{D_p}{t_{\text{окр}}}\right)^{5,5} \cdot \left(\frac{H_p}{t_{\text{ос}}}\right)^{0,1}$$

де $\text{Re}_p = U_k \cdot d_0 \cdot \rho_p / \mu_p$ – число Рейнольдса для рідкої фази; $\text{We}_z = U_z^2 \cdot d_0 \cdot \rho_p / \sigma_p$ – критерій Вебера; $\text{Fr}_m = U_p^2 / g \cdot d_0$ – модифікований критерій Фруда; $(D_p/t_{\text{окр}})$ – геометричний симплекс, що характеризує умови сепарації крапель рідини в факелі розпилю в радіальному напрямку; $(H_p/t_{\text{ос}})$ – геометричний симплекс, що характеризує умови сепарації крапель рідини в факелі розпилю в осьовому напрямку; D_p та H_p – діаметр і висота диспергуючого пристрою; $t_{\text{окр}}$ та $t_{\text{ос}}$ – окружний та осьовий крок розбивки отворів розпилювача; U_k – швидкість краплі; U_z – швидкість газу; d_0 – діаметр диспергуючих отворів розпилювача; ρ_p – щільність рідини; μ_p – динамічна в'язкість рідини; σ_p – поверхневий натяг рідини.

З роботи [15] відомо, що повний гідродинамічний опір в розпилюючому апараті складається з втрат напору на сухий ступені і в факелі розпилю.

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_\phi$$

де $\Delta P_c, \Delta P_\phi$ – відповідно падіння напору на сухий ступені і в факелі розпилю, Па.

При цьому втрати напору визначені експериментально виходячи з умови:

$$\Delta P = \xi \frac{U_z^2}{2} \rho_z,$$

де ξ – коефіцієнт гідродинамічного опору; ρ_z – щільність газу; U_z – швидкість газу. Коефіцієнт гідродинамічного опору ξ є єдиним показником, який залежить від конструктивних, технологічних, режимних параметрів і може бути визначений тільки експериментальним шляхом.

В роботі [16] було встановлено, що фізичні характеристики рідкої фази (μ_p, ρ_p, σ_p) впливають на розмір диспергованих крапель, не викликаючи зміни продуктивності диспергуючого пристрою і вентиляційного ефекту. Тому при варіюванні параметрами рідкої фази зміни гідродинамічного опору не спостерігалося. Також було встановлено ступінь впливу досліджених параметрів на гідравлічний опір роторного розпилюючого апарату.

$$\Delta P_0 = C_2 \cdot U_z^{1,51} d_0^{1,16} \cdot U_{r_2}^{0,05} \cdot \left(\frac{D_p}{t_{\text{окр}}}\right)^{5,5} \cdot \left(\frac{H_p}{t_{\text{ос}}}\right)^{0,1}$$

де C_2 – коефіцієнт пропорційності.

Зіставляючи втрати напору на сухий і зрошуваних ступенях в роботі [16] показано, що втрати напору на сухий ступені при збільшенні швидкості повітря з 1 до 3 м/с становить від 50 до 100% опору зрошуваної ступені.

Ефективність роботи роторних апаратів визначається головним чином витратами енергії на проведення процесів [10].

Енергія контакту між газом і рідиною в загальному випадку може включати такі складові як енергія газового потоку, що характеризує ступінь турбулізації газорідного потоку; енергія рідкого потоку, що характеризує ступінь диспергування рідини і механічна енергія обертових елементів конструкції апарату.

Точне визначення енергії контакту (зіткнення) в цілому ряді апаратів представляє певні труднощі. Величину енергії газового потоку зазвичай приймають рівною гідравлічному опору апарату, хоча в дійсності, якщо враховувати втрати на тертя в сухому апараті, вона повинна бути трохи менше.

Точний розрахунок механічної енергії, що вноситься в загальну величину витрат N_0 (кДж/1000 м³ газів) потоком рідини і обертовими пристроями, ускладнюється труднощами обліку втрат на тертя при розпилюванні рідини і обертання ротора або розпилювача, а також передачі частини цієї енергії на переміщення газів через апарат. Тому величина N_0 зазвичай розраховується за наближеною формулою, яка має вигляд:

$$N_0 = \Delta P_0 + p_p \left(\frac{V_p}{V_z}\right) + \frac{N_m}{V_z}$$

де p_p – тиск рідини, що розпилюється; N_m – потужність обертового механізму, що витрачається на контактування газу з рідиною; V_p, V_z – об'ємні витрати відповідно рідини і газу.

У роторному апараті енергія витрачається на подолання гідродинамічного опору апарату і на механічні витрати (потужність, що витрачається на обертання розпилювача).

При порівнянні цих витрат необхідно використовувати поняття про питомі енерговитрати (питомі енерговитрати в пилоуловлювачах – це одиниця виміру, що показує яка кількість енергії витрачається на роботу апарату при проходженні 1000 м³ газу.)

При роботі апарату можна виділити наступні групи втрат енергії [16]:

- 1) на рух рідини в пристрої розпилювача, даний вид витрат визначається емпіричним шляхом;
- 2) при русі рідини в диспергуючому пристрої;

3) на утворення струменів рідини, тобто на передачу рідини кінетичної енергії;

4) на подолання сил тертя між диспергуючим пристроєм і повітрям;

5) на подолання тертя в підшипниках, передавальному механізмі, ущільненнях.

Виходячи з вищесказаного можна знайти повні механічні витрати енергії через рівняння:

$$N_n = N_m / \eta_{\text{общ}},$$

де N_m – механічні витрати енергії, які складаються з витрат енергії на роботу розпилювача в цілому; $\eta_{\text{общ}}$ – загальний ККД який складається з ККД підшипників, пасової передачі, тощо.

Масовіддача в газовій фазі в розпилювальних апаратах

Апарати мокрого очищення одночасно зі зваженими частками можуть уловлювати пароподібні і газоподібні компоненти шкідливих домішок (оксиди сірки, азоту, вуглецю) і працювати як абсорбери [17].

Як зрошувальна рідина найчастіше застосовується вода (при очищенні від пилу); при абсорбції вибір зрошувальної рідини (абсорбенту) обумовлюється процесом, що протікає.

Неодмінною умовою ефективної роботи апаратів є високорозвинена поверхню контакту фаз. Дуже часто для створення розвинутої міжфазної поверхні рідку фазу диспергують. Інтенсивний турбулентний режим приводить до подрібнення рідинного потоку на краплі, що приводить до підвищення ефективності процесів за рахунок багатократного оновлення поверхні контакту фаз. При крапельному режимі течії рідини коефіцієнт масопередачі в три рази перевищує значення коефіцієнтів при плівковій течії рідини. Для реалізації такого режиму використовують апарати відцентрової, вихорової, розпилювальної, ударної дії. Це апарати, течія в яких характеризується високим ступенем турбулентності. Крім цього, гідродинаміка таких апаратів дозволяє здійснювати розпил рідини на дрібні краплі, що призводить до значного прискорення процесу масопередачі та підвищення ефективності пиловловлювання.

Масообмін в роторних апаратах з одноразовим розпилом рідини досліджувався в роботах [18, 19].

Масовіддача в газовій фазі в апаратах з циркуляцією рідини на контактних ступенях досліджувалася лише в роботах [16, 20].

Розрахункові формули, запропоновані авторами, відрізняються одна від одної за формою внаслідок відмінності в методиках, що застосовуються ними при узагальненні результатів експерименту.

Апарат конструкції Сафіна Р.Ш. [21] випробований с діаметром ротора 165 мм при зволоженні повітря водою. Для розрахунку запропонована формула:

$$Nu = 1,47 Re^{0,4} Pr^{0,5} (1 + f),$$

де f – фактор динамічного стану поверхні контакту фаз [21]; Re – критерій Рейнольдса; Pr – критерій Прандтля; Nu – критерій Нуссельта.

В роботі [22] для опису масообміну використані результати, отримані на підставі аналогії між масообміном і тертям [23].

Для зволоження повітря водою знайдено вираз:

$$M = \beta_G P_B / \omega_{op} \cdot \gamma \cdot 3600 = M_{\text{повітря}} / M_{\text{води}} = 0,055,$$

де: ω_{op} – окружна швидкість потоку; γ – питома вага потоку; P_B – середній парціальний тиск інертного газу; $M_{\text{повітря}}$, $M_{\text{води}}$ – молекулярні ваги води і повітря.

В роботі [20] показано, що поверхня контакту фаз (ПКФ) на стадії польоту і удару крапель порівняні. Встановлено, що зі збільшенням числа рядів розпилюючих отворів в розпилювачі зростають масообмінні характеристики: коефіцієнт масовіддачі і питома поверхня контакту фаз.

Для розрахунку коефіцієнту масовіддачі на стадії удару крапель запропонована формула [20]:

$$\beta = 6,277 \cdot 10^6 \cdot Re^{-1,29} \cdot We^{1,6}$$

Проведені дослідження [12] масовіддачі в газовій фазі показали, що кількість речовини, яка передається при ударі крапель об пластини пристінного краплевідбійнику в 2-3 рази перевищує кількість речовини, яка передається 1 кг повітря при польоті крапель. Отримано емпіричне рівняння для розрахунку коефіцієнта масовіддачі при ударі крапель об пристінний краплевідбійник:

$$\beta = 2480 \cdot U^{0,94} \cdot (\Delta S)^{-0,83} E_{zd}^{0,28} \cdot K_{oc}^{-0,18},$$

E_{zd} – питома потужність струменя; K_{oc} – кількість рядів отворів; ΔS – сумарна поверхня диспергуючих отворів.

Відсутність однаковості в підході до розрахунку масообміну, продемонстрована вище є наслідком складності гідродинамічної обстановки, яка виникає при роботі апаратів даного класу. Аналогічний висновок можна зробити щодо результатів, отриманих при вивченні апаратів з одноразовим розпилом рідини на контактних ступенях.

В апараті, дослідженому Авруцьким М.М. [18] масообмін здійснюється в кілька стадій. Кожній з них відповідає певний спосіб взаємодії фаз.

Аналіз літературних даних дозволяє виділити наступні характерні стадії масообміну в апаратах із зрошенням робочою рідиною, через розпилювач, що обертається:

1. При польоті рідини у вільному перетині апарата,
2. При ударі об стінку,
3. На поверхні нерухомих елементів,

4. При русі в межах обертового ротора (розпилювача).

У деяких роботах зроблені спроби диференційованого підходу до процесу масовіддачі в різних характерних зонах апарату [12, 18, 23]. Хіртъез показав, що над обертовим конусом, який включає в себе стадії 1, 2 і 4 масообмін відбувається на 95%. Аношин І.М. для апаратів аналогічної конструкції встановив, що при русі по диску і польоті стадії 1 і 4 передають до 89% речовини, на бічній поверхні апарату стадія 2 - 30% і під диском стадія 3 - 30%. Однак наведені відомості дають лише індивідуальні кількісні оцінки для досліджуваних типів апаратів.

Тому необхідний новий підхід до опису процесів масообміну, який враховував можливі ефекти характерні для вихрових апаратів з примусовим розпиленням робочої рідини [24].

Обговорення результатів

Аналіз відомих підходів та особливостей сучасних конструкцій визначив перспективним використання багатоступеневих вихрових тепломасообмінних апаратів, які відповідають вимогам енергетичної ефективності та малої металемності при високих показниках розділюючої здатності.

Можливість суміщення та інтенсифікації фізико-хімічних процесів в газорідних системах за рахунок створення розвинутого турбулентного руху фаз в одному апараті дозволяє досягти високої ефективності масопередачі та газоочищення [25].

Не дивлячись на те, що конструкції порожнистих вихрових розпилюючих апаратів були розроблені досить давно, вони не знаходили до недавнього часу широкого використання з ряду причин, серед яких слід зазначити як недостатню вивчену характеристику їх роботи і відсутність науково-обґрунтованих методів їх розрахунку, так і незацікавленість підприємств в якісному очищенні промислових газових викидів [26].

Висновки

Виходячи з досвіду роботи промислового вихрового обладнання, розроблені основні вимоги до конструювання нового тепломасообмінного обладнання і показана можливість створення такого обладнання, що відповідає запропонованим критеріям. На основі вищенаведеного можна стверджувати, що подальші дослідження, спрямовані на ґрунтовне вивчення питань, пов'язаних з проблемою комплексної обробки технологічних та відхідних газів промислових підприємств та вибором і проектуванням високоефективного вихрового тепломасообмінного обладнання є актуальними і дають можливість зменшити техногенне навантаження на довкілля [27, 28]

Для содової промисловості давно назріла необхідність впровадження принципово нових компактних та високоефективних абсорберів,

працездатних при високому відношенні подаваної рідини до кількості газу, що забезпечують не тільки інтенсифікацію процесів абсорбції газів, але й рішення ряду екологічних проблем виробництва соди.

Основним результатом роботи є оновлення технології очистки викидів від аміаку та пилу, розробка нової конструкції обладнання, що вдосконалює содове виробництво.

Список літератури

1. **Volnenko, A. A.** Basic requirements for the design of heat and mass transfer column equipment / **A.A. Volnenko, Zh. Serikuly, D. Sarsenbekuly, A. A. Abzhapbarov** // *International Conference of Industrial Technologies and Engineering (ICITE 2014)*. – 2014. – P. 194-198.
2. **Архаров, А. М.** О разделении воздуха в центробежных ректификационных аппаратах / **А. М. Архаров** // *Химическое машиностроение*. – 1951. – №3. – С. 8–12.
3. **Гельперин, Н. И.** Исследование процесса ректификации бинарных смесей в вертикальном ротационном аппарате / **Н. И. Гельперин, М. С. Хаценко** // *Журнал прикладной химии*. – 1952. – вып.6. – С. 610–613.
4. **Олевский, В. М.** Ректификация термически нестойких продуктов. / **В. М. Олевский, В. Р. Ручинский**. – М.: Химия, 1972. – 200 с.
5. **Коган, В. Б.** Оборудование для разделения смесей под вакуумом / **В. Б. Коган, М. А. Харисов**. – Л.: Машиностроение, 1976 – 376 с.
6. А.с.1623679 СССР МКИ В 01 D 3/30 Тепломассообменный аппарат / **Ю. В. Шкарупа, В. Я. Стороженко, А. А. Лукаш** (СССР). – №4663728/26; заявл. 19.12.88; опубл.30.01.91, Бюл.№4.
7. **Брайнес, Я. М.** Процессы и аппараты химических производств / **Я. М. Брайнес**; 2-е изд. перераб. и доп. – Москва, 1947. – 597 с.
8. **Бретшнайдер, Б.** Охрана воздушного бассейна от загрязнений / **Б. Бретшайдер, И. Курфюрст**. Пер с англ. Под ред. А.Ф. Туболкина. – Ленинград: Химия, 1989. – 288 с.
9. Пат. № 2088311 Российская Федерация. МПК⁶ В 01 D 47/16. Роторный газопромыватель / **А. Ф. Сорокопуд**; заявитель и патентообладатель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – № 95108110/25; заявл. 18.05.1995; опубл. 27.08.1997, Бюл. № 17. 4 с.
10. **Гумерова, Г. Х.** Динамика дисперсной фазы в вихревом аппарате с пористыми вращающимися распылителями / **Г. Х. Гумерова, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев** // *Химическая промышленность сегодня*. - 2009. - №5. – С. 47-50.
11. А.с. СССР № 965485. МПК⁶ В 01 D 53/18, В 01 D 3/32. Вихревой распыливающий многоступенчатый массообменный аппарат / **Б. Г. Холин, И. А. Ковалев, В. И. Склабинский**; заявитель и патентообладатель Сумской филиал ХПИ. заявл. 23.03.81; опубл. 15.10.82, Бюл. № 38. 4 с.
12. **Сорокопуд, А. Ф.** Разработка и совершенствование роторных распылительных аппаратов с целью интенсификации процессов в гетерогенных газожидкостных системах: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.18.12 / **Сорокопуд Александр Филиппович** - Кемерово. 1998. – 289 с.

13. **Максимов, С. А.** Разработка и исследование энергосберегающего га зопромывателя для улавливания пылей пищевых продуктов: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.04, 05.18.12 / **Максимов Сергей Александрович.** – Кемерово, 2003. – 115 с.
14. **Латыпов, Д. Н.** Эффективность пылеулавливания в скруббере с центробежными форсунками использующими соударение встречных струй / **Д. Н. Латыпов, А. А. Овчинников** // *Химия и химическая технология.* – 2001. – Т44. №3. – С. 24-27.
15. **Сорокопуд, А. Ф.** Гидравлическое сопротивление прямооточного роторного распылительного аппарата / **А. Ф. Сорокопуд, Е. А. Федоров, С. А. Максимов** // *Химия и технология топлив и масел.* – 1999. - № 3. – С. 26-28.
16. **Сорокопуд, А. Ф.** Разработка конструкции и методики расчета роторно-распылительной колонны с уменьшенным брызгоуносом: дис. ... канд. техн. наук: 08.04.09 / **Сорокопуд Александр Филипович.** – Москва, 1987. – 177 с.
17. **Федоров, Е. А.** Гидродинамика, тепло - и массообмен в роторных распылительных аппаратах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.04, 05.18.12 / **Федоров Евгений Алексеевич.** - Кемерово, 1997. – 136 с.
18. **Авруцкий, М. М.** Исследование стадий массоотдачи в роторном тарельчатом аппарате: дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 1972. – 120 с.
19. **Коган, В. Б.** Оборудование для разделения смесей под вакуумом / **В. Б. Коган, М. А. Харисов.** – Ленинград: Машиностроение, 1976. – 376 с.
20. **Козымаев, В. С.** Исследование массообменных характеристик контактного элемента с целью создания высокоэффективного роторного распылительного аппарата: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / **Козымаев Виталий Сергеевич.** – Кемерово, 2004. – 122 с.
21. **Жаворонков, Н. М.** Исследование процесса массопередачи в аппаратах роторного типа / **Н. М. Жаворонков, Р. Ш. Сафин, А. М. Николаев** // *Химическое машиностроение.* – 1961. – № 25. – С. 15-18.
22. **Телегин, А. С.** Тепло-массоперенос / **А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко.** – Москва: Металлургия, 1995. – 400 с.
23. **Шабалин, К. Н.** Трение между газом и жидкостью в технике абсорбционных процессов / **К. Н. Шабалин.** – Москва: Металлургиздат, 1943. – 261 с.
24. **Грубник, А. О.** Очистка и утилизация газовых выбросов производства кальцинированной соды / **А. О. Грубник, Е. В. Манойло, В. Ф. Моисеев, М. И. Васильев, Д. В. Давыдов** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 53 (1274). – С. 65-71. – doi:10.20998/2413-4295.2017.53.10.
25. **Моисеев, В. Ф.** Снижения техногенного навантаження на довкілля при проведенні процесу абсорбції аміаку у содовій промисловості / **В. Ф. Моисеев, С. В. Манойло, А. О. Грубник** // *Journal of Engineering Sciences.* – 2016. – Vol. 3, Issue 2. – P. G1–G7. – doi:10.21272/jes.2017.4(2).b1.
26. **Tomasz, Kasikowski.** Utilisation of synthetic soda-ash industry by-products / **Tomasz Kasikowski, Roman Buczkowski, Marcin Cichosz** // *International Journal of Production Economics.* – 2008. – Volume 112, Issue 2. – P. 971-984. – doi:10.1016/j.ijpe.2007.08.003.
27. **Rao, M. N.** Solid and Hazardous Waste Management / **Razia Sultana, Sri Harsha Kota** // *Science and Engineering.* – 2017. – P. 273-301. – doi.org/10.1016/B978-0-12-809734-2.00009-2.
28. **Zhu, Liu.** National carbon emissions from the industry process: Production of glass, soda ash, ammonia, calcium carbide and alumina / **Zhu Liu** // *Applied Energy.* – 2016. – Vol. 166. – P. 239-244. – doi:10.1016/j.apenergy.2015.11.005.

Bibliography (transliterated)

1. **Volnenko, A. A., Serikuly, Zh., Sarsenbekuly, D., Abzhapbarov, A. A.** Basic requirements for the design of heat and mass transfer column equipment. *International Conference of Industrial Technologies and Engineering (ICITE 2014)*, 2014, 194-198.
2. **Arkharov, A. M.** O razdelenii vozdukhа v tsentrobeznykh rektifikatsionnykh apparatakh. *Khimicheskoye mashinostroyeniye*, 1951, 3, 8-12.
3. **Gel'perin, N. I., Khatsenko, M. S.** Issledovaniye protsessа rektifikatsii binarnykh smesey v vertikal'nom rotatsionnom apparate. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 1952, 6, 610–613.
4. **Olevskiy, V. M., Ruchinskiy, V. R.** Rektifikatsiya termicheski nestoykikh produktov. M.: Khimiya, 1972, 200.
5. **Kogan, V. B., Kharisov, M. A.** Oborudovaniye dlya razdeleniya smesey pod vakuomom. L.: Mashinostroyeniye, 1976, 376.
6. A.s.1623679 SSSR MKI B 01 D 3/30 Teplomassoobmennyy apparat / **Yu. V. Shkarupa, V. Ya. Storozhenko, A. A. Lukash** (SSSR). – №4663728/26; zayavl. 19.12.88; opubl.30.01.91, Byul.№4.
7. **Braynes, Ya. M.** Protsessy i apparaty khimicheskikh proizvodstv. 2-ye izd. pererab. i dop. Moskva, 1947, 597.
8. **Bretshnayder, B., Kurfyurst, I.** Okhrana vozdušnogo basseyna ot zagryazneniy. Per s angl. Pod red. A.F. Tubolkina. Leningrad: Khimiya, 1989, 288.
9. Pat. № 2088311 Rossiyskaya Federatsiya. MPK6 V 01 D 47/16. Rotornyy gazopromyvatel' / **A. F. Sorokopud; zayavitel' i patentoobladatel' Kemerovskiy tekhnologicheskiiy institut pishchevoy promyshlennosti.** – № 95108110/25; zayavl. 18.05.1995; opubl. 27.08.1997, Byul. № 17. 4 s.
10. **Gumeroва, G. Kh., Dmitriyev, A. V., Nikolayev, N. A.** Dinamika dispersnoy fazy v vikhrevom apparate s poristymi vrashchayushchimisya raspylitelyami. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*, 2009, 5, 47-50.
11. A.s. SSSR № 965485. MPK6 V 01 D 53/18, V 01 D 3/32. Vikhrevoyy raspylivayushchiy mnogostupenchatyy massoobmennyy apparat / **B. G. Kholin, I. A. Kovalev, V. I. Sklabinskiy;** zayavitel' i patentoobladatel' Sumskey filial KHPI. zayavl. 23.03.81; opubl. 15.10.82, Byul. № 38. 4 s.
12. **Sorokopud, A. F.** Razrabotka i sovershenstvovaniye rotornykh raspylitel'nykh apparatov s tsel'yu intensivatsii protsessov v geterogennykh gazozhidkostnykh sistemakh: dis. ... d-ra. tekhn. nauk: 05.18.12 / **Sorokopud Aleksandr Filippovich** – Kemerovo. 1998. – 289 s.
13. **Maksimov, S. A.** Razrabotka i issledovaniye energosberegayushchego ga zopromyvatelya dlya ulavlivaniya pyley pishchevykh produktov: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.18.04, 05.18.12 / **Maksimov Sergey Aleksandrovich.** –Kemerovo, 2003. – 115 s.
14. **Latypov, D. N., Ovchinnikov, A. A.** Effektivnost' pyleulavlivaniya v skrubbere s tsentrobeznyimi forsunkami ispol'zuyushchimi soudareniye vstrechnykh struy. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2001, 44, 3, 24-27.
15. **Sorokopud, A. F., Fedorov, Ye. A., Maksimov, S. A.** Gidravlicheskoye soprotivleniye pryamotochnogo rotornogo

- raspylitel'nogo apparata. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*, 1999, **3**, 26-28.
16. **Sorokopud, A. F.** Razrabotka konstruktсии i metodiki rascheta rotorno-raspylitel'noy kolonny s umen'shennym bruzgounosom: dis. ... kand. tekhn. nauk: 08.04.09 / **Sorokopud Aleksandr Filipovich.** – Moskva, 1987. – 177 s.
 17. **Fedorov, Ye. A.** Gidrodinamika, teplo - i massoobmen v rotornykh raspylitel'nykh apparatakh: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.18.04, 05.18.12 / **Fedorov Yevgeniy Alekseyevich.** – Kemerovo, 1997. – 136 s.
 18. **Avrutskiy, M. M.** Issledovaniye stadiy massootdachi v rotornom tarel'chatom apparate: dis. ... kand. tekhn. nauk. – Moskva, 1972. – 120 s.
 19. **Kogan, V. B., Kharisov, M. A.** Oborudovaniye dlya razdeleniya smesey pod vakuumom. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1976, 376.
 20. **Kozymayev, B. C.** Issledovaniye massoobmennykh kharakteristik kontaktnogo elementa s tsel'yu sozdaniya vysokoeffektivnogo rotornogo raspylitel'nogo apparata: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.18.12 / **Kozymayev Vitaliy Sergeevich.** – Kemerovo, 2004. – 122 s.
 21. **Zhavoronkov, N. M., Safin, R. Sh., Nikolayev, A. M.** Issledovaniye protsessa massoperedachi v apparatakh rotornogo tipa. *Khimicheskoye mashinostroyeniye*, 1961, **25**, 15-18.
 22. **Telegin, A. S., Shvydkiy, B. C., Yaroshenko, Yu. G.** Teplo-massoperenos. Moskva: Metalurgiya, 1995, 400.
 23. **Shabalin, K. N.** Treniye mezhdru gazom i zhidkost'yu v tekhnike absorbtionnykh protsessov. Moskva: Metallurgizdat, 1943, 261.
 24. **Grubnik, A. O., Manoylo, Ye. V., Moiseyev, V. F., Vasil'yev, M. I., Davydov, D. V.** Ochistka i utilizatsiya gazovykh vybrosov proizvodstva kal'tsinirovannoy sody. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **53** (1274), 65-71, doi:10.20998/2413-4295.2017.53.10.
 25. **Moiseev, V. F., Manoylo, E. V., Grubnik, A. O.** Znizhennyya tekhnogennoy navantazhennyya na dovkillya pri provedenni protsesu absorbtitsii amiak u sodoviy promislivosti. *Journal of Engineering Sciences*, 2016, **3**, 2, G1-G7, doi:10.21272/jes.2017.4(2).b1.
 26. **Tomasz, Kasikowski, Buczkowski, Roman, Cichosz, Marcin.** Utilisation of synthetic soda-ash industry by-products. *International Journal of Production Economics*, 2008, **112**, 2, 971-984, doi:10.1016/j.ijpe.2007.08.003.
 27. **Rao, M. N., Sultana, Razia, Kota, Sri Harsha.** Solid and Hazardous Waste Management. *Science and Engineering*, 2017, 273-301, doi:10.1016/B978-0-12-809734-2.00009-2.
 28. **Zhu, Liu.** National carbon emissions from the industry process: Production of glass, soda ash, ammonia, calcium carbide and alumina. *Applied Energy*, 2016, **166**, 239-244, doi:10.1016/j.apenergy.2015.11.005.

Відомості про автора

Грубнік Аліна Олександрівна – аспірант Національного Технічного Університету «Харківський Політехнічний Інститут», кафедри Хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна, e-mail: alina.hrubnik@gmail.com.

Alina Hrubnik - Graduate student National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Department of Chemical techniques and industrial ecology, Kharkiv, Ukraine; e-mail: alina.hrubnik@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю таким чином:

Грубнік, А. О. Сучасні вимоги до тепломасообмінного обладнання. Конструктивна еволюція вихрових розпилювальних апаратів / **А. О. Грубнік** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* - Харків: НТУ «ХПІ». - 2018. - № 16 (1292). - С. 134-144. - doi:10.20998/2413-4295.2018.16.21.

Please cite this article as:

Hrubnik, A. O. Modern requirements for heat-exchange equipment. Constructive evolution of vortex spraying devices. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 134-144, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.21.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Грубнік, А. О. Современные требования к тепло- массообменному оборудованию. Конструктивная эволюция вихревых распылительных аппаратов / **А. О. Грубнік** // *Вестник НТУ «ХПІ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* - Харьков: НТУ «ХПІ». - 2018. - № 16 (1292). - С. 134-144. - doi:10.20998/2413-4295.2018.16.21.

АННОТАЦИЯ В работе рассматриваются современные требования создания новой техники. Показаны направления развития науки и техники по проблеме тепло- и массопереноса. В связи с высокой стоимостью энергоресурсов и дефицитом водных ресурсов современные тепло- массообменные аппараты должны быть энергоёмкими, высокоэффективными и интенсивными, быть универсальными, простыми конструктивно и обеспечивать удобство монтажа и эксплуатации. Предложена новая многоступенчатая конструкция вихревого аппарата.

Ключевые слова: тепло- массообмен; вихревые аппараты; многоступенчатые аппараты; промышленные газовые выбросы; очистка; массообмен

Поступила (received) 03.05.2018

УДК 004.053+504.45

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.22

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ ЗАИЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АНАЛОГИИ

Д. Д. ДУБОВИК*

Младший научный сотрудник, Институт технической механики и государственное космическое агентство НАН Украины, Днепр, УКРАИНА
*email: denic3d@gmail.com

АННОТАЦИЯ Методика оценки процесса заиления искусственных водохранилищ (аналогов) на основе известных характеристик заиления специально выбранного водоема–прототипа. Критериями выбора водоема–прототипа служит мера аналогии, рассчитанная на основе основных характеристик – морфологических, гидрологических, физико-химических и биологических сравниваемых водохранилищ. В основу методики в работе предлагается использовать наборы комплексных критериев различного уровня полноты, определяемых количеством частных критериев, входящих в комплексный критерий с соответствующими весовыми коэффициентами на основе максимального уровня аналогии, который определяется специальной мерой – коэффициентом несоответствия или обратным ему коэффициентом аналогии. Последний определяется как модуль отношения разности критериев аналогии сравниваемых водохранилищ к их среднему значению.

Выполнен сравнительный анализ значений критериев подобия водохранилищ – аналогов (водохранилищ каскада) и водохранилища – прототипа и сравнительный анализ значений критерия подобия всех сочетаний пар водохранилищ Днепровского каскада. На этой основе построена матрица отличий водохранилищ аналогов, которая позволяет оценить возможность применения метода подобия, используя в качестве аналога одно из водохранилищ каскада, если оно удовлетворяет требованиям аналогии.

Ключевые слова: критерий подобия; информационная модель; весовой коэффициент; матрица отличий; коэффициент аналогий; модель-прототип.

METHODICAL PECULIARITIES OF ESTIMATION OF PROCESSES OF SEIZATION OF ARTIFICIAL WATER RESERVOIRS BASED ON THE ANALOGY METHOD

D. DUBOVYK*

Junior Researcher, Institute of Technical Mechanics and State Space Agency of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, UKRAINE

ABSTRACT The similarity of artificial reservoirs (AR) is determined by the proximity of their parameters and characteristics. In this regard, the selection of the criteria for analogy is, in fact, the task of multicriteria comparative analysis, which dictates the need, on the one hand, to select the parameters of artificial reservoirs to a decisive degree, determining those characteristics of the reservoirs that reflect their studied properties and, accordingly, the synthesis of the criteria for analogy, providing a solution to the problem of choosing a reservoir-prototype for the analyzed reservoir-analogue. A methodology for estimating the process of siltation of artificial reservoirs (analogues) based on known silt characteristics of a specially selected prototype reservoir is developed. The criterion for choosing a reservoir prototype is a measure of analogy, calculated on the basis of the main characteristics - morphological, hydrological, physico-chemical and biological compared reservoirs. The method is based on the use of sets of complex criteria of various levels of completeness determined by the number of particular criteria included in the complex criterion with the corresponding weight coefficients on the basis of the maximum level of analogy, which is determined by a special measure - the coefficient of nonconformity or the inverse coefficient of analogy. The latter is defined as the ratio of the difference between the criteria for the analogy of the reservoirs being compared to their mean value. A comparative analysis of the values of similarity criteria for reservoirs - analogues (cascade reservoirs) and a reservoir - a prototype and a comparative analysis of the values of the similarity criterion for all combinations of pairs of reservoirs of the Dnieper cascade. On this basis, a matrix of differences in the reservoirs of analogues is constructed, which makes it possible to estimate the possibility of using the similarity method, using as an analogue one of the reservoirs of the cascade, if it satisfies the requirements of analogy.

Keywords: similarity criterion; information model; weight coefficient; matrix of differences; coefficient of analogies; prototype model

Введение

В природопользовании объекты исследования описываются сложными зависимостями природного и социально-экономического характера. В связи с этим при анализе экологических систем часто используют

логические методы, которые устанавливают связи между объектами. При системном анализе к числу логических относят методы индукции, дедукции, экспертных оценок и аналогии. При недостатке первичных данных, трудностях математической формализации используют метод экспертных оценок,

основанный на знаниях экспертов. В основе метода аналогий лежит положение о том, что закономерности развития одного процесса с определенными поправками можно перенести на другой процесс, для которого необходимо составить прогноз. Метод аналогий чаще всего применяют при разработке локальных прогнозов. Так, при прогнозировании экологического состояния водохранилища по ограниченной группе экологических показателей можно использовать данные прототипа для исследуемого или проектируемого водохранилища (аналога), которое находится в геосистеме близкой по характерным показателям к геосистеме аналога [1-7].

Подобие искусственных водохранилищ (ИВ) определяется близостью их параметров и характеристик. В связи с этим подбор критериев аналогии, по сути, является задачей многокритериального сравнительного анализа, что диктует необходимость, с одной стороны, выбора параметров искусственных водохранилищ в решающей степени, определяющих те характеристики водохранилищ, которые отражают их изучаемые свойства и, соответственно, синтеза критериев аналогии, обеспечивающих решение задачи выбора водоёма-прототипа для анализируемого водоема - аналога.

Моделью-прототипом может служить специально созданное гидротехническое сооружение, оборудованное таким образом, чтобы на входе формировались такие процессы, которые отражают процессы в водохранилище, которое нуждается в прогнозе тех или иных процессов, например, процессов заиления. Для выбора значений настраиваемых параметров должны использоваться специально разработанные критерии аналогии. В качестве таких критериев могут быть использованы различные относительные характеристики, которые являются ключевыми при исследовании конкретной локальной задачи, соответствующих процессов, протекающих в водохранилище в условиях конкретной геосистемы, включающей водоем, водосборный бассейн, климатические и другие географические условия [8-12].

Цель работы

Для моделирования процессов заиления искусственных водохранилищ (ИВ), создания информационной модели, необходима информация о текущем состоянии искусственного водохранилища, территории водосбора, а также их состояния за период эксплуатации водохранилища.

Оценка процессов заиления требует проведения большого объема различных расчетов: балансовых расчетов (энергии и вещества), характеризующих структуру природных комплексов меньшего ранга (аквасистем, зон, участков, биотопов); разработку моделей (гидравлических, гидрологических); оценки степени антропогенного

воздействия на водоем (внесение вещества в водоем); оценки динамики водоема.

Изложение основного материала

Важным этапом создания информационной модели прототипа является настройка и верификация модели. Проблемой является отсутствие достаточных объемов информации об экологическом состоянии ИВ, поэтому для выбора настраиваемых параметров и их весовых коэффициентов должна быть разработана соответствующая методика оценки степени аналогии или уровня подобия. В основу такой методики в работе предлагается использовать наборы комплексных критериев различного уровня полноты, определяемых количеством частных критериев, входящих в комплексный критерий с соответствующими весовыми коэффициентами. Эти весовые коэффициенты определяются путем выбора на основе максимального уровня аналогии. Уровень подобия определяется коэффициентом аналогии, который равен модулю отношения разности критериев аналогии сравниваемых водохранилищ к их среднему значению. Изменение уровня аналогии определяется разностью вычисленных комплексных критериев для обучающей пары условных (виртуальных) идентичных водохранилищ. Виртуальные идентичные водохранилища формируются на выбранном водохранилище путем фрагментации водохранилища на малые элементы поперечными сечениями. Таким образом, в качестве идентичных водохранилищ используются две эквивалентные части (ИВ1 и ИВ2) одного и того же водохранилища путем суммирования, соответственно, четных (ИВ1) и нечетных (ИВ2) дискретных элементов площади ИВ. На этой основе множества четных и нечетных элементов такой фрагментации, соответственно, относятся к двум условным идентичным водоемам, которые сравниваются по выбранным критериям. На основе предложенного подхода были выполнены сравнительные оценки заиления искусственных водохранилищ Днепроовского каскада в качестве искусственного водохранилища – прототипа использовался участок водохранилища реки Самара, от Игреньского моста до Приднепровского (Самарское водохранилище). Выбор данного участка основан на феноменологических оценках подобия морфометрических характеристиках Днепроовского искусственного водохранилища и Самарского водохранилища. Более точные оценки подобия выполняются на основе критериев аналогии ИВП и ИВА. Расчет первичных критериев аналогии (ИВП и ИВА) производится на основе разработанной информационной модели. Шесть водохранилищ Днепроовского каскада являются водохранилищами – аналогами.

Обсуждение результатов

Ниже приведен список первичных критериев (индексы обозначений упорядочены), обусловленный доступностью получения исходных данных по водохранилищам Днепровского каскада, для их расчета.

- K_{11} – показатель площади, отношение площади зеркала водоема к площади его водосбора,
- K_{12} – отношение годового объема поступающей воды к объему водохранилища в период НПУ,
- K_{13} – отношение малой оси к большой оси,
- K_{14} – коэффициент извилистости, отношение длины береговой линии к длине окружности круга, имеющего площадь, равную площади водоема,
- K_{15} – коэффициент емкости, отношение средней глубины к максимальной глубине,
- K_{21} – удельный водосбор, отношение площади водосбора к площади зеркала,
- K_{22} – лесистость, %;
- K_{23} – распаханность, %;
- K_{51} – мутность воды.

Результаты расчета первичных критериев приведены в таблице 1, в которой обозначено: ИВП – искусственное водохранилище - прототип (Самарское),

- A1 – Киевское водохранилище,
- A2 – Каневское водохранилище,
- A3 – Кременчугское водохранилище,
- A4 – Днепродзержинское водохранилище,
- A5 – Днепровское водохранилище,
- A6 – Каховское водохранилище.

Таблица 1 – Значения первичных критериев

Критерий	Самар-ское (ИВП)	Киевское (A1)	Каневское (A2)	Кременчуг-ское (A3)	Днепродзе-ржинское (A4)	Днепров-ское (A5)	Каховское (A6)
K11	12,73	259,0	354	169,8	765	1107	221
K12	0,44	12,82	18,39	3,54	19,51	14,49	2,61
K13	0,33	0,25	0,08	0,19	0,14	0,09	0,11
K14	1,30	1,97	1,72	3,12	2,02	2,61	3,51
K15	0,20	0,28	0,19	0,3	0,27	0,15	0,24
K22	0,22	0,29	0,23	0,12	0,1	0,12	0,14
K23	0,39	0,22	0,26	0,4	0,48	0,41	0,39
K51	1,8	0,45	0,55	0,47	0,68	0,58	0,49

Для формирования комплексных критериев определены весовые коэффициенты первичных критериев. В оценке весовых коэффициентов принимали участие пять экспертов-экологов (обозначены \mathcal{E}_i , $i = 1, 2, \dots, 5$). Результаты экспертного определения значений весовых коэффициентов приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Нормированные первичные критерии

Критерий	Самарское (ИВП)	Киевское (A1)	Каневское (A2)	Кременчуг-ское (A3)	Днепродзе-ржинское (A4)	Днепров-ское (A5)	Каховское (A6)
K11	0	0,23	0,310	0,14	0,69	1	0,19
K12	0	0,650	0,94	0,16	1	0,74	0,11
K13	1	0,68	0	0,43	0,24	0,03	0,11
K14	0	0,29	0,19	0,82	0,33	0,59	1
K15	0,33	0,84	0,23	1	0,79	0	0,57
K22	0,62	1	0,68	0,09	0	0,11	0,21
K23	0,65	0	0,15	0,68	1	0,73	0,65
K51	1	0	0,07	0,02	0,17	0,1	0,03

Таблица 3 – Весовые коэффициенты первичных критериев

Критерии	\mathcal{E}_1	\mathcal{E}_2	\mathcal{E}_3	\mathcal{E}_4	\mathcal{E}_5	C_{ij}
K ₁₁	0,10	0,12	0,07	0,12	0,09	0,100
K ₁₂	0,15	0,12	0,18	0,18	0,15	0,156
K ₁₃	0,01	0,03	0,02	0,04	0,02	0,024
K ₁₄	0,03	0,06	0,04	0,05	0,03	0,042
K ₁₅	0,10	0,09	0,11	0,14	0,12	0,112
K ₁₆	0,04	0,07	0,06	0,05	0,08	0,060
K ₂₁	0,12	0,08	0,10	0,07	0,05	0,084
K ₂₂	0,03	0,04	0,05	0,03	0,06	0,042
K ₂₃	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,026
K ₃₁	0,05	0,04	0,02	0,04	0,01	0,032
K ₅₁	0,35	0,32	0,33	0,26	0,35	0,322

Расчет комплексных критериев.

На основе данных таблиц 1, 2 и 3 выполнены расчеты комплексных критериев аналогии искусственных водохранилищ прототипа и аналогов (Днепровский каскад водохранилищ) в соответствии с выражениями:

$$K_1 = 0,1K_{11} + 0,156K_{12} + 0,024K_{13} + 0,042K_{14} + 0,112K_{15} + 0,06K_{16}, \quad (1)$$

$$K_2 = 0,084K_{21} + 0,042K_{22} + 0,025K_{23} \quad (2)$$

$$K_3 = 0,032K_{31}, \quad (3)$$

$$K_5 = 0,322K_{51}, \quad (4)$$

$$K_{\text{сум}} = K_1 + K_2 + K_3 + K_5. \quad (5)$$

Результаты расчета представлены в таблице 4.

Значения $K_{\text{сум}}$ пронормированы по кластеру рассматриваемых для сравнения водохранилищ в соответствии с выражением:

$$Q_{ai} = K_{Ai} - K_{\text{min}} / K_{\text{max}} - K_{\text{min}} \quad (6)$$

где $i = 1, 2, \dots, 6$, $K_{\Pi} = K_{A6}$.

Таблица 4 – Комплексные критерии аналогии

Комплексные критерии подобия	$K_{ИВП}$	K_{A1}	K_{A2}	K_{A3}	K_{A4}	K_{A5}	K_{A6}
K_1	0,061	0,246	0,212	0,197	0,333	0,240	0,145
K_2	0,126	0,045	0,035	0,026	0,025	0,027	0,025
K_3	0,322	0,000	0,024	0,005	0,055	0,041	0,010
K_5	0,509	0,291	0,271	0,228	0,413	0,308	0,180
$K_{сум}$	0,061	0,246	0,212	0,197	0,333	0,240	0,145

Оценка степени аналогии выполнена на основе определения меры отличия в соответствии с выражением:

$$Q_{oi}^0 = \frac{|K_n - K_a|}{K_n + K_a}, \quad 7)$$

Очевидно, что максимальное значение эта мера принимает, если в рассмотренном нормированном ряду значение критерия водохранилища-прототипа принимает одно из граничных значений 0 или 1. В этом случае максимально будет отличаться водохранилище – аналог, для которого значение критерия в нормированном ряду примет значения 1 или 0, соответственно.

Результаты для водохранилищ Днепроовского каскада представлены в таблице 5

Таблица 5 – Мера отличия критериев подобия водохранилищ прототипа и аналогов

Π	A1	A2	A3	A4	A5	A6
$K_{\text{ИВП}}$	K_{o1}	K_{o2}	K_{o3}	K_{o4}	K_{o5}	K_{o6}
0	1,000	0,337	0,275	0,707	0,144	0,389

В результате сравнения данных из таблицы 5 получим следующий иерархический ряд рассмотренных пар водохранилищ:

ИВП-A5, ИВП-A3, ИВП-A2, ИВП-A6, ИВП-A4 ИВП-A1.

В соответствии с этим иерархический ряд ИВ по уровню аналогии (несоответствия) представлен в следующей таблице 6.

Таблица 6 – Иерархический ряд водоемов аналогов по коэффициентам несоответствия и аналогии

Водоем	Значение	Уровень несоответствия	Уровень аналогии
A5	0,144	минимум	максимум
A3	0,275		
A2	0,337		
A6	0,389		
A4	0,707		

Проведя аналогичные расчеты для всех сочетаний пар водохранилищ- аналогов, получим следующую матрицу отличий:

Таблица 7 – Матрица попарных отличий водохранилищ аналогов

	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	0,00	0,50	0,57	0,17	0,75	0,44
A2	0,50	0,00	0,10	0,35	0,40	0,07
A3	0,57	0,10	0,00	0,44	0,31	0,17
A4	0,17	0,35	0,44	0,00	0,66	0,29
A5	0,75	0,40	0,31	0,66	0,00	0,46
A6	0,44	0,07	0,17	0,29	0,46	0,00

Оценка уровня заиления выполнялась по трем методикам. Первая методика основана на использовании информационной модели водохранилища. Вторая методика основана на результатах оценки объема заиления, на базе экспериментальных данных о мутности воды в водохранилище-прототипе (сентябрь 2015 – сентябрь 2016 г.) а также лабораторного определения скорости осаждения взвешенных веществ в воде водохранилища. Третья методика основана на прямых измерениях объемов наилка, осевшего на дно Самарского водохранилища в период сентябрь 2015 – сентябрь 2016 г.

Результаты расчетов по трем методикам лежат в диапазоне 2,99 -3,5 см средней толщины годового слоя отложений. Объем W_n и масса M_n наилка, образованного в 2015-2016 г. в Самарском водохранилище при показателе плотности речного ила $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ составил:

1. Методика 1
 $W_n = 2,05 \cdot 10^5 \text{ м}^3$, $M_n = 3,28 \cdot 10^5 \text{ т}$, $h = 3,34 \text{ см}$
2. Методика 2
 $W_n = 2,8 \cdot 10^5 \text{ м}^3$, $M_n = 4,48 \cdot 10^5 \text{ т}$, $h = 3,27 \text{ см}$
3. Методика 3
 $W_n = 2,4 \cdot 10^5 \text{ м}^3$, $M_n = 3,84 \cdot 10^5 \text{ т}$, $h = 4,26 \text{ см}$

Для валидации методики, сравнивались данные оценки годовых отложений (средняя толщина годового осадка) в Днепроовском ИВ с данными, полученными учеными ИППЭ НАН Украины. По их расчетам оценка среднего годового слоя отложений составила 2,7 см/год [12]. Для столь сложных объектов оценки, зависящих от большого числа факторов, оценки представляются достаточно близкими, что позволяет утвердительно судить об эффективности методик

Оценки заиления водохранилищ Днепроовского каскада в соответствии с предложенной методикой осуществляется по следующему алгоритму.

1. Формируется таблица исходных данных для пересчета оценок заиления (табл.8).

Таблица 8 – Исходные данные для пересчета оценок заиления

Параметры	ИВП	A1	A2	A3	A4	A5	A6
N	1	93,25	65	337,5	61,25	82,5	457,5
K _{Мп}	1	0,25	0,31	0,26	0,38	0,32	0,27
W*10 ³ , м ³	2,4	55,95	47,67	211,50	55,53	63,80	299,51
M*10 ³ , т	3,84	89,52	76,27	338,40	88,85	102,08	479,22

2. Определяется соотношение объемов воды в водохранилищах прототипа и аналогов:

$$n = W_A / W_{П.} \quad (8)$$

3. Производится расчет средних значений коэффициентов мутности водохранилищ

$$m_{Aic} = m_{12} + m_{A1...+}, m_{An}. \quad (9)$$

4. Вычисляется средний коэффициент относительной мутности водохранилища:

$$K_{Mi} = m_{Aic} / m_{П.} \quad (10)$$

Таблица 9 – Средние значения коэффициента относительной мутности

Параметры	ИВП	A1	A2	A3	A4	A5	A6
m _{Aic}	1,8	0,45	0,55	0,47	0,68	0,58	0,491

5. Определяются объемы и массы наилка в водохранилищах – аналогах:

$$W_{Ai} = n_i W_n K_{Mi}, \quad (11)$$

$$M_{Ai} = n_i M_n K_{Mi}, \quad (12)$$

Выводы

На основании предложенного метода аналогии рассчитаны значения критериев аналогии для водохранилищ Днепровского каскада, а также для водохранилища – прототипа (Самарского). Выполнен сравнительный анализ значений критериев аналогии водохранилищ – аналогов (водохранилищ каскада) и водохранилища – прототипа. Также выполнен сравнительный анализ значений критерия подобия всех сочетаний пар водохранилищ Днепровского каскада. На этой основе построена матрица отличий водохранилищ аналогов, которая позволяет оценить возможность применения метода подобия, используя

в качестве аналога одно из водохранилищ каскада, если оно удовлетворяет требованиям аналогии. Масса и объем выпадающего наилка для каскада Днепровских водохранилищ определялись с разной мерой достоверности, определяемой коэффициентом несоответствия.

Список литературы

1. Савичев, О. Г. Регулирование речного стока / О. Г. Савичев, С. Ю. Краснощёков, Н. Г. Наливайко // Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 114 с.
2. ESRI White paper ArcGis 3D Analyst. 3D visualization, topographical analysis, surface construction. - 2002. - 14с.
3. Шапар, А. Г. Систематизация задач наукового забезпечення переводу території басейну р. Дніпро до сталого функціонування / А. Г. Шапар, О. О. Скрипник, С. М. Сметана // 36. наук. праць ІППЕ. Екологія і природокористування. – 2012. – вип. 15. – С. 12–23.
4. Shapar, A. Determination of bottom sediments intensity accumulation in samara gulf of dneiper reservoirs using geographic information systems (GIS)» / Шапар А., Skrypnyk O., Taranenko O., Dubovik D. // Екологічна Безпека. – 2015. – № 1/2015 (19). – С. 33-36.
5. Дубовик, Д. Д. Приближенная методика оценки объема заиления водохранилища прототипа / Д. Д. Дубовик – Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – 2016. – вып. 18. – с. 164.
6. Carlson, R. E. A Trophic State Index for lakes / R. E. Carlson // Limnol. And Oceanography. – 1977. - 22(2). - P. 361-369. – doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
7. Kloiber, S. M. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data / S. M. Kloiber, P. L. Brezonik, L. G. Olmanson, M. E. Bauer // Remote Sensing of Environment. – 2002. - 82, N 1. – P. 38-47. – doi: 10.1016/S0034-4257(02)00022-6.
8. Brezonik, P. L. Landsat-based Remote Sensing of Lake Water Quality Characteristics, Including Chlorophyll and Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) / P. L. Brezonik, K. D. Menken, M. E. Bauer // Lake and Reservoir Management. – 2005. – 21(4). – P. 373-382. – doi: 10.1080/07438140509354442.
9. Starodubtsev, V. M. Formation of delta landscapes in the upper Dnieper cascade reservoirs / V. M. Starodubtsev, V. A. Bohdanets, S. V. Yatsenko [et al.] // Electronic Journal "Scientific reports NUBiP of Ukraine". — 2010. — No 5 (21). URL: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2010_5/10svmdrc.pdf. – doi: 10.26641/2307-0404.2014.2.28460.
10. Shapar, O. O. Determination of actual ecological parameters of the Dnieper reservoirs using geoinformation technologies / A. G. Shapar, O. O. Skrypnyk, O. S. Taranenko, D. D. Dubovyk // Ecology and Environmental Sciences. — 2014 — Vol. 18. — P. 139—146.
11. Kress, H. Comparison of Preconstruction and 2003 Bathymetric and Topographic Surveys of Lake McConaughy, Nebraska / W. H. Kress, S. K. Sebree, G. R. Littin, M. A. Drain, M. E. Kling // Scientific Investigations Report, 2005-5040. Published by U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey. — 2005. — 19 p. URL: <http://pubs.usgs.gov/sir/2005/5040/sir2005-5040.pdf>.

12. **Дубовик, Д. Д.** Экспериментальное определение донного рельефа на базе исследований нижнего участка р. Самара / **Д. Д. Дубовик, Ю.І. Борохович** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 32 (1254). – С. 98-103. – doi:10.20998/2413-4295.2017.32.16.

Bibliography (transliterated)

1. **Savichev, O. G., Krasnoshchëkov, S. YU., Nalivajko, N. G.** Regulirovanie rechnogo stoka. Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009, 114 s.
2. ESRI White paper ArcGis 3D Analyst. 3D visualization, topographical analysis, surface construction, 2002, 14.
3. **Sparar, A. G., Skripnik, O. O., Smetana, S. M.** Sistematizaciya zadach naukovogo zabezpechennya perevodu teritorii basejnu r. Dnipro do stalogo funkcionuvannya. *Zb. nauk. prac' IPPE "Ekologiya i prirodokoristuvannya"*, 2012, **15**, 12–23.
4. **Shapar, A., Skrypnyk, O., Taranenko, O., Dubovik, D.** «Determination of bottom sediments intensity accumulation in samara gulf of dnierper reservoirs using geographic information systems (GIS)». *Ekologichna bezpeka*, 2015, **1/2015 (19)**, 33-36.
5. **Dubovik, D. D.** Priblizhennaya metodika ocenki ob"ema zaileniya vodohranilishcha prototipa. *Vestnik Nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Har'kovskij politekhnicheskij institut*, 2016, **18**, 164.
6. **Carlson, R. E.** A Trophic State Index for lakes. *Limnol. And Oceanography*, 1977, **22(2)**, 361-369. – doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
7. **Kloiber, S. M., Brezonik, P. L., Olmanson, L. G., Bauer, M. E.** A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **82**, 1, 38-47. – doi: 10.1016/S0034-4257(02)00022-6
8. **Brezonik, P. L., Menken, K. D., Bauer, M. E.** Landsat-based Remote Sensing of Lake Water Quality Characteristics, Including Chlorophyll and Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) *Lake and Reservoir Management*, 2005, **21(4)**, 373-382. – doi: 10.1080/07438140509354442.
9. **Starodubtsev, V. M., Bohdanets, V. A., Yatsenko, S. V. [et al.]** Formation of delta landscapes in the upper Dnieper cascade reservoirs. *Electronic Journal "Scientific reports NUBiP of Ukraine"*, 2010, **5 (21)**. Available at: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2010_5/10svmdrc.pdf. – doi: 10.26641/2307-0404.2014.2.28460.
10. **Shapar, O. O., Skrypnyk, O. O., Taranenko, O. S., Dubovyk, D. D.** Determination of actual ecological parameters of the Dnieper reservoirs using geoinformation technologies. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **18**, 139-146.
11. **Kress, H., Seabee, S. K., Littin, G. R., Drain, M. A., Kling, M. E.** Comparison of Preconstruction and 2003 Bathymetric and Topographic Surveys of Lake McConaughy, Nebraska. *Scientific Investigations Report, 2005-5040. Published by U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey*, 2005, 19 p. Available at: <http://pubs.usgs.gov/sir/2005/5040/sir2005-5040.pdf>.
12. **Dubovyk, D., Borokhovych, Y.** Experimental determination of bottom relief on the basis of studies of the lower part of the river. Samara. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **32 (1254)**, 98–103 doi:10.20998/2413-4295.2017.32.16.

Сведения об авторах (About authors)

Дубовик Денис Дмитриевич – младший научный сотрудник, Институт технической механики и государственное космическое агентство НАН Украины, Днепр, Украина; e-mail: denic3d@gmail.com.

Denys Dubovyk – Junior Researcher, Institute of Technical Mechanics and State Space Agency of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine, e-mail: denic3d@gmail.com.

Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Дубовик, Д. Д. Методические особенности оценки процессов заиления искусственных водохранилищ на основе метода аналогии / **Д. Д. Дубовик** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 145-150. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.22.

Please cite this article as:

Dubovyk, D., Methodological features of the assessment of silting processes of artificial reservoirs based on the analogy method. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16 (1292)**, 145-150, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.22.

Будь ласка, посилайте на цю статтю наступним чином:

Дубовик, Д. Д. Методичні особливості оцінки процесів замулення штучних водосховищ на основі метода аналогії / **Д. Д. Дубовик** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 145-150. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.22.

АНОТАЦІЯ Методика оцінки процесу замулення штучних водосховищ (аналогів) на основі відомих характеристик замулення спеціально обраного водойми-прототипу. Критеріями вибору водойми-прототипу служить міра аналогії, розрахована на основі основних характеристик - морфологічних, гідрологічних, фізико-хімічних і біологічних порівнюваних водосховищ. В основу методики в роботі пропонується використовувати набори комплексних критеріїв різного рівня повноти, що визначаються кількістю приватних критеріїв, що входять в комплексний критерій з відповідними ваговими коефіцієнтами на основі максимального рівня аналогії, що визначається спеціальною мірою - коефіцієнтом невідповідності або зворотним йому коефіцієнтом аналогії. Останній визначається як модуль відносини різниці критеріїв аналогії порівнюваних водосховищ до їх середнього значення.

Ключові слова: критерій подібності; інформаційна модель; ваговий коефіцієнт; матриця відмінностей; коефіцієнт аналогії; модель-прототип.

Поступила (received) 05.05.2018

УДК 641.4:664.8.037:664.149:634.7

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.23

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ЗАМОРОЖЕНИХ СОЛОДКИХ СТРАВ З ФЕЙХОА

I. М. КАЛУГІНА*, Л. М. ТЕЛЕЖЕНКО, Н. А. ДЗЮБА

кафедра технології ресторанного і оздоровчого харчування, Одеська національна академія харчових технологій,
м. Одеса, УКРАЇНА
*email: ik101273@gmail.com

АНОТАЦІЯ Стаття присвячена розробці технології заморожених солодких страв, а саме – сорбету з фейхоа. В роботі показана доцільність використання цінної для профілактичного харчування сировини, адже ягоди фейхоа містять майже добову норму йоду (0,07-0,1 мг/100 г) та комплекс біологічно-активних речовин. Показано, що для отримання якісного за споживчими характеристиками сорбету рекомендована масова частка фейхоа складає 35% до загальної маси готового продукту. Досліджено вплив способу виробництва замороженої солодкої страви на стадіях заморожування та збивання сорбетної маси на консистенцію продукту, а саме – її однорідність, пишність, дисперсність і рівномірність розподілення повітряної фази та кристалів льоду. Мікрофотографії структури сорбетів з фейхоа дозволили встановити кількісне і якісне розподілення бульбашок повітря в дисперсній фазі замороженої маси. Встановлено, що при дотриманні визначених технологічних режимів виробництва сорбету з фейхоа середній розмір бульбашок повітря становить 40-60 мкм, що відповідає рекомендованим значенням. При дотриманні рецептури та реалізації запропонованої технології, досягається задовільне значення показника збитості сорбету з фейхоа – 65-76 %. Визначено рекомендовану тривалість збивання сорбету з фейхоа для досягнення необхідного показника збитості яка складає – 90-120 с.

Ключові слова: фейхоа; сорбет; органолептичні показники; консистенція; мікроструктура; заморожування; збивання; збитість.

THE STRUCTURE INVESTIGATION OF THE FROZEN SWEET DISHES FROM FEIJOA

I. KALUGINA*, L. TELEGENKO, N. DZYUBA

Department of restaurant and healthy food technologies, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, UKRAINE

ABSTRACT The article is devoted to the technology of frozen sweet dishes development. The purpose of this work is the scientific substantiation and development to technology of the sweet dishes with high nutritional value, namely, sorbet with feijoa berries. The work demonstrates the feasibility of using valuable raw materials for preventive nutrition. After all, feijoa berries contain almost a daily rate of iodine (0,07-0,1 mg/100 g) and a complex of biologically active substances. Feijoa is rich to biologically active catehins and leicoanthocyanins, essential oils, organic acids and contain vitamin C in high concentrations. Berries of feijoa are rich in pectin, so they can be good base for structured desserts, such as sorbets. The methods of solving this goal were establishing the optimal ratio of the new sweet dish recipe components, studying the organoleptic characteristics of modes observance, studying the microstructure of sorbet with feijoa, optimizing the preparation parameters and modes of sorbet mass from feijoa. In this work, the standard methods of studying the organoleptic and physico-chemical properties of the product were used. The microstructure study of sorbet samples was carried out using a portable microscope "Celestron Deluxe" by direct determination of the water bubbles and crystals size using the AMCap program with further photos in the Bandicam program.

It is shown that in order to obtain a high-quality consumer characteristics of the sorbet, the recommended feijoa mass fray is 35% of the finished product total weight. There was studied the influence of the frozen sweet dish production method on the freezing and mixing of sorbet mass stages on the product consistency, namely, its homogeneity, splendor, dispersion and uniformity of the air phase and ice crystals distribution. Microphotographs of the feijoa sorbets structure allowed to establish a quantitative and qualitative distribution of air bubbles in the frozen mass dispersed phase. It is established that with the certain technological modes observance of feijoa sorbets production, the average size of air bubbles is 40- 60 μm, which corresponds to the recommended values. Under compliance with the recipe and the implementation of the proposed technology, a satisfactory value of the feijoa sorbet loss rate is achieved – 65-76%. The recommended length of the feijoa sorbet pick up has been determined to achieve the required loss rate of 90-120 s.

There was made a comparative analysis of organoleptic and physico-chemical parameters, microstructures of sorbets, which were prepared by different methods. On this basis, there were substantiated the basic processing modes and a sorbet technology from valuable raw materials for prophylactic nutrition – feijoa, was developed.

Key words: feijoa; sorbet; organoleptic parameters; consistency; microstructure; freezing; kneading; defecation.

Вступ

Аналіз структури харчування сучасної людини свідчить про дефіцит незамінних компонентів їжі - біологічно-активних речовин. Нестача есенціальних

макро- і мікронутрієнтів в раціонах харчування населення, а також постійний вплив на організм людини комплексу екопатогенів навколишнього середовища, психоемоційні стреси, на тлі гіподинамії, до якої схильна більшість людей призводить до

хвороб, передчасної старості і скорочення життя. Для корекції харчового статусу населення необхідна розробка технології нових продуктів харчування, в тому числі страв з підвищеною харчовою цінністю.

Для розширення асортименту солодких страв з підвищеною харчовою цінністю певний інтерес представляють сорбети на основі нетрадиційної плодово-ягідної сировини. Сорбет – це заморожена солодка страва, яку готують з плодово-ягідної сировини без використання молочних продуктів. Такі солодкі страви, за рахунок високого вмісту в рецептурі ягід і плодів, багаті вітамінами, мінеральними речовинами, органічними кислотами і пектинами.

При виробництві солодких страв підвищеної харчової цінності, в тому числі сорбетів, є доцільним використання місцевих і нетрадиційних видів сировини, збалансованих за вмістом біологічно-активних речовин. Унікальною сировиною за хімічним складом для розробки таких солодких страв як сорбети є ягоди фейхоа.

Мета роботи

Метою роботи є наукове обґрунтування та розробка технології солодких страв з підвищеною харчовою цінністю, а саме сорбетів з ягодами фейхоа.

Для досягнення мети були визначені такі завдання:

- встановити оптимальне співвідношення рецептурних компонентів нової солодкої страви;
- дослідити органолептичні показники сорбету з фейхоа;
- вивчити мікроструктуру сорбетів з фейхоа;
- оптимізувати параметри та режими приготування сорбетної маси з фейхоа.

Методи та об'єкти дослідження

У цій роботі були використані стандартні методи дослідження органолептичних та фізико-хімічних властивостей продукту. Дослідження мікроструктури зразків сорбету проводили з використанням портативного мікроскопу «Celestron Deluxe» методом прямого визначення розмірів бульбашок та кристалів води за допомогою програми AMCap з подальшою фотографією в програмі Bandicam. Фотозйомку вели в світлі при збільшенні в 700 разів [1]. Метод контролю збитості заморожених десертів заснований на вимірі маси фіксованого об'єму суміші до збивання та насичення киснем і того ж об'єму суміші (солодкої страви), насиченої киснем та проведенні розрахунку збитості десерту [2].

Для розробки рецептурної композиції й технології сорбету з фейхоа в якості прототипу було обрано рецептуру № 10.48 «Сорбет лимонний» [3], який готували з цукрового сиропу з додаванням лимонного соку та шафрану.

Виклад основного матеріалу

Ягоди фейхоа є унікальною сировиною за хімічним складом. Це зелені довгасті ягоди, покриті восковою плівкою, з приємним пряним ароматом та солодким смаком [4, 5]. Фейхоа походить з Південної Америки, але є одною з найбільш зимостійких субтропічних рослин і здатна без ушкоджень витримувати короточасні заморозки (до -15°C). Довготривалі експерименти з субтропічними рослинами дозволили українським селекціонерам та фахівцям з питань сільського господарства вирощувати нові зимостійкі види та розробити техніку культивування для вирощування фейхоа на відкритому ґрунті з позитивними результатами. Ця практика актуальна для південних областей України, таких як Одеська, Херсонська та Миколаївська.

Фейхоа – це новий продукт для українців, але він вже став популярним серед дієтологів та ендокринологів, які рекомендують його до вживання людям з порушеннями функцій щитовидної залози та для осіб, що мають значні інтелектуальні стреси.

Основною особливістю фейхоа є високий вміст мікроелементу йоду, масова частка якого приблизно така ж, як і у морепродуктах. Так, ягоди фейхоа містять органічно зв'язаний йод у концентрації, що дорівнює 0,07-0,1 мг/100 г [6, 7], тоді як рекомендоване добове споживання у дорослих складає 0,14-0,2 мг/100 г. Фейхоа, які культивуються в морських районах, особливо багаті йодом. Крім того, йод цих ягід є водорозчинним і може максимально засвоюватися організмом людини.

В ягодах фейхоа містяться також біологічно активні речовини – кахетіни і лейкоантоціани, вітамін С, ефірні олії, які є потужними антиоксидантами та імуномодуляторами, зменшують ризик виникнення онкологічних захворювань і перешкоджають старінню організму [8, 10, 11, 12].

Високий вміст вітаміну С робить фейхоа відмінним природним антиоксидантом [13, 15].

Також виявлена загальна антиоксидантна активність екстракту фейхоа [15].

Навіть сезонне споживання цих ягід допомагає організму людини впоратися зі стресами, зробити його більш стійким до інфекцій.

Ягоди фейхоа містять велику кількість пектину, який має властивість зв'язувати іони важких і радіоактивних металів [14], мають потужний антимікробний ефект [9].

Ягоди фейхоа мають солодкий смак з пікантними пряними відтінками, тому розробка солодких страв на їх основі є логічною. Наявність пектину обумовлює перспективність сировини для виготовлення структурованих солодких страв, таких як сорбети. Такі солодкі страви відповідають сучасним тенденціям в ресторанній галузі, як то тенденції до споживання «легких» продуктів, за наявності шокової заморозки, льодо-міксингу та інших сучасних технологій [16].

Аналіз інформації щодо хімічного складу та органолептичних характеристик фейхоа дозволив нам розробити технологію виробництва сорбету на основі цієї сировини.

Обговорення результатів

Для дослідження було обрано чотири зразки: контрольний зразок – сорбет лимонний; сорбети з різним вмістом фейхоа, а саме: 25%, 35% та 45% до загальної маси продукту. При приготуванні сорбету з фейхоа цукор замінювали на мед, з міркувань зниження глікемічного індексу та збагачення страви цінними нутрієнтами. Для підвищення харчової цінності нової солодкої страви, в якості наповнювача використовували горіх волоський. Рецептний склад дослідних зразків наведено у таблиці 1.

Серед основних факторів, що впливають на якість готового продукту, особливу увагу приділяли таким стадіям технологічного процесу, як збивання та заморожування сорбету, від яких залежить формування основних споживчих показників цієї солодкої страви, таких як консистенція, а саме – її однорідність, пишність, дисперсність і рівномірність розподілення повітряної фази та кристалів льоду.

Таблиця 1 – Рецептний склад зразків сорбету

Сировина	Вміст, %			
	Контроль	Сорбет, 25% фейхоа	Сорбет, 35% фейхоа	Сорбет, 45% фейхоа
Лимони	5	-	-	-
Цукор	25	-	-	-
Насіння коріандру	0,05	-	-	-
Шафран	0,05	-	-	-
Фейхоа	-	25	35	45
Горіхи волоські	-	10	10	10
Мед	-	10	10	10
Вода	69,9	55	45	35

Аналіз профілограми показників консистенції зразків сорбету (рис. 1.) свідчить про кращі органолептичні показники консистенції сорбету з фейхоа порівняно з контрольним зразком. Зразок сорбету з 35%-вим вмістом фейхоа характеризується найкращою консистенцією, тому його й оберемо за основу. Проте, такі значимі показники структури як тонкодисперсність, пишність та однорідність все ж потребують корекції.

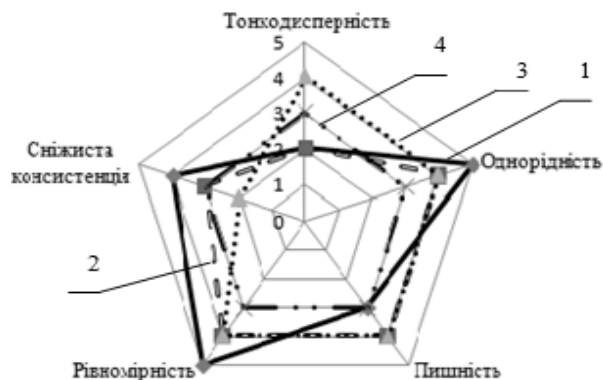


Рис. 1 – Профілограма показників консистенції сорбетів: 1 – Контроль; 2 – сорбет, 25% фейхоа; 3 – сорбет, 35% фейхоа; 4 – сорбет, 45% фейхоа

Для удосконалення структури сорбету та його органолептичних показників проводили дослідження впливу способу приготування замороженої солодкої страви на стадіях заморожування та збивання сорбетної маси. Було обрано три способи, які представлені на функціональній схемі виробництва сорбету з фейхоа (рис 2.).

Одразу ж після заморожування зразків сорбетів приготованих різними способами проводили дослідження їх мікроструктури. Мікрофотографії структури сорбетів з фейхоа відображають кількісне і якісне розподілення бульбашок повітря в дисперсній фазі замороженої маси. Як видно з рис. 3, щільність бульбашок в замороженому зразку сорбету, який було приготовлено за способом 3 вище, ніж у зразках, приготовлених за способом 1 та 2.

Встановлено, що середній розмір бульбашок повітря у сорбеті з фейхоа приготовленого за способом 1 становить 30-40 мкм, за способом 2 – 60- 70 мкм. В цих зразках сорбетів бульбашки розподілені рівномірно.

В дисперсній системі сорбетної маси, яка була приготовлена за способом 1 (рис. 3 (а)), розподілені часточки твердої фази наповнювача – подрібненого горіху волоського, що значно збільшує щільність та зменшує пишність структури сорбету. У сорбеті, який було приготовлено за способом 3 (рис. 3 (в)), розміри бульбашок повітря неоднорідні (від 20 до 120 мкм) та розподілені нерівномірно.

Дослідження, проведені Г. М. Дезентом і Т. А. Боушевим, свідчать про те, що в заморожених десертах з нормальною структурою середній розмір повітряних бульбашок не повинен перевищувати 60 мкм [17]. Отже, аналізуючи дані мікроструктури зразків сорбетів з фейхоа, можна зробити висновок, що для отримання найбільш пишної, кремоподібної, тонко дисперсної структури замороженої солодкої страви з рівномірно розподіленими та однорідними за розмірами бульбашками повітря доцільним є використання способу 2.

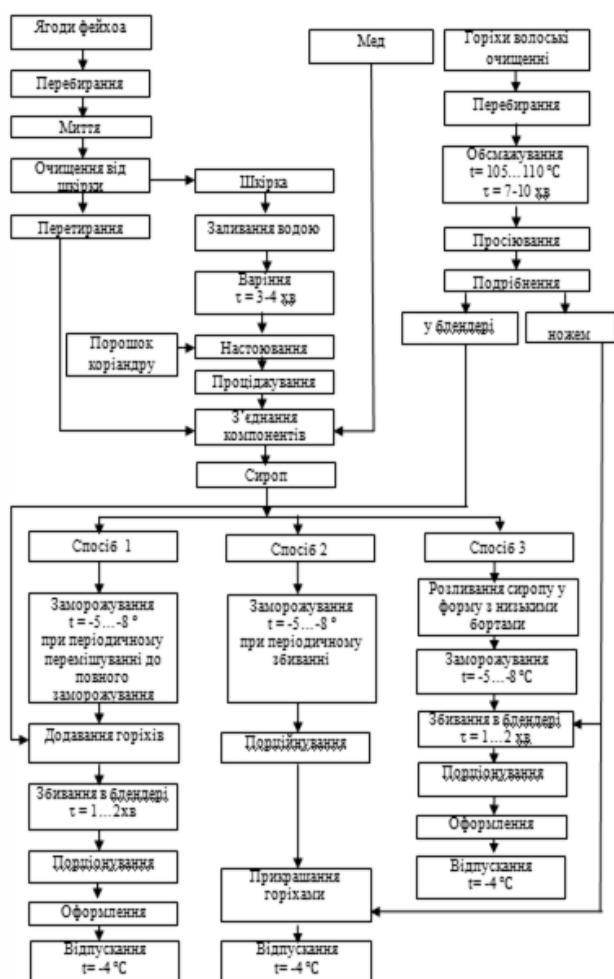


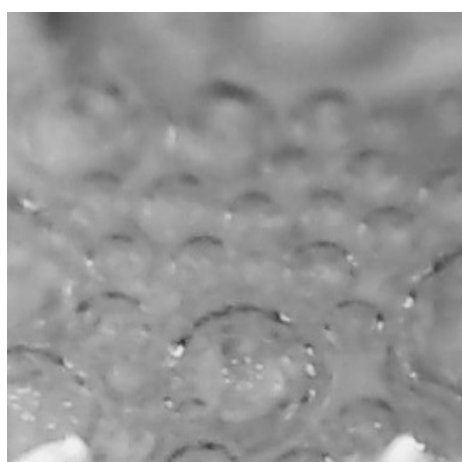
Рис. 2 – Функціональна схема виробництва сорбету з фейхоа

На наступному етапі були проведені дослідження по визначенню оптимальної збитості сорбетів. Для заморожених солодких страв, таких як сорбет, збитість – найважливіший показник, що характеризує їх структуру і консистенцію. Збитість сорбетів обумовлена ступенем насичення їх повітрям під час збивання.

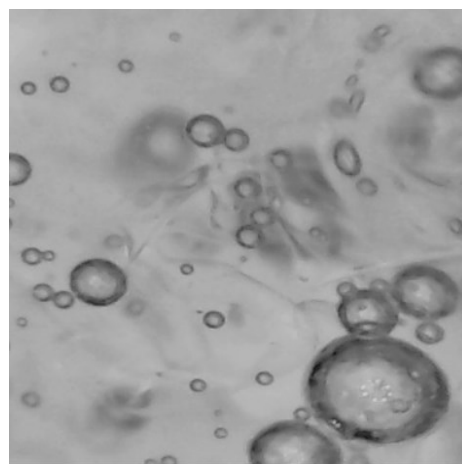
Так, для різних видів фруктового морозива і заморожених сорбетів збитість повинна бути не нижче 40-60%. При низькій збитості (15-20%) в замороженій солодкій страві утворюються великі кристали льоду [18,19]. Збільшення збитості сприяє утворенню більш ніжної і однорідної текстури продукту. Тому були проведені дослідження з визначення впливу різних способів приготування на збитість сорбету з фейхоа.



а



б



в

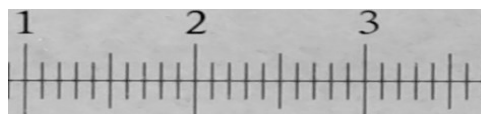


Рис. 3 – Мікрофотографії структури сорбетів з фейхоа, які готували різними способами: а – спосіб 1; б – спосіб 2; в – спосіб 3

Таблиця 2 – Збитість сорбету з фейхоа в залежності від способу приготування та тривалості збивання

Спосіб приготування сорбету	Збитість, %			
	Тривалість збивання, с			
	60	90	120	150
Спосіб 1	50	55	60	60
Спосіб 2	53	65	76	68
Спосіб 3	20	24	35	30

Встановлено, що для досягнення необхідного показника збитості тривалість збивання сорбетів становить 90-120 с (табл. 2.). При приготуванні сорбету з фейхоа за способом 3 збитість сорбету з фейхоа низька, що свідчить про недостатню насиченість замороженої солодкої страви бульбашками повітря та відповідно забиту, грубодисперсну структуру. Найкращий показник збитості (65-76 %) досягається при реалізації способу 2, який може бути рекомендованим для впровадження у заклади ресторанного господарства.

Висновки

На основі порівняльного аналізу органолептичних та фізико-хімічних показників, мікроструктури сорбетів, приготованих за різними способами обґрунтовано режими основних процесів обробки та розроблено технологію сорбету з цінної сировини для профілактичного харчування – фейхоа. Встановлено, що для отримання якісного сорбету з фейхоа повинні бути дотримані наступні вимоги:

- рекомендований вміст добавки фейхоа у сорбеті – 35% до загальної маси продукту;
- заморожування має відбуватися швидко, щоб уникнути конгломерації великих часток, а також небажаних фізико-хімічних змін продукту;
- періодичне збивання під час заморожування сорбетної маси дозволяє отримати готовий продукт з поліпшеними характеристиками консистенції.

Список літератури

1. **Власов, А. И.** Электронная микроскопия: Учебное пособие / **А. И. Власов, К. А. Елсуков, И. А. Косолапов.** М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2011. – С. 37-45.
2. **Косой, В. Д.** Инженерная реология в производстве мороженого / **В. Д. Косой, Н. И. Дунченко, А. В. Егоров.** М.: ДеЛи принт, 2014. – С. 56-61.
3. **Шалимінов, О. В.** Збірник рецептур національних страв та кулінарних виробів: Для підприємств громад. харчування всіх форм власності / **О. В. Шалимінов, Т. П. Дятченко, Л. О. Кравченко та ін.** К.: А.С.К., 2000. – С. 512.
4. **Ding, P.** Tropical Fruits / **P. Ding** // *Encyclopedia of Applied Plant Sciences (Second Edition)*. – 2017. – V.

3. – P. 431-434. – doi: 10.1016/B978-0-12-394807-6.00185-4.
5. **Pasquariello, M. S.** Agronomic, nutraceutical and molecular variability of feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret) germplasm / **M. S. Pasquariello, F. Mastrobuoni, D. Di Patre** // *Scientia Horticulturae*. – 2015. – V. 191(6). – P. 1-9. – doi:10.1016/j.scienta.2015.04.036.
6. **Roderick, J. W.** Bioactive products from fruit of the feijoa (*Feijoa sellowiana*, Myrtaceae): A review / **J. W. Roderick** // *Food Chemistry* – 2010. – V. 121(4). – P. 923-926. – doi:10.1016/j.foodchem.2010.01.047.
7. **Schotsmans, W. C.** Feijoa (*Acca sellowiana* [Berg] Burret) / **W. C. Schotsmans, A. East, G. Thorp** // *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits*. – 2011. – P. 115-135. – doi: 10.1016/j.scienta.2017.08.054.
8. **Ielpo, M. T. L.** Immunopharmacological properties of flavonoids / **M. T. L. Ielpo, A. Basile, R. Miranda** // *Fitoterapia*. – 2000. – V. 71(1). – P. 101-109. – doi: 10.1016/S0367-326X(00)00184-2.
9. **Basile, A.** Antibacterial activity in *Actinidia chinensis*, *Feijoa sellowiana* and *Aberia caffra* / **A. Basile, M. L. Vuotto, U. Violante** // *International Journal of Antimicrobial Agents*. – 1997. – V. 8(3). – P. 199-203. – doi: 10.1016/S0924-8579(97)00376-2.
10. **Bontempo, P.** Feijoa sellowiana derived natural Flavone exerts anti-cancer action displaying HDAC inhibitory activities / **P. Bontempo, L. Mita, M. Miceli** // *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*. – 2007. – V. 39(10). – P. 1902-1914. – doi: 10.1016/j.biocel.2007.05.010.
11. **Ruberto, G.** Secondary metabolites from the leaves of Feijoa sellowiana Berg / **G. Ruberto, C. Tringali** // *Phytochemistry*. – 2004. – V. 65(21). – P. 2947-2951. – doi: 10.1016/j.phytochem.2004.06.038.
12. **Poodi, Y.** Intensification of bioactive compounds extraction from Feijoa (*Feijoa sellowiana* Berg.) leaves using ultrasonic waves / **Y. Poodi, M. Bimkr, A. Ganjloo** // *Food and Bioproducts Processing*. – 2018. – V. 108(3). – P. 37-50. – doi: 10.1016/j.fbp.2017.12.004.
13. **Motevali, A.** The Effect of Different Pre-treatments on Qualitative Properties of Freeze-dried Feijoa Fruit / **A. Motevali, S. J. Hashemi** // *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Available online. – December, 2017. – doi: 10.1016/j.cjche.2017.11.011.
14. **Ortuño, C.** Combined high hydrostatic pressure and carbon dioxide inactivation of pectin methylesterase, polyphenol oxidase and peroxidase in feijoa puree / **C. Ortuño, T. Duong, M. Balaban** // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2013. – V. 82 (10). – P. 56-62. – doi: 10.1016/j.supflu.2013.06.005.
15. **Vuotto, M. L.** Antimicrobial and antioxidant activities of Feijoa sellowiana fruit / **M. L. Vuotto, A. Basile, V. Moscattiello** // *International Journal of Antimicrobial Agents*. – 2000. – V. 13(3). – P. 197-201. – doi: 10.1016/S0924-8579(99)00122-3.
16. **Kalugina, I.** The nutritional value of desserts with the addition of Gooseberry family raw materials from the Northern Black Sea Region / **I. Kalugina, L. Telegenko, Y. Kalugina** // *Ukrainian Food Journal*. – 2017. – V. 6 (3). – P. 459-469. – doi: 10.24263/2304-974X-2017-6-3-6.

17. Оленев, Ю. А. Ледообразование в мороженом / Ю. А. Оленев // *Мир мороженого и быстрозамороженных продуктов*. – 2005. – № 1. – С. 14-15.
18. Фильчакова, Н. Н. Микроскопический метод определения размеров воздушных пузырьков в мороженом / Н. Н. Фильчакова // *Холодильная техника*. – 1972. – № 9. – С. 34-36.
19. Чижова, П. Б. Влияние молочного белка и пищевых волокон на показатели качества фруктовых взбитых замороженных десертов / П. Б. Чижова, Н. В. Казакова, А. А. Творогова // *Мир мороженого и быстрозамороженных продуктов*. – 2011. – №5. – С. 16-17.
9. Basile, A., Vuotto, M. L., Violante U. Antibacterial activity in *Actinidia chinensis*, *Feijoa sellowiana* and *Aberia caffra*. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 1997, **3**(8), 199-203, doi: 10.1016/S0924-8579(97)00376-2.
10. Bontempo, P., Mita, L., Miceli, M. *Feijoa sellowiana* derived natural Flavone exerts anti-cancer action displaying HDAC inhibitory activities. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 2007, **10**(39), 1902-1914, doi: 10.1016/j.biocel.2007.05.010.
11. Ruberto, G., Tringali, C. Secondary metabolites from the leaves of *Feijoa sellowiana* Berg. *Phytochemistry*, 2004, **21**(65), 2947–2951, doi: 10.1016/j.phytochem.2004.06.038.
12. Poodi, Y., Bimakr, M., Ganjloo, A. Intensification of bioactive compounds extraction from *Feijoa* (*Feijoa sellowiana* Berg.) leaves using ultrasonic waves. *Food and Bioprocess Processing*, 2018, **3**(108), P. 37-50, doi: 10.1016/j.fbp.2017.12.004.

Bibliography (transliterated)

1. Vlasov, A. Y., Elsukov, K. A., Kosolapov, Y. A. Electron microscopy: Tutorial. *Moscow: Bauman Moscow State Technical University*, 2011, 37-45.
2. Kosoj, V. D., Dunchenko, N.Y., Ehorov, A. V. Engineering rheology in the production of ice cream. *Moscow: DeLy print*, 2014, 56-61.
3. Shalyminov, O. V., Dyatchenko, T. P., Kravchenko, L. O. Collection of recipes for national dishes and culinary products: For community enterprises eating all forms of ownership. *Kiev: A.C.K.*, 2000, 512.
4. Ding, P. Tropical Fruits. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences (Second Edition)*, 2017, **3**, 431-434, doi: 10.1016/B978-0-12-394807-6.00185-4.
5. Pasquariello, M. S., Mastrobuoni, F., Patre, D. Di. Agronomic, nutraceutical and molecular variability of feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret) germplasm. *Scientia Horticulturae*, 2015, **6**(191), 1-9, doi:10.1016/j.scienta.2015.04.036.
6. Roderick, J. W. Bioactive products from fruit of the feijoa (*Feijoa sellowiana*, Myrtaceae): A review. *Food Chemistry*, 2010, **4**(121), 923-926, doi:10.1016/j.foodchem.2010.01.047
7. Schotsmans, W.C., East, A., Thorp, G. *Feijoa* (*Acca sellowiana* [Berg] Burret). *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits*, 2011, 115-135, doi: 10.1016/j.scienta.2017.08.054.
8. Ієро, М. Т. Л., Basile, A., Miranda, R. Immunopharmacological properties of flavonoids. *Fitoterapia*, 2000, **1**(71), 101-109, doi: 10.1016/S0367-326X(00)00184-2.
13. Motevali, A., Hashemi, S. J. The Effect of Different Pre-treatments on Qualitative Properties of Freeze-dried *Feijoa* Fruit. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Available online, 2017, **12**, doi: 10.1016/j.cjche.2017.11.011.
14. Ortuño, C., Duong, T., Balaban, M. Combined high hydrostatic pressure and carbon dioxide inactivation of pectin methylesterase, polyphenol oxidase and peroxidase in feijoa puree. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2013, **10**(82), 56-62, doi: 10.1016/j.supflu.2013.06.005.
15. Vuotto, M. L., Basile, A., Moscattello, V. Antimicrobial and antioxidant activities of *Feijoa sellowiana* fruit. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 2000, **3**(13), 197–201, doi: 10.1016/S0924-8579(99)00122-3.
16. Kalugina, I., Telegenko, L., Kalugina, Y. The nutritional value of desserts with the addition of Gooseberry family raw materials from the Northern Black Sea Region. *Ukrainian Food Journal*, 2017, **3**(6), 459-469, doi: 10.24263/2304-974X-2017-6-3-6.
17. Оленев, Ю. А. Ice-making in ice-cream. *Ice-cream world in fast-frozen products*, 2005, **1**, 14-15.
18. Fylchakova, N. N. Microscopic method for determining the size of flammable bubbles in ice cream. *Refrigeration equipment*, 1972, **9**, 34-36.
19. Chyzhova, P. B., Kazakova, N. V., Tvorohova, A. A. Effect of milk protein and dietary fiber on the quality of fruit whipped frozen desserts. *Ice-cream world in fast-frozen products*, 2011, **5**, 16-17.

Сведения об авторах (About authors)

Калугіна Ірина Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент, Одеська національна академія харчових технологій, доцент кафедри технології ресторанного і оздоровчого харчування, м. Одеса, Україна; e-mail: ik101273@gmail.com.

Ірина Калугіна – Scientific Degree (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of restaurant and healthy food technology, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine, e-mail: ik101273@gmail.com.

Тележенко Любов Миколаївна – доктор технічних наук, професор, Одеська національна академія харчових технологій, професор кафедри технології ресторанного і оздоровчого харчування, м. Одеса, Україна; e-mail: telegenko@ukr.net.

Liubov Telezhenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of restaurant and healthy food technology, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine, e-mail: telegenko@ukr.net.

Дзюба Надія Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент, Одеська національна академія харчових технологій, доцент кафедри технології ресторанного і оздоровчого харчування, м. Одеса, Україна; e-mail: dzyubanadya282@gmail.com.

Nadya Dzyuba – Scientific Degree (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of restaurant and healthy food technology, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine, e-mail: dzyubanadya282@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Калугіна, І. М. Дослідження структури заморожених солодких страв з фейхоа / **І. М. Калугіна, Л. М. Тележенко, Н. А. Дзюба** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 151-157. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.23.

Please cite this article as:

Kalugina, I., Telezhenko, L., Dzyuba, N. The structure investigation of the frozen sweet dishes from feijoa. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 16(1292), 151-157, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.23.

Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Калугина, И. М. Исследование структуры замороженных сладких блюд с фейхоа / **И. М. Калугина, Л. Н. Тележенко, Н. А. Дзюба** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 151-157. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.23.

АННОТАЦИЯ Статья посвящена разработке технологии замороженных сладких блюд, а именно – сорбета из фейхоа. В работе показана целесообразность использования ценного для профилактического питания сырья, ведь ягоды фейхоа содержат почти суточную норму йода (0,07-0,1 мг /100 г) и комплекс биологически активных веществ. Показано, что для получения качественного по потребительским характеристикам сорбета рекомендованная массовая доля фейхоа составляет 35% от общей массы готового продукта. Исследовано влияние способа производства замороженного сладкого блюда на стадиях замораживания и взбивания сорбетной массы на консистенцию продукта, а именно – ее однородность, пышность, дисперсность и равномерность распределения воздушной фазы и кристаллов льда. Микрофотографии структуры сорбетов из фейхоа позволили установить количественное и качественное распределения пузырьков воздуха в дисперсной фазе замороженной массы. Установлено, что при соблюдении определенных технологических режимов производства сорбета из фейхоа средний размер пузырьков воздуха составляет 40-60 мкм, что соответствует рекомендуемым значениям. При соблюдении рецептуры и реализации предложенной технологии, достигается удовлетворительное значение показателя взбитости сорбета из фейхоа – 65-76 %. Определена рекомендованная продолжительность взбивания сорбета из фейхоа для достижения необходимого показателя взбитости, которая составляет – 90-120 с.

Ключевые слова: фейхоа; сорбет; органолептические показатели; консистенция; микроструктура; замораживание; взбивание; взбитость.

Поступила (received) 02.05.2018

UDC 661.842:666.3

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.24

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF USING NANOCRYSTALLINE APATITE POWDERS AS INORGANIC FILLERS OF TOOTHPASTES

S. KRIVILEVA

department of "Chemical Technics and Industrial Ecology" NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE
email: spkri@ukr.net

ABSTRACT The article describes the most common types of toothpastes and materials used as inorganic abrasive polishing fillers therapeutic toothpastes available on the market. The prospects of using in the composition of therapeutic toothpastes and dentifrices for the teeth and mouth cavity of powders based on hydroxyapatite are evaluated. It is shown that in the products available on the market used biogenic hydroxyapatite submitted either in an inactive form, or containing deproteinized bone fish or farm animals (pigs or cattle). The prospects for the use of synthetic nanocrystalline apatite powder, purposefully developed for the plasticity of skeletal defects, in the composition of toothpastes and in dentifrice products – to replace inorganic components in their composition, consisting of chalk, kaolin, soda (in the lower price segment), is shown. titanium dioxide or aerosil (in the upper price range), or biogenic hydroxylapatite (as part of innovative premium products), traditionally used as abrasive components. It has been shown that synthetic nanocrystalline powders of $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ can be obtained by the methods of "green chemistry" from solutions of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and $\text{H}_3(\text{PO}_4)_2$ grades of "chemically pure" and "analytically pure" (not containing heavy metals and ingredients of animal origin) and $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ in the solid phase or by coprecipitation from solutions of $\text{Ca}_{10}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, NH_4F and $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ taken in the required stoichiometry, followed by heat treatment and grinding. The optimal ratios of the initial components and heat treatment regimes are determined, which ensure the production of $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ powder with the ratio $\text{Ca}/\text{P} = 1.67$ and $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ of high purity, whose crystal sizes correspond to the nanoscale range. When carrying out a full complex of toxicological and hygienic tests in vivo, it was established that the obtained material belongs to low-toxic, low-hazard substances with poorly expressed cumulative properties; it does not irritate the mucous membranes and does not possess gonadotoxic, embryotoxic, cytotoxic, mutagenic, teratogenic effects when ingested, which makes it safe and potentially promising to use it as an inorganic filler of toothpastes and agents for healing tooth enamel detection, Ca and P in it and restore the structure of the gingival mucosa.

Keywords: therapeutic toothpastes; dentifrices; abrasive-polishing fillers; hydroxylapatite; titanium dioxide.

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НАНОКРИСТАЛІЧНИХ ПОРОШКІВ АПАТИТОВОГО СКЛАДУ В ЯКОСТІ НЕОРГАНІЧНИХ НАПОВНЮВАЧІВ ЗУБНИХ ПАСТ

С. П. КРИВІЛЬОВА

кафедра хімічної техніки і промислової екології, НТУ «ХПІ», м. Харків, УКРАЇНА

АНОТАЦІЯ У статті розглянуті найбільш поширені види зубних паст і матеріали, що використовуються в якості неорганічних абразивних наповнювачів в існуючих на ринку лікувальних зубних пастах. Оцінена перспективність використання в складі лікувальних зубних паст і засобів по догляду за зубами і порожниною рота порошків на основі гідроксилапатиту. Показано, що в наявних на ринку продуктах застосовується біогенний гідроксилапатит, представлений або в неактивній формі, або у вигляді депroteinізованих кісток сільськогосподарських тварин (свиней або великої рогатої худоби). Показана перспективність застосування синтетичних нанокристалічних порошків апатитового складу, цілеспрямовано розроблених для пластики дефектів скелета, в складі зубних паст і в продуктах по догляду за зубами – для заміни неорганічних компонентів в їх складі, що складаються з крейди, каоліна, соди (у нижньому ціновому сегменті), діоксиду титану або аеросіду (у верхньому ціновому сегменті), або біогенного гідроксилапатиту (у складі інноваційних продуктів преміум-класу), які традиційно використовуються у якості абразивних складових. Показано що екологічно чисті (що не містять важких металів і інгредієнтів тваринного походження) синтетичні нанокристалічні порошки $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ можуть бути отримані методами «зеленої хімії» з розчинів $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, а $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ – у твердій фазі або соосадженням з розчинів $\text{Ca}_{10}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, NH_4F і $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, взятих у необхідній стехіометрії, з наступною термообробкою і подрібненням. Визначено оптимальні співвідношення вихідних компонентів і режими термообробки, які забезпечують отримання порошку $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ з співвідношенням $\text{Ca}/\text{P} = 1,67$ і $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ високої чистоти з розміром кристалів у нанорозмірному діапазоні. При проведенні повного комплексу токсиколого-гігієнічних випробувань *in vivo* встановлено, що отриманий матеріал відносяться до малотоксичних, малонебезпечних речовин зі слабо вираженими кумулятивними властивостями; він не подразнює слизові оболонки і не викликає гонадотоксичного, ембріотоксичного, цитотоксичного, мутагенного, тератогенного ефектів при потраплянні всередину організму, що робить перспективним і безпечним його використання у якості неорганічного наповнювача зубних паст і засобів для заліковування дефектів зубної емалі, відновлення дефіциту Ca і P у ній.

Ключові слова: лікувальні зубні паста; засоби по догляду за зубами; абразивно-поліруючі наповнювачі; гідроксилапатит; діоксид титану.

1. Introduction

In recent years, there has been a trend towards the use of innovative technologies and modern functional

materials developed for reconstructive surgery, as part of special means intended for dental and oral care [1 – 4], as well as in the food industry and as food additives for special purposes. The problem of improving the population

of the entire post-Soviet space is directly related to the elimination of a deficiency of calcium and phosphorus ions in the body. Currently, the population of virtually all countries of the former USSR, including Ukraine, and the post-Soviet Asian republics, is experiencing an acute shortage of calcium and phosphorus, which normally should come with food or with dietary supplements containing Ca and P. Calcium deficiency in the territory post-Soviet states leads to the fact that annually more than 1 million people fall ill with diseases associated with its lack. Over the past 17 years (since 2000), the total number of cases has exceeded 35 million people. The most catastrophic state of affairs in Russia: it now has 75 % of children suffering from osteopenia and 49 % of children with osteoporosis; and the total number of adults suffering from osteoporosis exceeded 11 million. No less serious is the situation in Ukraine: we have about 7 million people (every 4-th woman over the age of 60) suffering from osteoporosis. The situation will worsen: according to estimates of the International Osteoporosis Foundation, by the year 2050, more than 50 % of the population of Ukraine over the age of 50 will suffer from this disease. The situation with osteoporosis is also aggravated by a shortage in the body of 75 % of Ukraine's adult population of vitamin D. This is also associated with malnutrition and a lack of stay in the sun, especially the older generation.

In addition to the deficiency of Ca and P on the condition of the osteoarticular system of the population of the countries of the former USSR, fluoride in the drinking water of certain regions also has an insufficient content. So, in Ukraine, the content of fluorine in drinking water (depending on the geochemical region) varies widely (from 0 to 3.0 mg/l at a rate of 0.7 – 1.2 mg/l). Zero fluorine content is characteristic for a number of regions of Western Ukraine, a lower content for the Odessa region and the Crimea. Dentists fix a catastrophically high level of caries and periodontitis in the population of these areas. At the same time, in Central Ukraine and partly in the East everything corresponds to the norm. In the European countries and the USA this problem is solved by the appointment of tableted fluorine (it is prescribed even to pregnant women) and fluoridated water. But on the territory of the entire post-Soviet space, water has never been fluoridated. In this regard, a significant proportion of the population except osteoporosis is prone to tooth decay and suffers from premature tooth loss.

Today, the attitude to fluoride in the world is ambiguous. But his role in the prevention of tooth decay is undeniable. Therefore, in regions where the fluoride content in drinking water is not sufficient, the use of toothpastes with fluoride is advisable.

More recently, there have been widespread "family" toothpastes. They were hygienic and were intended only for mechanical removal of plaque on the teeth in order to eliminate chelitis – bad breath. But since absolutely healthy teeth have less than 1 % of the adult population of the post-Soviet space, today such pastes are used extremely rarely and are practically not produced.

By itself, brushing your teeth is not a preventive measure. To solve specific problems in the composition of pastes lead special ingredients. Each ingredient is designed to solve a particular problem. Toothpastes have become highly specialized: to strengthen tooth enamel, to combat periodontal pathology, to remove symptoms of hypersensitivity, bleaching, children, etc.

Today, all therapeutic and preventive tooth pastes are divided into:

- anti-inflammatory (with extracts of leukemia plants: Parodontax, Lacalut Active, etc.);
- anti-caries (containing Ca^{2+} and F^- : Blend-a-med Komplit 7, Lacalut Fluor, etc.);
- bleaching (containing as an abrasive baking soda NaHCO_3 : Lacalut White);
- for sensitive teeth with desensitizers (Parodontax);
- salt (stimulating blood circulation due to the content of mineral salts in its composition, which contribute to the intensification of metabolic processes in the gum, are effective for periodontitis and periodontitis, for example, Pomorin);
- therapeutic, for example, LOVE SPLAT Special paste, which protects against a simple herpes virus;
- baby (which should not contain phosphate).

In addition to abrasives, various oils (pink petals or nutmeg), sweeteners (imitating, for example, the taste of marshmallow, or tropical fruits), foaming agents are introduced into the paste composition, and enzymes and bleaches are also used in clarifying pastes.

Abrasive-polishing agents account for up to 40 % of the paste volume. Abrasives are powders that purify the tooth enamel from hard dental deposits and plaque [5]. The polishing agent is designed to remove plaque and food debris, forming bacteria colonies from the surface of the teeth. Abrasiveness of toothpaste is the abrasive effect of toothpaste and at the same time the degree of cleansing of the tooth surface from plaque. The degree of abrasiveness is determined not only by the quantity, but also by the quality of the abrasive. The larger the particle size, the more abrasive the toothpaste has. The smaller the particle size, the lower its abrasiveness. The abrasiveness of toothpastes is measured either by profilometry or by determining the "RDA" (Radioactive Dentin Abrasivity). This method was adopted by the American Association of Dentists [6]. It consists in the treatment of tooth paste, the dentin of which is processed by radioactive radiation. After cleaning the tooth, a slurry is formed containing the erased radioactive particles. The more of them, are higher than RDA. But there is no direct correlation between abrasiveness and wear resistance of enamel, as wear depends on a huge number of factors. Differences in the use of pastes with RDA 90 and RDA 204 have not been identified [7]. There are even paradoxical phenomena: for example, the soft toothbrush

of a toothbrush is larger and wears out enamel more quickly than hard enamel [8] regardless of the paste used. According to the ISO standard [9], toothpastes with an $\text{RDA} < 250$ are considered safe for human use throughout

life. But to date, there have not been recorded any tooth examinations due to abrasion and any other pastes.

In toothpastes of the lowest price category chalk, finely ground mollusk shells, eggshells or white clay (kaolin) are used as abrasives. The main minerals of the abrasives are CaCO_3 or kaolinite $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Silicon dioxide SiO_2 (aerosil) and $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$ are used in the technology of manufacturing toothpastes of the highest price category. But since pastes based on them are expensive, small producers still use chalk and soda (NaHCO_3). Today, in the technology of manufacturing toothpastes, the most effective substance is titanium dioxide TiO_2 , giving them a white color. Pastes on its basis are the most expensive. In medium price toothpastes aluminosilicates and dicalcium phosphate $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ are used as abrasives. In clarifying toothpastes, in addition to abrasives, bromelain or papain (enzymes) and bleaching components (carbamide peroxide, active oxygen [10]) are introduced.

The Ukrainian market for oral care products is very hot: the majority of the population uses toothpaste daily. A segment of therapeutic toothpastes is the most promising. Today it is inundated with the products of production of China, Turkey, the USA, Germany and other countries of the European Union. The products of Ukrainian producers are presented mainly in the lowest price category (price range from 12 to 130 UAH per tube of 200 g). As an abrasive filler, it uses white clay (TM "Ecolux"), chalk (CaCO_3 , "Dentogin"), aerosil (SiO_2 , TM "Ecolux"). As compounds of phosphorus pyrophosphates or fluorine salts are used (TPO "Image" of the Bogomolets Medicine University). The use of eggshells (as a source of CaCO_3) in mass production is hampered by the absence of melange production facilities in the entire post-Soviet space that could provide the required amount of raw materials. And eggshells available on poultry-incubators, firstly, do not wash, and secondly, it is polluted by the presence of dead unhatched chicks, which makes it completely unsuitable for use in the production of toothpastes. The existing small amounts of waste products of the confectionery shops are not of industrial importance.

In the market of dental and oral care products, the segment of the means for healing tooth enamel detectors, replenishing the deficiency of Ca and P in it, or restoring the structure of the gingival mucosa is not filled. And this despite the significant spread of such damage among the population. Disks or special "pencils" for these purposes with a binder, for example, based on wax, etc., are not available on the market.

2. Formulation of the problem

Recently, the use of biogenic hydroxylapatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ as an abrasive-polishing component of toothpastes began. Hydroxylapatite is more expensive today than fluorides, therefore in products for the mass market it is found only or in the form of more accessible and practically ineffective derivatives or in the form of ingredients of animal origin (de-proteinized bones of pigs

or cattle or sea fish ridges). The use of raw materials of animal origin as a source of biogenic $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ is ambiguous because of the possible introduction of various types of infections with animal protein. An ecologically clean and practically safe option is the use of hydroxylapatite, obtained from sea coral by hydrothermal treatment, but this source of raw materials is inaccessible due to limited production volumes.

In this regard, it seems promising to use environmentally friendly synthetic calcium phosphate materials of apatite composition. $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, is a promising material for the healing of tooth enamel detectors and replenishment of the deficiency of Ca and P, improvement of periodontal structure and for use as an abrasive component of new generation toothpastes. It is not something foreign to the body: both he and his metabolites are always present in the body. It is also characterized by high biocompatibility with living tissues [11]. $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ increases the hardness and stability of tooth enamel in the chemically aggressive environment of the oral cavity and also normally is a part of the tooth enamel.

Synthetic hydroxylapatite and fluorapatite can be obtained in many ways: "solution", hydrothermal, solid phase [11]. Large quantities of $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, namely, they are referred to in the industrial production of toothpaste, it is more expedient to obtain from solutions. But the use of nitrates for these purposes [12] leads to:

- a) contamination of the final product;
- b) the formation of significant amounts of waste in the form of chemically aggressive solutions;
- c) production of ceramic materials with unsatisfactory properties (due to a number of changing factors, stable reproducibility of the results is difficult).

In connection with this, it is promising to obtain ecologically safe synthetic powders of the composition $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2/\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, intended for replacing CaCO_3 , SiO_2 , TiO_2 and biogenic hydroxylapatite with "green chemistry".

The study of the action of materials on the mucous membranes is mandatory in the conduct of sanitary toxicological studies of chemicals, preparations and cosmetic materials. This has a certain significance in connection with the diverse nature of the local action of substances when used in various fields of medicine and cosmetology. It should be noted that toothpastes [13] fall between the categories of "remedies" and "cosmetology". For this reason, the requirements for compulsory animal testing are not required.

It is believed that the inside of the adult human tooth-

paste does not fall. Producers and write on the packaging: "do not swallow". However, children under the age of 6 still do not know how to spit the remnants of toothpaste, in connection with which the drug partially enters the child's body. In this connection, it seems reasonable to conduct a full complex of toxicological and hygienic tests of powders *in vivo*.

3. Purpose and tasks of the research

The purpose of this work is to assess the potential for the use of environmentally friendly $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ and $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ powders obtained by the "green chemistry" methods in dentifrices and as an abrasive filler for therapeutic toothpastes that restore mineral balance of tooth enamel and study of their properties.

To achieve this goal, it was necessary to solve the following tasks:

Synthesize environmentally friendly nanosize-fibrous powders of $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ and $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, to investigate their microstructure and properties; determine the optimal content of components.

Carry out a full complex of toxicological and hygienic tests of the developed materials on warm-blooded animals and determine whether the obtained materials possess gonadotoxic, embryotoxic, cytotoxic, mutagenic, teratogenic effects when they enter the body and exert an irritating effect on the mucous membranes and skin.

4. Experimental part

The following reagents were used in the work: orthophosphoric acid H_3PO_4 , CaF_2 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ grades of "chemically pure" and "analytically pure". $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ was obtained from solutions of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and H_3PO_4 in distilled water by stirring them for 8 hours and holding for 170 hours at room temperature for aging,

ensuring that the ratio of Ca ions to phosphate ions in a solution of $n(\text{Ca}^{2+})/m(\text{PO}_4^{3-}) = 1.67$. The product was filtered, and the precipitate was dried at 80 °C. To synthesize $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ was pre-synthesized (by three-firing pelletized mixtures at a temperature of 1150 – 1250 °C with a holding time of 2 hours and intermediate grinding with a multistage temperature rise at a rate of 120 – 150 °C per hour). Fluorapatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ was synthesized from CaF_2 and $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ by roasting in the temperature range 1200 – 1250 °C with exposure for 3 hours followed by grinding. Then the obtained fluorapatite was ground in a ball mill to particles of the required size. $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ can also be prepared by coprecipitation from solutions of $\text{Ca}_{10}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, NH_4F and $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, taken in the required stoichiometry, followed by heat treatment and grinding [14]. The firing was carried out in a chamber furnace in an air atmosphere in corundum crucibles. The temperature control was carried out with the help thermocouples PPR. To determine the optimum, different proportions of the components were selected.

According to the analysis, the nanocrystalline hydroxyapatite synthesized for use in skeletal surgery is a synthetic analogue of the mineral constituent of bone tissue. It is able to regulate the exchange of calcium and phosphorus in the body. Its main mineral is $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, according to the chemical analysis the ratio of Ca/P = 1,67. In its structure it is crystalline with a particle size in the nanometer range: from 25 to 50 nm, with a degree of crystallinity of more than 96 %, a mass fraction

of calcium of 40.82 % and a mass fraction of phosphorus of 15.8 %. When heat treatment of powders (after aging), a more coarse-grained crystalline structure is formed, the particle size increases to 75 – 100 nm.

X-ray phase analysis was carried out on a diffractometer on a DRON-2.0 unit using a standard procedure.

X-ray diffraction of samples of preparations showed that all reflections on X-ray patterns correspond to pure $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ and $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2\text{F}_2$ which were identified by comparison with ASTM data. Chemical interaction between them does not occur and new chemical compounds do not appear. Synthesized hydroxyapatite and fluorapatite practically do not contain impurities of other calcium phosphates ($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ etc.), as well as heavy metals.

The microstructure of the resulting materials during their synthesis was examined using a scanning electron microscope Carl Zeiss, Germany. Conducted electron diffraction studies have shown that the so-deposited so-called "amorphous" hydroxyapatite is not so. In the electron diffraction method, the wavelength of the radiation used is about 2 orders of magnitude smaller than that of X-rays, so electron diffraction makes it possible to identify the dispersed phases even when X-ray methods are powerless. And this happens in those cases when the substance under study is X-ray amorphous. Conducted electron diffraction studies indicate that the material consists of dispersed crystals with an imperfect structure. This is indicated by slightly diffuse diffraction rings. It should be noted that in general the nature of the electron diffraction patterns is retained in the preparations after 3, 5 and 7 days of "aging". There is a pronounced tendency to the formation of more precise diffraction rings with increasing aging time, which indicates a certain process of ordering of the structure. After drying at 80 °C, dot reflexes appear in the early solid rings of the electron diffraction patterns. This indicates an increase in crystal size. Point patterns on the electronogram, which represent an enlarged image of the plane of the reciprocal lattice, are obtained from single-crystal samples. The calculation of the obtained electron diffraction patterns gives results that allow uniquely identifying hydroxyapatite. The investigated amorphous hydroxyapatite due to its very developed surface is in very active form. This is evidenced by the ratio of this material to the effects of electron radiation. The process of crystallization of this material is well traced: as a result of the action of the electron beam and an increase in the current density of the beam, spontaneous crystallization begins, which in electron micrographs is manifested in the form of condensation and fusion of the finest plates. After this, acute point reflexes appear on the microelectronogram of this region.

A significant influence of the synthesis temperature, the concentration of the initial substances, the pH of the solution, the duration of the process, the order and rate of mixing, the aging time on the morphology (from needle to spherical) of the crystallizing powder particles is established. This makes it possible to synthesize powders

with a given specific surface, size and agglomeration of the crystals, morphology, and stoichiometry. Adjusting the particle size of the filler provides the possibility of obtaining the final product (toothpaste) of ordinary or increased abrasiveness. So when using powders with particles of a nanoscale range (from 50 nm) and a degree of crystallinity of more than 96 %, their abrasivity will be in the lower and middle range of values. When the size of the powder particles from the nanoscale range comes out, the abrasivity of the final material will approach the maximum values.

The developed materials passed a full complex of toxicological and hygienic tests on warm-blooded animals. A preliminary assessment of the degree of toxicity of the studied materials was carried out on transplantable cell cultures of the He-2 and Vero line according to Wesley D. [15], as well as using human live cells (buccal cells) to change the bioelectrical potential of the cell nucleus by V. G. Shakhbazov. [16].

The quantitative side of oxidation-reduction processes when introducing the developed powders was judged from the dynamics of activity of the enzymes of the experimental animals. The activity of enzymes was determined by conventional methods using a Specord two-beam spectrofluorimeter (Germany).

Many substances can lead to the accumulation of toxic products. Molecules of fatty acids and one of the final products, malonic dialdehyde, were determined as intermediate products of lipid peroxidation.

The study of lipid peroxidation by means of biochemiluminescence was performed on a medical biochemiluminometer BHLMC-1 both in dynamics and at the end of subacute experience. Super-weak luminescence was recorded in the blood and urine of white rats.

Changes in the content of microelements in organs and tissues with the introduction of the developed materials were determined by the atomic absorption method on a Saturn-1 spectrophotometer. The content of Ca, P, F, Mg, Cu was studied. Zn, Fe, K, Na in the blood, liver, kidneys, heart, spleen, brain and adrenal glands of experimental animals.

Many chemical mutagens are capable of interfering with the synthesis of protein, RNA and DNA. The study of the effect of the materials studied on these processes was carried out on the cells of a Vero culture (a renal epithelium of a green monkey).

It was found that the synthesized materials refer to low-toxic, low-risk substances with poorly expressed cumulative properties. They do not possess skin-resorptive properties and do not irritate the skin and mucous membranes, nor do they have gonadotoxic, embryotoxic, cytotoxic, mutagenic and teratogenic effects.

The conducted researches show that the synthesized crystalline powders of apatite composition can be used both as abrasive components in toothpastes, including children's ones, and as basic inorganic fillers of means for healing tooth enamel detections, replenishing the deficiency of Ca and P in it, or restoring structures of the gingival mucosa. They not only do not have toxic effects

on the body, but they are not (in contrast to TiO_2 or SiO_2) foreign to it, as they themselves, and the products of their decomposition are always present in the body. This will allow the production of new generation toothpastes and a higher level of cleaning and protection of tooth enamel among the population that will use it.

5. Conclusions

Eco-friendly powders of $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ and $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ were obtained using the classical "solution" method of "green chemistry" using chemically pure reagents.

It was found that the administration of 3 to 7 % $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ improves the stability of the material in contact with the chemically aggressive environment of the body (due to F^- ions). The optimal content of fluorapatite in powder (5,5 mass. %) was determined.

A full complex of toxicological and hygienic tests of the developed materials on warm-blooded animals was carried out. It is established that they belong to low-toxic, low-risk substances with slightly pronounced cumulative properties. They do not possess gonadotoxic, embryotoxic cytotoxic, mutagenic and teratogenic effects, they do not irritate mucous membranes and skin, nor do they possess skin-resorptive properties. The developed materials are potentially promising for use as abrasive-polishing components of toothpastes, including children's ones, as the main inorganic fillers for the healing of tooth enamel detectors, for the deficiency of Ca and P in it, or for restoring the structure of the gingival mucosa.

References (transliterated)

1. Freitas, R. A. Jr. Nanotechnology: nano medicine and nanosurgery. *Int. J. Surg.*, 2005, Vol. 3, No 4, 243-246, doi: 10.1016/j.ijssu.2005.10.007.
2. Chekman, I. S., Malanchuk, V. A., Gordeychuk, M. A. Nanotahnologiyi i nanomaterialy: primeneniye v stomatologiyi i chelustno-litzevoy hirurgiyi [Nanotechnology and nanomaterials: application in dentistry and maxillofacial surgery]. *Ukr. Med. journal*, 2009, No 6 (64), 95-97.
3. Chen, X. Nanosilver: a nanoparticle in medical application. *Toxicol. Lett.*, 2008, Vol. 176, No 1, 1 – 12, doi: 10.1016/j.toxlet.2007.10.004.
4. Webster, T. Nanomedicine. USA, *Woodhead Publ.*, 2012, 704.
5. Joiner, A., Schwarz, A., Philpotts, C. J., Cox, T. F., Huber, K., Hannig, M. The protective nature of pellicle towards toothpaste abrasion on enamel and dentine. *J. of Dentistry*, 2008, Vol. 36, No 5, 360-368, doi: 10.1016/j.jdent.2008.01.010.
6. González-Cabezas, C., Hara, A. T., Hefferren, J., et al. Abrasivity testing of dentifrices – challenges and current state of the art. *Monogr Oral Sci.*, 2013, No 23, 100-107, doi: 10.1159/000350476.
7. Pickles, M. J., Joiner, A., Weader, E., Cooper, Y. L., Cox, T. F. Abrasion of human enamel and dentine caused by toothpastes of differing abrasivity determined using an in situ wear model. *International Dental Journal*, 2005, Vol. 55, No 3(1), 188-193, doi: 10.1111 / j.1875-595X.2005.tb00058.x.

8. *GOST 7983-99. Pasty zubnye. Obshie tehnicheckie usloviya* [Toothpastes. General specifications]. – Moscow, Publishing Standartinform Publ., 2000, 36.
9. ISO 11609:2017(en), Dentistry – Dentifrices – Requirements, test methods and marking. Available at: <https://www.iso.org/standard/70956.html> (accessed 10.05.2018).
10. **Marcovic, L., Jordan, R. A., Glasser, M. C., Arnold, W.H., Rebel, J., Tillman, W., Ostermann, T., Zimmer, S.** Effects of bleaching agents on surface roughness of filling materials. *Dental Materials Journal*, 2014, Vol. 33, No (1), 59-63, doi: 10.5005 / jp-journalals-10015-1437.
11. **Barinov, S. M., Komlev, V. S.** *Biokeramika na osnove fosfatov kal'tsiya* [Calcium phosphate based bioceramics]. Moscow, Nauka Publ., 2005, 204.
12. **Kovaleva, E. S., Philippov, Ya. Yu., Putlyayev, V. I., Tretyakov, Yu. D., Ivanov, V. K., Silkin, N. I., Galiullina, L.F., Rodionov, A. A., Mamin, G. V., Orlinskii, S. B., Salakhov, M. Kh.** Biorezorbiruemye poroshkovyie materialy na osnove $\text{Ca}_{10-x}\text{Na}_x(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{CO}_3)_x(\text{OH})_2$ / [Bioresorbable powdered materials based on $\text{Ca}_{10-x}\text{Na}_x(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{CO}_3)_x(\text{OH})_2$]. *Scientists note the Kazan University. Series: Natural Sciences*. – Kazan. univers. Publ., 2010, Vol. 152, 1, 80-98.
13. *DSTU 2472:2006. Produkciya parfumerno-kosmetichna* [State Standard 2472–2006. Production perfumery and cosmetics]. Kiev, Derzhspozhyvstandard Ukrayiny Publ., 2007, 71.
14. **Sayenko, V. A., Shkuropatenko, V. A., Tarasov, R. V., Savina, S. A., Ulybkina, K. A., Belkin, F. V., Kolesnikov, D. A., Kovaleva, M. G.** *Poluchenie fluorapatita osazhdeniem iz vodnyh rastvorov* [Receipt fluorapatite by the method of the chemical besieging of water solutions]. *Visnik NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2014, No 28 (1071), 117-127.
15. **Gerald, D. Wasley.** *Animal Tissue Culture: Advances in Technique*. London, Butterworth, 1972, 192 p. Rus. ed: **Gerald D. Wasley.** *Novye metody kul'tury zhivotnykh tkaney*. Moscow, Mir Publ., 1976, 255.
16. **Shahbazov, V.** Bioelektricheskie svoystva kletok: yadra, yadryshka i hromatina funktsionalnoj aktivnosti yadernogo genoma [Bioelectric properties of cells: nucleus, nucleus and chromatin of functional activity of the nuclear genome]. // *Tez. dokladov I Vses. Biofiz. Syezda*. T. 2 [Abstracts of the I Biofiz. Congress, T. 2]. Moscow, *Moscow University Publ.*, 1982, 826 – 828. and chromatin of functional activity of the nuclear genome]. // *Tez. dokladov I Vses. Biofiz. Syezda*. T. 2 [Abstracts of the I Biofiz. Congress, T. 2]. Moscow, *Moscow University Publ.*, 1982, 826-828.
- Гордейчук** // *Український медичний Журнал*. – 2009. – № 6 (74). – С. 95 – 97.
3. **Chen, X.** Nanosilver: a nanoparticle in medical application / **X. Chen** // *Toxicol. Lett.* – 2008. – Vol. 176, No 1. – P. 1-12. – doi: 10.1016/j.toxlet.2007.10.004.
4. **Webster, T.** *Nanomedicine* / **T. Webster**. – USA: Woodhead Publ., 2012, 704 p.
5. **Joiner, A.** The protective nature of pellicle towards toothpaste abrasion on enamel and dentine / **A. Joiner, A. Schwarz, C. J. Philpotts, T. F. Cox, K. Huber, M. Hannig** // *J. of Dentistry*. – 2008. – Vol. 36, No 5. – P. 360 – 368. – doi: 10.1016/j.jdent.2008.01.010.
6. **González-Cabezas, C.** Abrasivity testing of dentifrices – challenges and current state of the art / **C. González-Cabezas, A. T. Hara, J. Hefferren** // *Monogr Oral Sci.* – 2013. – No 23. – P. 100 – 107. – doi: 10.1159/000350476.
7. **Pickles, M. J.** Abrasion of human enamel and dentine caused by toothpastes of differing abrasivity determined using an in situ wear model / **M. J. Pickles, A. Joiner, E. Weader, Y. L. Cooper, T. F. Cox** // *International Dental Journal*. – 2005. – Vol. 55, No 3 (1). – P. 188 – 193. – doi: 10.1111 / j.1875-595X.2005.tb00058.x.
8. ГОСТ 7983-99. Пасты зубные. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2000. – 36 с.
9. ISO 11609:2017(en), Dentistry – Dentifrices – Requirements, test methods and marking. URL: <https://www.iso.org/standard/70956.html> (accessed 10.05.2018).
10. **Marcovic, L.** Effects of bleaching agents on surface roughness of filling materials / **L. Marcovic, R. A. Jordan, M. C. Glasser, W. H. Arnold, J. Rebel, W. Tillman, T. Ostermann, S. Zimmer** // *Dental Materials Journal*. – 2014. – Vol. 33, No (1). – P. 59 – 63. – doi: 10.5005 / jp-journalals-10015-1437.
11. **Баринов, С. М.** Биокерамика на основе фосфатов кальция / **С. М. Баринов, В.С. Комлев**. – М.: Наука, 2005. – 204 с.
12. **Ковалева, Е. С.** Биорезорбируемые порошковые материалы на основе $\text{Ca}_{10-x}\text{Na}_x(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{CO}_3)_x(\text{OH})_2$ / **Е. С. Ковалева, Я. Ю. Филиппов, В. И. Пугляев, Ю. Д. Третьяков и др.** // *Ученые записки Казанского ун-та. Серия: Естественные науки*. – 2010. – Т. 152, № 1. – С. 80 – 98.
13. ДСТУ 2472–2006. Продукція парфумерно-косметична. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 71 с.
14. **Саенко, С. Ю.** Получение фторapatита осаждением из водных растворов / **С. Ю. Саенко, В. А. Шкоропатенко, Р. В. Тарасов и др.** // *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. – 2014. – № 28 (1071). – С. 117 – 127.
15. **Уосли, Д.** Новые методы культуры животных тканей / **Джорж Уосли**. – М.: Мир, 1976. – 255 с.
16. **Шахбазов, В. Г.** Биоэлектрические свойства клеток: ядра, ядрышка и хроматина функциональной активности ядерного генома / **В. Г. Шахбазов** // *Тез. докладов I Всес. Биофиз. Съезда*. – Том 2. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – С. 826 – 828.

Список літератури

1. **Freitas, R. A. Jr.** Nanotechnology: nanomedicine and nanosurgery / **R. A. Jr. Freitas** // *Int. J. Surg.* – 2005. – Vol. 3, No 4. – P. 243 – 246. – doi: 10.1016/j.ijsu.2005.10.007.
2. **Чекман, И. С.** Нанотехнологии и наноматериалы: применение в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии / **И. С. Чекман, В. А. Маланчук, М. А.**

Сведения об авторах (About authors)

Кривільова Світлана Павлівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної техніки і промислової екології, м. Харків, Україна; e-mail: spkri@ukr.net.

Svetlana Krivileva – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor of Department of “Chemical Technics and Industrial Ecology”, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: spkri@ukr.net.

Please cite this article as:

Krivileva, S. Evaluation of the possibility of using nanocrystalline apatite powders as inorganic fillers of toothpastes. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16**(1292), 158–164, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.24

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Кривільова, С. П. Оцінка можливості використання нанокристалічних порошків апатитового складу в якості неорганічних наповнювачів зубних паст / **С. П. Кривільова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 158–164. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.24.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Кривилёва, С. П. Оценка возможности использования нанокристаллических порошков апатитного состава в качестве неорганических наполнителей зубных паст / **С. П. Кривилёва** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 158–164. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.24.

АННОТАЦИЯ В статье рассмотрены наиболее распространённые виды зубных паст и материалы, используемые в качестве неорганических абразивно-полирующих наполнителей лечебных зубных паст, существующих на рынке. Оценена перспективность использования в составе лечебных зубных паст и средств по уходу за зубами и полостью рта порошков на основе гидроксилапатита. Показано, что в имеющихся на рынке продуктах применяется биогенный гидроксилапатит, представленный либо в неактивной форме, либо содержащий депротенизированные кости рыб или сельскохозяйственных животных (свиней или крупного рогатого скота). Показана перспективность применения синтетических нанокристаллических порошков апатитного состава, целенаправленно разработанных для пластики дефектов скелета, в составе зубных паст и в продуктах по уходу за зубами – для замены неорганических компонентов в их составе, состоящих из мела, каолина, соды (в нижнем ценовом сегменте), диоксида титана или аэросила (в верхнем ценовом диапазоне), или биогенного гидроксилапатита (в составе инновационных продуктов премиум-класса), традиционно используемых в качестве абразивных составляющих. Показано, что экологически чистые (не содержащие тяжёлых металлов и ингредиентов животного происхождения) синтетические нанокристаллические порошки $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ могут быть получены методами «зеленой химии» из растворов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $\text{H}_3(\text{PO}_4)_2$, а $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ - твердой фазе или соосаждением из растворов $\text{Ca}_{10}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, NH_4F и $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, взятых в необходимой стехиометрии, с последующей термообработкой и измельчением. Определены оптимальные соотношения исходных компонентов и режимы термообработки, обеспечивающие получение порошка $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ с соотношением $\text{Ca}/\text{P} = 1,67$, и $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ высокой чистоты, размеры кристаллов которых соответствуют наноразмерному диапазону. При проведении полного комплекса токсиколого-гигиенических испытаний *in vivo* установлено, что полученный материал относится к малотоксичным, малоопасным веществам со слабо выраженными кумулятивными свойствами; он не оказывает раздражающего действия на слизистые оболочки и не обладает гонадотоксическим, эмбриотоксическим, цитотоксическим, мутагенным, тератогенным эффектами при попадании внутрь организма, что делает безопасным и потенциально перспективным его использование в качестве неорганического наполнителя зубных паст и средств для заживления дефектов зубной эмали, восполнения дефицита Ca и P в ней и восстановления структуры слизистой оболочки десен.

Ключевые слова: лечебные зубные пасты; средства по уходу за зубами; абразивно-полирующие наполнители; гидроксилапатит; диоксид титана.

Received (поступила) 14.05.2018

УДК 66.074:661

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.25

МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМНО-КОНСТРУКТИВНИХ І ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІННИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ПРОЦЕСІВ МАСООБМІНУ

В. Ф. МОЇСЄВ¹, Є. В. МАНОЙЛО^{1*}, Н. Г. ПОНОМАРЬОВА², К. Ю. РЕПКО¹, Д. В. ДАВИДОВ¹

¹каф. ХТПЕ, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

²каф. ІТПіА, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*email: bublikova1@gmail.com

АНОТАЦІЯ Промислова реалізація методу стабілізації газорідного шару дозволяє значно розширити галузь застосування пінних апаратів і відкриває нові можливості інтенсифікації технологічних процесів з одночасним створенням маловідходних технологій. У статті встановлені основні параметри, що впливають на гідродинаміку пінних апаратів, розглянуті основні конструкції та режими роботи пінних апаратів. Виявлено зв'язок гідродинамічних параметрів. Розглянуто гідродинамічні закономірності пінного шару. Вказані фактори, що впливають на процес масообміну, як в газовій, так і в рідкій фазах. Проведений аналіз ряду досліджень показав, що перспективним напрямком інтенсифікації процесу масообміну є розробка апаратів з трифазним псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки складних форм із сітчастих матеріалів. Отже, необхідне проведення спеціальних досліджень гідродинамічних режимів роботи апарату з сітчастою насадкою і визначенням параметрів, що впливають на швидкість переходу насадки з одного режиму в інший.

Ключові слова: промислові газові викиди; процес уловлювання; гідродинаміка, масообмін; пінний апарат; пінний шар, дослідження процесів очищення; стабілізація пінного шару; інтенсивний апарат

METHODOLOGY OF CALCULATION OF CONSTRUCTION AND HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF A FOAM LAYER APPARATUS FOR MASS-TRANSFER PROCESSES

V. MOISEEV¹, E. MANOULO¹, N. PONOMARYOVA², K. REPKO¹, D. DAVYDOV¹

¹ Department of Chemical techniques and industrial ecology, NTU «KhPI», Kharkiv, UKRAINE

² Department of Integrating technology, processes and apparatus, NTU «KhPI», Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Industrial implementation of the stabilization method of the gas-liquid layer can significantly expand the field of use of foaming apparatus and opens up new opportunities for intensifying technological processes with the simultaneous creation of low-waste technologies. The article establishes the basic parameters influencing the hydrodynamics of foam apparatus, considers the basic constructions and operating modes of foam apparatus. The connection of hydrodynamic parameters is revealed. The hydrodynamic laws of the foam layer are considered. The indicated factors affecting the process of mass transfer, both in the gas and in the liquid phases. The conducted analysis of a number of studies showed that the perspective direction of intensification of the mass transfer process is the development of apparatuses with a three-phase fluidized bed of an irrigated nozzle of complex forms with mesh materials.

It is indicated that the mechanism of transition of the nozzle to the mode of advanced fluidization will be significantly different from conventional ballistic nozzles. The study of mass transfer in an absorber with a fluidized bed of an irrigated nozzle is complicated by the fact that the contact surface between phases can vary considerably depending on the hydrodynamic conditions, in particular, on the speed of gas and irrigation density. At the same time it is difficult to determine the influence of these factors in itself on the contact surface and on the coefficient of mass transfer. Consequently, it is necessary to carry out special investigations of the hydrodynamic modes of the apparatus with a mesh nozzle and the determination of the parameters that influence the speed of the transfer of the nozzle from one mode to another. For gas cleaning systems from gaseous components, it is necessary to provide small loads on the liquid while maintaining a high degree of purification. This can be achieved by using a drip tray with a small free section and a newly designed nozzle.

Key words: industrial gas emissions; cleaning process; hydrodynamics, mass transfer; foam apparatus; foam layer, research of purification processes; stabilization of foam layer; intensive apparatus

Вступ

В сучасних умовах значного антропогенного впливу на навколишнє середовище на часі пошук найбільш ефективних і економічних методів очищення промислових викидів. Методи очищення і апаратура, що розробляються повинні враховувати можливість роботи в широкому діапазоні робочих умов. Для зниження енерговитрат в системах уловлювання шкідливих і токсичних речовин необхідно забезпечувати зниження гідравлічного

опору при збереженні високої ефективності очищення газових потоків.

З огляду на суперечливі вимоги до обладнання і незважаючи на велику кількість вже наявних апаратів для проведення масообмінних процесів, розробка нового високоінтенсивного та ефективного обладнання становить значний інтерес для природоохоронних технологій в багатьох галузях промисловості.

Поширеним методом очищення газових потоків

є абсорбційні методи поглинання шкідливих компонентів з відведених промислових газів. При цьому або відбувається процес фізичної абсорбції, або абсорбент вступає в хімічну взаємодію з абсорбуємым компонентом (процес хемосорбції).

Одним з перспективних напрямків інтенсифікації процесу масообміну є розробка апаратів з використанням принципу взаємодії газорідних потоків в шарі рухомих тіл, так званих пінних апаратів з трифазним псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки. У порівнянні з традиційними тарілчастими і насадочними колонами пінні апарати з трифазним псевдозрідженим шаром мають ряд переваг:

- можливість роботи в широкому діапазоні швидкостей газу без значного збільшення гідравлічного опору, що особливо важливо для процесів очищення газів в умовах з часто змінними швидкостями потоків як в сторону зменшення, так і в бік збільшення;

- практично рівномірний розподіл рідкої фази по всьому перерізу апарату і повне омивання рідиною поверхні насадки, що призводить до збільшення поверхні масообміну;

- висока турбулізація потоків газу і рідини, що забезпечує високі коефіцієнти тепло- і масообміну;

- можливість інтенсифікації роботи існуючих абсорбційних колон, оснащених провальними тарілками, шляхом використання псевдозріджених насадок.

Починаючи з 1959 р з'явилися повідомлення про можливість інтенсифікації масо- і теплообмінних процесів шляхом застосування цієї конструкції апаратів.

Вперше абсорбери з псевдозрідженою насадкою були застосовані в алюмінієвій промисловості для очищення газів, що відходять від електролізних ванн від фтористих сполук, сірчистого газу, пилу і смолистих речовин, потім набули поширення в основній хімічній промисловості при виробництві мінеральних добрив, в целюлозно-паперовій промисловості, для виробництва ряду органічних речовин.

У якості насадкових тіл в абсорбері з трифазним псевдозрідженим шаром, як правило, використовували порожні кулі з діаметром 20 – 50 мм і щільністю 100 – 900 кг/м³, виконані з поліетилену, поліпропілену, гуми та інших порівняно легких матеріалів.

На досліджених раніше насадках апарати з псевдозрідженим шаром використовувалися переважно в технологічних циклах при значних питомих навантаженнях по газу і рідині, що призводило до високих енерговитрат. У той же час в системах очищення промислових газів від шкідливих компонентів, присутніх, як правило, в низьких концентраціях, необхідно забезпечити високий ступінь очищення газу при мінімальних витратах по рідині.

Мета роботи

Метою роботи є аналіз розрахункових закономірностей ряду гідродинамічних параметрів при обробці газорідних систем у пінному шарі. Проблема обробки промислових газових потоків вирішується за допомогою проведення процесу у інтенсивному режимі. Промислова реалізація абсорбційних процесів у пінному шарі та використання методу стабілізації газорідного шару значно розширює сферу застосування пінних апаратів і відкриває нові можливості інтенсифікації технологічних процесів з одночасним створенням маловідходних технологій. А використання сучасних конструкцій зважених насадок дозволяє модернізувати діючі абсорбційні апарати.

Викладення основного матеріалу

Для зазначених цілей була розроблена принципово нова об'ємна порожниста насадка. Перевагою цієї насадки є перехід в псевдозріджений стан при порівняно низьких швидкостях газу, а також розвинена поверхня контакту фаз. Чарункова структура, з якої виготовлена насадка, дозволяє досягти підвищених значень коефіцієнтів масопередачі за рахунок ефекту утворення плівки в осередках малого розміру. Насадка має високу порозність і низький гідравлічний опір. Залежно від підбору матеріалу насадка може мати різну змочуваність.

Нові насадки прості за конструкцією і мають порівняно низьку вартість, що дозволяє їх ефективно застосовувати в процесах очищення газів, що відходять у різних виробництвах, в градирнях систем оборотного водопостачання, в ряді інших процесах тепло- та масообміну.

Перші повідомлення про промислове використання апаратів з трифазним шаром зрошуваної насадки з'явилися в 1950-і роки. Повідомлялося, що при очищенні газів, що відходять від алюмінієвого виробництва на пілотній установці забезпечувалася ступінь очищення газу содовим розчином від HF 95% і ступінь знепилення 99%. Також повідомлялося про високу масообмінну здатність подібного апарату. Так, в процесі абсорбції SO₂ розчином NaOH в одноступеневому апараті досягалася ступінь вилучення в залежності від навантажень по газу і рідині від 50,6 до 92,9%.

Приблизно в той же час з'явилися повідомлення про промислове впровадження апаратів з псевдозрідженою насадкою. Відзначається висока продуктивність і ефективність апарату при абсорбції і десорбції, що проводяться в системах «бромний розчин – повітря». Однак застосування в бромній промисловості апарати не знайшли зважаючи на значний їх гідравлічний опір в порівнянні з іншими конструкціями абсорберів.

Також з'являються повідомлення про лабораторні дослідження апаратів з псевдозрідженим

шаром зрошуваної насадки. У літературі є дані про дослідження насадок різної конфігурації (кульсті насадки, насадки у вигляді кілець, насадки складної форми). У наступні роки проводилися дослідження кульової насадки, як найбільш простої за конструкцією і способу виготовлення. Такі дослідження описані в роботах [1-2]. У зарубіжній літературі [3-4] також наводиться опис експериментальних досліджень апаратів з трифазним псевдозрідженим шаром зрошуваних кульових насадок.

Конструктивні схеми апаратів з трифазним псевдозрідженим шаром

Відомі різні конструкції апаратів з трифазним шаром зрошуваної насадки, які відрізняються за типом насадки і характеру її руху, по конструкції опорно-розподільчої решітки, що утримує сітки, вузлів подачі газу, рідини та ін.

Апарати з трифазним шаром по організації руху потоків газу і рідини на тарілці поділяються на апарати з перехресним, протитечійним і висхідним прямооточним рухом фаз.

В роботі Сабирханова [5] в основу класифікації протитечійних апаратів з псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки покладений характер руху насадкових тіл в робочому обсязі; згідно з яким розрізняють апарати зі зваженою насадкою, з фонтануючою насадкою, з обертаємою насадкою і циркулюючою насадкою, з регулярною рухомою насадкою і комбіновані апарати з рухомою насадкою (рис. 1.1).

Апарати зі **зваженою** насадкою [2] відрізняються від інших хаотичним і пульсаційним характером руху елементів насадки в підвищеному стані (рис. 1 а). Апарати зі зваженою насадкою можуть бути секціонованими, тобто в них використовуються різні перегородки, вставки, стабілізатори або сітки великого вільного перетину, які поділяють перетин апарату і його робочу зону на окремі секції. У таких апаратах успішно вирішується питання масштабного переходу від лабораторних моделей до промислових колон без особливої зміни ефективності масо-і теплообміну.

В апаратах з **фонтануючою** насадкою [6] застосовуються зигзагоподібні або конічні тарілки (рис. 1 б). В апаратах з фонтануючою насадкою з зигзагоподібними тарілками фонтанування насадки відбувається в центральній частині кожного зигзагу. Для запобігання скупченню насадки в западинах зигзагів перфорована частина тарілки може виконуватися у вигляді дірчастої або щільної горизонтальної пластини.

У конічних тарілках апаратів з фонтануючою насадкою перфорована тільки частина поверхні. Через звуження перетину тарілки швидкість витікання газу через неї багато вище, ніж у випадку звичайних решіток, тому насадка здійснює в центрі апарату висхідний фонтануючий рух, а під стінками –

спадний.

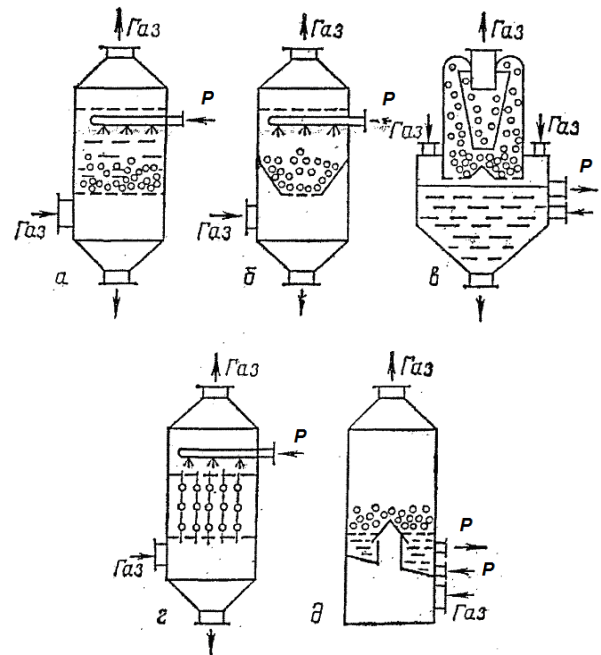


Рис. 1 – Апарати з трифазним шаром зрошуваної насадки: а – зі зваженою насадкою; б – з фонтануючою насадкою; в – з циркулюючою насадкою; г – з регулярною рухомою насадкою; д – комбінований тип

В основі апаратів з **циркулюючою** насадкою і з **обертальною** насадкою [7] лежить циркулюючий або обертальний рух насадки, який організовано за допомогою додаткових трактів, різних способів і спеціальних пристосувань (рис. 1. в).

У робочій зоні апаратів з циркулюючою насадкою спостерігається висхідний рух насадки, яка повертається на решітку через зовнішні транспортні тракти або внутрішні зони в корпусі апарату. Обертання насадки здійснюється різними способами в робочій зоні апарату. Одним з них є потік газу, попередньо закручений за допомогою спрямованих сопел решітки.

В інших випадках застосовуються верхні обмежувальні решітки або відбивачі у вигляді півсфер, перфорованих похилих пластин і ін., які надають насадці обертальний рух.

Апарати з фонтануючими і циркулюючими насадками працюють при підвищених швидкостях газу і мають високий гідравлічний опір.

В апаратах з **регулярною** рухомою насадкою [8] насадков тіла можуть бути вільно насаджені на жорстких струнах або, навпаки, жорстко закріплені на гнучких струнах (рис. 1 г). У першому випадку струни натягнуті між стінками корпусу або між ґратами, рух насадки відбувається тільки по струні; при цьому пробіг кожного елемента насадки по струні обмежений. Гнучкі струни з жорстко закріпленою регулярною рухомою насадкою консольно кріпляться до стінки апарату або до ґрат.

Поширена конструкція насадки, в якій один кінець струни з насадкою фіксується зверху до кріпильної решітки, а інший кінець вільно пропускається через отвір розподільчих грат. Пружність або гнучкість струн дозволяють елементам насадки здійснювати під дією потоків поперечні і поздовжні коливальні рухи.

Регулярні рухливі насадки складні в експлуатації і працюють при підвищених навантаженнях по газу.

Комбіновані апарати з рухомою насадкою є ще більш складними конструкціями, що поєднують в собі елементи апаратів з псевдозрідженим шаром і барботажних.

Найбільш поширеними в промисловості є апарати зі зваженою (псевдозрідженою) насадкою, які конструктивно більш прості і можуть бути вдосконалені в напрямку зниження енерговитрат, що важливо для процесів очищення газів.

Характеристика насадочних тіл, що застосовуються в абсорбційних апаратах

Насадки нерухомі і рухомі для заповнення абсорберів, повинні володіти великою питомою поверхнею і великим вільним об'ємом, хорошою змочуваністю, що дозволяє мати велику поверхню контакту фаз, низький опір газовому потоку, добре розподіляти рідину по перетину апарату і мати корозійну стійкість у відповідних середовищах.

Насадки можна поділити на два основних типи: нерухомі і псевдозріджені насадки. Нерухомі насадки в свою чергу поділяються на регулярні (структуровані) і насипні.

Регулярні стаціонарні насадки

Розвиток регулярних насадок йде в напрямку створення структурованих насадок зі складними каналами для проходу газу і гофрованою листовою поверхнею, що дозволяє рівномірно розподілити рідину і створити умови для ефективного контакту фаз і здійснення процесу масообміну.

До структурованих насадок можна віднести наступні відомі конструкції:

- насадка, що складається з гофрованих газопроникних листів, зібраних в пакет;
- насадка, що складається з плоских і гофрованих листів, які чергуються;
- для збільшення поверхні масообміну листи іноді виконуються зі щілинами або отворами;
- насадки, виконані з дротяних спіралей, всередині яких встановлені додаткові контактні пристрої у вигляді зубчастих пластин;
- до центральної труби прикріплені спіральні стрічки з перфорованого листа, між витками спіральної стрічки розташовані переплетені між собою і утворюючі сітку дровотів спіралі;
- блок волокнистих листів, що в перерізі утворює круглі стільники;
- гвинтові тіла лівого і правого обертання, між ними розташовані гофровані листи.

- насадка виконана з рулонної листової сталі.
- насадки, з горизонтальних рядів похилих поздовжніх прямокутних пластин.

Насипні нерухомі насадки

До насипних відносяться насадки, що широко відомі у вигляді кілець Рашига, Палля, сідлоподібні (Інталлокс), так і нові насадки складної форми, представлені в патентах.

Кільцева насадка з метою збільшення контакту фаз може бути забезпечена зовнішнім кільцем з поздовжніми вирізами, приєднаними до перфорованого кільця. Крім того, кільцеві насадки можуть мати отвори будь-якої форми або мати виступи, а іноді обидва ці прийоми поєднуються в одному насадочному елементі.

В роботі Кагана А.М. зі співробітниками [9] описана промислова металева насадка типу ДІАП-3, виконана у вигляді двох перфорованих півкілець, повернених один щодо одного на 90° і з'єднаних перегородкою.

Відомі також насадки складних форм у вигляді різних спіралей, смуг, що утворюють різні замкнуті поверхні. Ці смуги можуть бути як металевими, так і виконані з полімерних матеріалів.

Насадки складної форми можуть також бути виготовлені з тканих матеріалів. Експерименти по гідравлічному опору для кілець Рашига і насадок з ткани полімерної сітки показали, що гідравлічний опір кілець Рашига в 1,7-3,2 рази більше, ніж у подібної насадки. Це пояснюється, в першу чергу, наявністю застійних зон в шарі кілець Рашига, що веде до нових додаткових опорів, а також більш рівномірним розподілом вільного об'єму в шарі насадки, чому сприяє їх форма, матеріал і проникність сіток насадки, як з боку газу, так і з боку рідини.

Псевдозріджені насадки

В якості насадки для апаратів з псевдозрідженим шаром можуть бути застосовані насадкові тіла різної форми, виготовлені з матеріалів, стійких у відповідних середовищах.

З точки зору енерговитрат апарати повинні володіти низьким гідравлічним опором. Одним з факторів, що впливають на зниження гідравлічного опору газу, є зменшення щільності насадкових тіл, при якій, перш за все, забезпечується їх інтенсивний рух у всьому обсязі шару. Застосування насадкових тіл з високою щільністю призводить до зменшення рухливості елементів насадки в шарі, в граничному випадку більшість елементів можуть виявитися нерухомими на тарілці. З іншого боку, занадто легкі насадкові тіла скупчуються у поверхні пінного шару. Утворюється так званий трифазний псевдозріджений плаваючий шар. В обох випадках гідродинамічна структура пінного шару істотно неоднорідна.

Псевдозріджену насадку можна поділити на *сферичну, циліндричну* і *насадку складної форми*.

Найбільш вивчені насадкові тіла у вигляді порожніх куль з діаметром 20 – 50 мм і щільністю 100

– 900 кг/м³, виконані з поліетилену, поліпропілену, пентапласту або гуми.

Як показали дослідження ефективною є робота абсорбера з псевдозрідженим шаром зрошуваної кульової насадки при використанні елементів насадки, розмір якої задовольняє співвідношенням:

$$\frac{D_{an}}{d_n} > 10, \quad \frac{H_0}{D_{an}} < 1, \quad H_0 = (5 \div 8)d_n$$

де D_{an} – діаметр апарату, d_n – ефективний діаметр насадки, H_0 – висота сухої засипаної насадки.

У разі, коли на тарілці знаходиться насадка, що складається з елементів з великим діаметром, ніж передбачається даним відношенням, спостерігається нерівномірне переміщення елементів насадки в шарі. Динамічна висота шару в цьому випадку змінюється стрибкоподібно, а гідродинамічна структура шару стає неоднорідною.

З метою збільшення поверхні контакту фаз порожнисті сферичні тіла виконуються з наскрізними отворами, забезпечуються лопатями краплеподібної або тороїдальної форми, а суцільна кульова насадка – у вигляді з'єднаних пружною половинок, з наскрізними каналами, а також з гофрами на поверхні, шипами і голками.

Використовуються також кільцеві насадки з гладкою і перфорованою поверхнею, кубики, конуси, тори і піраміди.

Виготовлення невеликої кількості насадки будь-якого типу не представляє особливої складності. Однак для промислових апаратів з псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки, коли тільки для одного апарату потрібні десятки або навіть сотні тисяч штук насадок тіл, виникають певні труднощі в організації їх масового виробництва.

В даний час з метою зменшення енергетичних витрат на проведення процесу масообміну доцільно застосування насадкові тіла зі спінених і сітчастих матеріалів, так як дані матеріали дозволяють досить просто виготовляти насадкові тіла з високорозвиненою поверхнею контакту фаз, що мають в той же час низьку насипну щільність, що підтверджено дослідженнями, представленими в роботі Вітківської Р.Ф. і Зибіної Н.Ф. [10].

Особливості трифазного псевдозрідженого шару

Класичним прикладом псевдооживлення є псевдозріджений шар у двофазній системі «тверде – газ» або «тверде – рідина». При низьких швидкостях потік просто фільтрується через порожнечі між частками, які становлять *нерухомий шар*. Зі збільшенням швидкості потоку частинки будуть рухатися одна відносно одної, і здійснювати невеликі коливальні рухи з утворенням *розширеного шару*. При більш високій швидкості потоку досягається стан, коли майже всі частинки складають щось на зразок суспензії з рухаючися вгору потоком газу або

рідини – *мінімальне псевдозрідження*. У системах «рідина – тверде» збільшення швидкості потоку вище необхідної для мінімального псевдозрідження зазвичай призводить до спокійного, поступовому розширення шару. Такий шар називають шаром, *псевдозрідженим рідиною*. В системі «газ – тверде» спостерігаються великі неоднорідності у вигляді каналуотворення. При більш високих швидкостях газового потоку перемішування посилюється, а рух частинок стає більш енергійним. Такий шар називається *псевдозрідженим газом*.

Перепад тиску в потоці через шар твердих частинок має наступні закономірності: при відносно низьких швидкостях потоку в щільному шарі падіння тиску приблизно пропорційно швидкості потоку. У міру подальшого збільшення швидкості потоку щільний шар раптово «розпушується». Іншими словами, порозність зростає, а це призводить до зниження перепаду тиску. При швидкостях потоку, що перевищують швидкість мінімального псевдозрідження, шар розширюється. Незважаючи на більшу швидкість потоку, падіння тиску залишається практично незмінним. Така картина класичного двофазного псевдозрідження.

Для систем абсорбційного поглинання окремих компонентів газової фази рідиною значні переваги в порівнянні з апаратами, де контакт газу з рідиною здійснюється на поверхні стаціонарного шару насадки чи інших стаціонарно розташованих контактних пристроїв (тарілок різних конструкцій) мають апарати з трифазним псевдозрідженим шаром.

При цьому необхідно мати на увазі, що розглядаються в даній роботі трифазні системи «газ – рідина – тверде», що мають суттєві відмінності від класичних двофазних систем, в яких відбувається псевдозрідження.

У різних літературних джерелах апарати з трифазним шаром називаються по-різному: турбулентний контактний абсорбер, скруббер з плаваючою насадкою, апарати з псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки, з рухомою зрошуваною (кульовою насадкою), зі зрошуваною зваженою насадкою, пінний апарат зі зваженою насадкою.

Візуальні спостереження при проведенні процесу показують існування декількох гідродинамічних режимів роботи апаратів з рухомою насадкою. Ці режими називаються - початкове проміжне, розвинене (повне) псевдозрідження, захлинання апарату; або - початок фонтанування (зважування), перехідний режим, режим розвиненої турбулентності і режим захлинання.

В апаратах малого діаметра при постійному значенні масової швидкості рідини в залежності від швидкості газу можна виділити чотири гідродинамічних режими.

У режимі початкового псевдозрідження спостерігається "фонтанування": переходять в псевдозріджений стан насадкові тіла тільки в центральній частині апарату, залишаючись

нерухомими під стінками. Рідина стікає по поверхні у вигляді плівки.

У режимі проміжного псевдозрідження насадкові тіла, розташовані поблизу стінок, починають рухатися вниз і переходять в центральну частину апарату.

У режимі розвиненого (повного) псевдозрідження всі насадкові тіла знаходяться в псевдозрідженому стані, циркулюючи всередині апарату: в центральній частині рух направлено вгору, а під стінками – вниз. Кількість рідини, що утримується в апараті, зростає і вона присутня в основному у вигляді крапель або у складі газоріднинної структури, близької до барботажного шару.

Разом з подальшим зростанням швидкості газу збільшується обсяг утримуваної рідини в шарі, що, в підсумку, веде до захливання апарату.

В апаратах діаметром більше 0,4 – 0,5 м режим проміжного псевдозрідження не спостерігається. Це можна пояснити тим, що при великому діаметрі роль пристінних насадкових елементів, що ускладнюють псевдозрідження всієї насадки, невелика.

Характер залежності гідравлічного опору трифазного псевдозрідженого шару зрошуваної насадки від швидкості газу суттєво відрізняється від двофазної системи.

А саме: в режимі розвиненого псевдозрідження трифазного шару не відбувається виходу на пряму $\Delta p = const$. Це пов'язано з тим, що зі збільшенням швидкості газу насадкові тіла утримують більшу кількість рідини, що в свою чергу призводить до зростання гідравлічного опору апарату.

Крім того, на гідравлічний опір апарату з трифазним шаром істотний вплив має опір опорно-розподільної тарілки: чим менше вільний перетин тарілки, тим більше відхилення на графіку залежності гідравлічного опору від швидкості газу в апараті від горизонтальної прямої в режимі розвиненого псевдозрідження.

У **пінних апаратах** питоме зрошення при очищенні газів (без необхідності охолодження) становить від 0,4 до 0,6 л/м³ газу.

Щільність зрошення, кг/(м² с):

$$L = mw_2\rho_p \quad (1)$$

де m – питоме зрошення, м³/м³ газу; ρ_p – щільність рідини, кг/м³; w_2 – швидкість газу в апараті, м/с

Мінімальна лінійна швидкість газів, при якій утворюється пінний режим в зазначених межах щільності зрошення, може бути прийнята рівною від 1,0 до 1,2 м/с. Максимальна швидкість газів при пінному режимі $w_{кр}$, м/с, розраховується методом послідовних наближень за емпіричною залежністю [11]:

$$\lg w_{кр} = 1350 \frac{s_0^2 d_e}{A} + 0,154 \quad (2)$$

де d_e – еквівалентний діаметр отворів тарілки, м: для дірчастих тарілок $d_e = d_0$, для щілинних $d_e = 2b$; A – коефіцієнт, який визначається з виразу

$$A = 38,8(W_p / W_{cm})^{-0,57} m^{0,57} (\rho_p / \rho_g)^{0,35}, \quad (3)$$

де W_{cm} – стандартна щільність зрошення, рівна 1 кг/(м²с).

При розрахунку попередньо задаються лінійною швидкістю газів в апараті, приймаючи її рівною 2 – 2,3 м/с, і за рівнянням (1) визначають W_p .

Робоча швидкість газів w_2 в апараті (на вході в шар піни) повинна становити від 0,9 в апараті (на вході в шар піни) повинна становити від 0,9 до 0,95 $w_{кр}$. Якщо $w_{кр}$ виявиться за розрахунком менше прийнятої w_2 або більше, ніж $1,1w_2$, то розрахунок повторюють, уточнюючи прийняте раніше значення w_2 .

Діаметр апарату:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi w_2}}, \quad (4)$$

де Q – витрати газу, що подається в апарат, м³

Якщо $D > 2,5$ м, то слід встановлювати декілька паралельних апаратів. У цьому випадку велику увагу необхідно приділяти рівномірності розподілу газів по всій площі перетину апаратів. Тому в апаратах великого діаметру іноді замість однієї встановлюють дві тарілки, вважаючи, що перша з них (по ходу газів) забезпечує рівномірний газорозподіл.

Повний гідравлічний опір апарату, Па, визначається за рівнянням:

$$\Delta P = \Delta P_{ex} + \Delta P_T + \Delta P_{вих} + \Delta P_{кан}, \quad (5)$$

де ΔP_{ex} – гідравлічні втрати при вході газів в апарат, Па; $\Delta P_{вих}$ – гідравлічні втрати при виході газів з апарату, Па; ΔP_T – повний гідравлічний опір однієї або декількох тарілок (в разі багатополічного апарату) з шаром піни, Па; $\Delta P_{кан}$ – гідравлічний опір краплевловлювача, вбудованого в апарат, Па.

Значення ΔP_{ex} , $\Delta P_{вих}$ невеликі і становлять 50 – 100 Па, більш точно можуть бути розраховані за рекомендаціями [12].

Повний гідравлічний опір тарілки, Па, визначають за формулою

$$\Delta P_T = A^2 \frac{w_2^2 \rho_g}{2s_0^2} + \Delta P_\sigma \quad (6)$$

де ΔP_σ – гідравлічний опір, що створюється силами поверхневого натягу, Па.

При пінному режимі коефіцієнт A розраховується з виразу (3).

Для щільних тарілок

$$\Delta P_{\sigma} = 2s / b, \quad (7)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу за умов на межі поділу фаз газ – рідина, Н/м.

Для дірчастих тарілок

$$\Delta P_{\sigma} = \frac{4\sigma}{1,3d_0 + 0,08d_0^2} \quad (8)$$

Гідродинамічний розрахунок пінних апаратів з провальними тарілками може бути проведений по номограмі, наведеної в роботі [13]. За її допомогою визначають один з чотирьох параметрів (w_2, m, d_0, S_0) при трьох інших заданих, гідравлічний опір тарілки ΔP_T , а також висоту шару піни на тарілці а також висоту шару піни на тарілці H_{II} . Номограма застосовна в межах параметрів, відповідних пінному режиму, тобто при швидкостях газів від 0,8 до 2,0 м/с.

Для зменшення вносу бризок відстань від верхньої тарілки до місця відведення газів з апарату повинно бути не менше 1,0 м.

Якщо апарат з провальними тарілками використовується для охолодження, зволоження і попереднього очищення (кондиціонування) газів або встановлюється перед іншим мокрим пиловловлювачем, він може працювати при $w_2 > w_{кр}$, але нижче швидкості точки захливання, м/с

$$w_{захл} = 0,416 \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \cdot S_0 \varphi}, \quad (9)$$

Частка вільного перетину тарілки, зайнятого газом:

$$\varphi = 1 - \frac{1,37 \cdot \sqrt[3]{m^2 \rho_p / (\rho_g \xi_{сух})}}{1 + 1,37 \cdot \sqrt[3]{m^2 \rho_p / (\rho_g \xi_{сух})}} \quad (10)$$

де $\xi_{сух}$ – коефіцієнт гідравлічного опору сухої тарілки, зазвичай застосовуються в пінних пиловловлювачах дірчастих і щільних тарілок товщиною 4 – 6 мм $\xi_{сух} = 1,6 - 1,7$. Значення $\xi_{сух}$ для різних типів тарілок наведені в [12].

Гідравлічний опір провальних тарілок з вільним перетином $S_0 = 0,25 \text{ м}^2/\text{м}^2$ при $w_2 > w_{кр}$, а також провальних тарілок з великим вільним перетином розраховується також за формулою (6).

Гідравлічний опір пінного газопромивача зі стабілізатором пінного шару розраховується за формулою (5), причому

$$\Delta P_T = \frac{\xi_{сух} \rho_g w_2^2}{2S_0^2 \varphi^2} + \Delta P_{II} + \Delta P_{\sigma} \quad (11)$$

Швидкісні газопромивачі (скрубери Вентурі)

об'єднують велику групу апаратів, загальним для яких є наявність труби-розпилювача (труби Вентурі), в якій здійснюється інтенсивне дроблення рідини газовим потоком, що рухається з високою швидкістю (близько 40 – 150 м / с), і встановленого за нею крапле вловлювача. Гідравлічний опір скрубєрів Вентурі складається з гідравлічних опорів труби-розпилювача і краплєвловлювача, причому основна частина втрат енергії припадає на трубу Вентурі [13].

Гідравлічний опір труби-розпилювача, ΔP , при подачі в неї зрошувальної рідини зручно розглядати як суму доданків

$$\Delta P = \Delta P_z + \Delta P_p, \quad (12)$$

де ΔP – гідравлічний опір труби-розпилювача, Па; ΔP_z – гідравлічний опір труби-розпилювача, обумовлений рухом газів (без зрошення), Па; ΔP_p – гідравлічний опір труби-розпилювача, обумовлений введенням зрошувальної рідини, Па.

$$\Delta P_z = \xi_{сух} \rho_g w_2^2 / 2 \quad (13)$$

де $\xi_{сух}$ – коефіцієнт гідравлічного опору сухої труби-розпилювача; w_2 – швидкість газів в горловині при умовах по температурі і тиску на виході з труби-розпилювача, м/с; ρ_g – щільність газів при тих же умовах, кг/м³.

Коефіцієнт гідравлічного опору сухої труби-розпилювача з круглою і прямокутною горловиною довжиною $0,15 d_{ек}$ ($d_{ек}$ – еквівалентний діаметр горловини, м) приймається в межах від 0,12 до 0,15. Для труб-розпилювачів прямокутного і круглого перетину з довжиною горловини $10 d_{ек} > l_r > 0,15 d_{ек}$

$$\xi_{сух} = 0,165 + 0,034 \frac{l_z}{d_{ек}} \left(0,06 + \frac{l_z}{d_{ек}} \right) M, \quad (14)$$

де $M = w_2 / w_{36}$ – число Маха; w_{36} – швидкість звуку, м/с.

Вираз (14) справедливий при швидкості газів в горловині до 150 м/с, причому обидві швидкості (w_2 та w_{36}) приймаються за умов по температурі і тиску на виході з труби-розпилювача.

$$\Delta P_p = \xi_p \frac{\rho_p w_2^2}{2} m, \quad (15)$$

де ξ_p – коефіцієнт гідравлічного опору, що враховує введення в трубу-розпилювач зрошувальної рідини, m – питома витрата зрошувальної рідини, м³/м³ газів; ρ_p – щільність зрошувальної рідини, кг/м³.

Коефіцієнт гідравлічного опору визначається за формулою:

$$\xi_p = A \xi_{cx} m^{1+B}, \quad (16)$$

де A, B – емпіричні коефіцієнти.

При розрахунках швидкість газів щодо краплі $w_{o,z}$ приймається рівною швидкості газів в горловині труби-розпилювача, діаметр краплі розраховується за формулою Таназави - Нукіями, що характеризує середній діаметр крапель, що утворюються при розпорощенні рідини пневматичною форсункою [13]:

$$d_k = \frac{585 \div 10^{-3} \sqrt{\sigma}}{w_{o,z} \sqrt{\rho_p}} + 53,4 \left(\frac{\mu_p}{\sqrt{\rho_p \sigma}} \right)^{0,45} \left(\frac{Q_p}{Q_z} \right)^{1,5}, \quad (17)$$

Так як співвідношення Q_p/Q_z зазвичай мало, величина d_k практично визначається першою частиною рівняння, а саме, діаметр крапель майже не залежить від в'язкості рідини.

Апарати з рухомою насадкою. До гідравлічних характеристик колонних масообмінних апаратів з рухомою насадкою відносяться гідравлічний опір, динамічна висота і газовміст газорідинного шару, кількість утримуваної рідини на решітці h_0 , динамічний рівень рідини d_o (для апаратів з циркулюючою насадкою) та інші [14, 15].

Кількість утримуваної рідини, віднесена до площі перетину апарату h_0 та динамічний рівень рідини d_o :

1. Для апаратів зі зваженою насадкою

$$Fr = \frac{\rho_z w_z^2}{\rho_p g h_p} = x \left(\frac{w_z}{w_p} \right)^z \cdot \left(\frac{H_{cm}}{d_n} \right)^{-0,25} \left(\frac{\rho_n}{\rho_p} \right)^{0,1} \cdot S_0^{0,2}, \quad (18)$$

при $w_z < 3$ м/с, $x = 0,0075$, $z = 0,33$;

при $w_z > 3,0$ м/с, $x = 0,017$, $z = 0,29$

2. Для апаратів з фонтануючою насадкою

$$Fr = x \left(\frac{w_z}{w_p} \right)^z \cdot \left(\frac{H_{cm}}{d_n} \right)^{-0,25} \left(\frac{\rho_n}{\rho_p} \right)^{0,1} \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^{0,15} \cdot S_0^{0,25}, \quad (19)$$

при $w_z < 3$ м/с, $x = 0,007$, $z = 0,33$;

при $w_z > 3,0$ м/с, $x = 0,017$, $z = 0,43$

3. Для апарату з циркулюючою насадкою

$$\zeta = \frac{307}{\operatorname{Re}_z^{0,85}}, \quad (20)$$

при $w_z = 4,0 \div 8,0$ м/с; $h_0 = -0,04 \div 0,03$ м;

Динамічна висота газорідинного шару H_o

для апаратів зі зваженою насадкою, зваженою насадкою зі стабілізатором шару і для апаратів з фонтануючою насадкою знаходиться за формулою:

$$H_o = \left[H_{cm}(1-\varepsilon_0) + h_0 \left(\frac{1}{K} \sqrt{\frac{\rho_z w_z^2}{\rho_p g h_p + (1-\varepsilon_0) \rho_n g H_{cm}}} + 1 \right) \right], \quad (21)$$

де ε_0 – порозність насадочного шару в статичному стані; коефіцієнт для апаратів зі зваженою насадкою 0,043; для апаратів зі зваженою насадкою зі стабілізатором шару $K = 0,08$; для апаратів з фонтануючою насадкою $K = 0,065$

Для апарату з циркулюючою насадкою в режимі повної циркуляції, (тобто в робочому режимі), динамічна висота газорідинного шару дорівнює висоті зони циркуляції.

Газовміст газорідинного шару φ для апаратів зі зваженою насадкою, зваженою насадкою зі стабілізатором шару і для апаратів з фонтануючою насадкою розраховується за формулою [14]

$$H_o = \frac{w_z}{K \sqrt{\frac{g}{\rho_z} (\rho_p g h_p + (1-\varepsilon_0) \rho_n g H_{cm})} + w_z}, \quad (22)$$

для апаратів зі зваженою насадкою $K = 0,043$; для апаратів зі зваженою насадкою зі стабілізатором шару $K = 0,08$; для апаратів з фонтануючою насадкою $K = 0,065$.

Для апарату з циркулюючою насадкою в практичних розрахунках газовміст газорідинного шару можна приймати рівним $\varphi = 0,7 \div 0,8$.

Гідравлічний опір ΔP для апаратів зі зваженою насадкою, зваженою насадкою зі стабілізатором пінного шару і для апаратів з фонтануючою насадкою розраховується за формулою [14].

$$\Delta P = \Delta P_{c,p} + \Delta P_{c,n} + \Delta P_{cp}, \quad (23)$$

Тут гідравлічний опір сухої решітки:

$$\Delta P_{c,p} = \zeta_{c,p} \frac{\rho_z w_z^2}{2 \cdot S_0^2}, \quad (24)$$

для апаратів зі зваженою насадкою $\zeta_{c,p} = 1,5$; для апаратів зі зваженою насадкою зі стабілізатором шару $\zeta_{c,p} = 1,5$; для апаратів з фонтануючою насадкою $\zeta_{c,p} = 1,9$.

Гідравлічний опір сухої насадки для зазначених типів апаратів

$$\Delta P_{c,n} = (1-\varepsilon_0) \rho_n g H_{cm}, \quad (25)$$

при $w_z > 3,0$ м/с

Гідравлічний опір газорідинного шару [14]:

$$\Delta P_{cp} = \left(\varepsilon - \varphi - 4 \left(\frac{d_n}{D_a} \right)^2 \frac{\delta_n}{H_o} \cdot n_e \right) \rho_p g H_o, \quad (26)$$

При цьому:

$$\delta_n = 0,8 \frac{v_p^{1/2} U_p^{1/3} d_n^{1/3}}{g^{1/2}}, \quad (27)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{(1 - \varepsilon_0) H_{cm}}{H_\delta} \quad (28)$$

$$n_e = \frac{3(1 - \varepsilon_0) H_{cm} D_a^2}{2d_n^2}, \quad (29)$$

Гідралічний опір ΔP для апарату з циркулюючою насадкою [14].

$$\Delta P = \Delta P_{cyx} \left[1 + K_1 (Fr)^{-K_2} \right], \quad (30)$$

де $K_1 = 0,365$, $K_2 = 1,0$

Гідралічний опір сухого апарату з циркулюючою насадкою

$$\Delta P_{cyx} = \zeta_{ex} \frac{\rho_z w_{nam}^2}{2} + H_{cm} (1 - \varepsilon_0) \rho_n g \frac{d_n}{d_k}, \quad (31)$$

де $\zeta_{ex} = 7,5$, $w_z > 3,0$ м/с.

Критерій Фруда

$$Fr = \frac{\rho_z w_{nam}^2}{\rho_p g \Delta h}, \quad (32)$$

де

$$\Delta h = h_\delta + h_0, \quad (33)$$

Розрахунок ефективності масообміну

Гідродинамічні режими руху крапель і плівок в газорідному шарі пінних апаратів різко відрізняється. Тому закономірності масовіддачі в краплі і плівці рідини різні [14, 15].

Рівняння для розрахунку коефіцієнта масовіддачі в краплі має такий вигляд.

$$\beta_p^k = K_k \frac{\rho_z^{0,25} U_p^{0,22} D_M^{0,5}}{\rho_p^{0,25} v_p^{0,12} d_k^{0,26} \sigma^{0,1}}, \quad (34)$$

або у вигляді співвідношень безрозмірних критеріїв:

$$Sh_p^k = K_k Re_k^{0,63} We^{0,1} K_p^{0,25} Sc^{0,5}, \quad (35)$$

Середній розмір крапель в шарі визначається за рівнянням

$$d_k = 9,7 \frac{\sigma^{0,6} \delta_n^{0,4}}{\rho_z^{0,4} \rho_p^{0,2} U_p^{1,2}}, \quad (36)$$

Для розрахунку β_p^k з урахуванням діаметра крапель можна скористатися наступним рівнянням:

$$\beta_p^k = K_k \frac{\sigma^{0,6} \delta_n^{0,4}}{\rho_p^{0,2} v_p^{0,12} \sigma^{0,3} d_n^{0,02}}, \quad (37)$$

або

$$Sh_p^k = K_k Re_k^{0,62} We^{0,3} K_p^{0,2} Sc^{0,5}, \quad (38)$$

Коефіцієнт масовіддачі в плівці визначається

наступним рівнянням

$$\beta_p^{nl} = K_{nl} \frac{U_p^{2/3} g^{1/12} D_M^{1/2}}{v_p^{1/2} d_n^{1/12}}, \quad (39)$$

або

$$Sh_p^{nl} = K_{nl} Re_p^{2/3} Ga^{1/12} Sc^{1/2}, \quad (40)$$

Коефіцієнт масовіддачі в рідкій фазі визначається підсумовуванням коефіцієнтів масовіддачі в краплі і плівці.

$$\beta_p = \beta_p^k + \beta_p^{nl} = K_k \frac{\rho_z^{0,6} U_p^{1/2} D_M^{0,5}}{\rho_p^{0,2} v_p^{0,12} \sigma^{0,3} d_n^{0,08}} + K_{nl} \frac{U_p^{2/3} g^{0,08} D_M^{0,5}}{v_p^{0,5} d_n^{0,08}}, \quad (41)$$

Коефіцієнти пропорційності K_k і K_{nl} рівняння (41) визначаються з наступної таблиці.

Таблиця 1 – Визначення коефіцієнтів пропорційності

Апарати	Зі зваженою насадкою	З фонтануючою насадкою
K_k	2,84	4,12
K_{nl}	81,2	43,1

Для розрахунку **коефіцієнта масовіддачі в газовій фазі** в апараті зі зваженою насадкою у випадках абсорбції фтористих газів різними поглиначами пропонується наступне загальне рівняння [14]:

$$\beta_z = A \cdot w_z^{1,1} L^{0,13} H_{cm}^{0,43} d_n^{-0,3} \rho_n \cdot e^{1,8S_0}, \quad (42)$$

В якому постійна A визначається експериментально для кожної системи газу і поглинача

Для апаратів з фонтануючою насадкою

$$\beta_z = A \cdot w_z^{1,0} L^{0,1} H_{cm}^{0,3} d_n^{-0,1} \rho_n^{0,15} \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) e^{2S_0}, \quad (43)$$

Ефективність або ступінь абсорбції визначається з рівняння [14]:

$$\beta_z = w_z \ln \frac{c_n}{c_k}, \quad (44)$$

Визначається кінцева концентрація c_k при відомій початковій концентрації c_n газу, що абсорбується.

Ефективність або ступінь абсорбції дорівнює

$$\eta = \frac{c_n - c_k}{c_n} \cdot 100\%, \quad (45)$$

Обговорення результатів

Помітна різниця форми рівнянь, справедливості їх тільки для порівняно вузьких діапазонів робочих умов, не дозволяє рекомендувати застосування цих залежностей для розрахунку промислових або пілотних установок, що працюють в інших гідродинамічних режимах, або на інших взаємодіючих системах [16, 17].

Визначення гідравлічних опорів газорідного шару з псевдозрідженою насадкою, також як і визначення повних гідравлічних опорів, проводиться за допомогу рівнянь різного виду.

В основному підходи до визначення швидкості початку псевдозрідження зрошуваного шару є емпіричними. При наявності зрошення дослідники, як правило, базуються на характері кривої псевдозрідження, трактуючи її перегини, як кордони різних режимів псевдозрідження. При цьому часто роблять недостатньо аргументовані висновки.

Так як раніше було висловлено припущення про перспективність використання сітчастих матеріалів для виготовлення насадкових тіл, то слід підкреслити особливість роботи апаратів з подібними насадками [18]. В апаратах з кульовими насадками газ проходить між каналами, утвореними насадочними тілами, а рідина у вигляді плівок і крапель стікає по поверхні куль. У випадку з сітчастою насадкою взаємодія газу з рідиною відбувається не тільки на поверхні насадки, але і всередині її обсягу. Тому механізм переходу насадки в режим розвиненого псевдозрідження буде істотно відрізнятися від звичайних кульових насадок. Отже, необхідне проведення спеціальних досліджень гідродинамічних режимів роботи апарату з сітчастою насадкою і визначенням параметрів, що впливають на швидкість переходу насадки з одного режиму в інший.

Вивчення масопередачі в абсорбері з псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки ускладнене тим, що поверхня контакту між фазами може значно змінюватися в залежності від гідродинамічних умов, зокрема, від швидкості газу і щільності зрошення. При цьому важко встановити вплив зазначених факторів сам по собі на поверхню контакту і на коефіцієнт масопередачі.

При оцінці ефективності абсорберів з трифазним шаром використовують коефіцієнти масопередачі (об'ємні і поверхневі) або число одиниць перенесення. Об'ємний коефіцієнт масопередачі відносять до одиниці статичного обсягу насадки (коефіцієнт K_v) або до одиниці динамічного обсягу шару (коефіцієнт K_d).

Розглянуті рівняння показують, що визначення інтенсивності перенесення речовини в шарі з псевдозрідженою зрошуваною насадкою не має твердо встановлених закономірностей. Всі наведені рівняння мають емпіричний характер, що визначає можливість їх застосування тільки для умов дослідів, на прикладі яких вони виведені. Це показує, що вивчення інтенсивності перенесення речовини в шарі

псевдозрідженої насадки вимагає подальших досліджень.

Таким чином, розрахунок і проектування апаратів з псевдозрідженою насадкою проводиться поки тільки на основі експериментальних даних [19, 20], отриманих на обмеженій кількості взаємодіючих систем. Теоретичні положення розроблені недостатньо, тому, на практиці основне застосування в апаратах з рухомою насадкою знаходить лише кульова насадка як найбільш досліджена, а інші конструкції залишаються незатребуваними.

Висновки

З наведених вище положень можна зробити висновок, що на процес масообміну, як в газовій, так і в рідкій фазах, істотний вплив роблять гідродинамічні параметри – швидкість газу в апараті і питома навантаження по рідині, які опосередковано впливають, на висоту шару рідини на тарілці і газовміст шару, а також не досліджені фізико-хімічні властивості взаємодіючих систем.

Аналіз ряду досліджень показує, що перспективним напрямком інтенсифікації процесу масообміну є розробка апаратів з трифазним псевдозрідженим шаром зрошуваної насадки складних форм із сітчастих матеріалів. Для систем очищення газів від газоподібних компонентів необхідно забезпечити малі навантаження по рідині при збереженні високого ступеня очищення. Цього можна досягти шляхом використання провальної тарілки з невеликим вільним перетином і нової розробленої насадки.

Промислова реалізація методу стабілізації газорідного шару дозволяє значно розширити сферу застосування пінних апаратів і відкриває нові можливості інтенсифікації технологічних процесів з одночасним створенням маловідходних технологій.

Список літератури

1. Балабеков, О. С. Гидродинамика, массообмен и пилеулавливание при противоточных и прямоточных двухфазных капельных и пленочных течениях в слое подвижной насадки: дис. д-ра техн. наук: 05.17.08 / Балабеков Оразалы Сатимбекович. - М., 1985. – 295с.
2. Ляшук, А. Гидродинамические характеристики абсорбера с подвижной насадкой / А. Ляшук, М. Г. Беренгартен // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2001. – 13. – С. 3–7.
3. Nikov, J. Solid – liquid mass transfer in three – phase fixed and fluidized beds / J. Nikov, H. Delmas // *Chem. Eng. Sci.* – 1987. – V.42. – J5. – P. 1089-1093.
4. Palaty, Z. Koefficienty pfestupe hmoty v plynu v absorberu s pohyblivon naplni / Z. Palaty // *Sb.Ved.pr.VSCHT, Pardubice*. – 1991. – 55. – P.283-301.
5. Сабырханов, Д. Классификация аппаратов с подвижной насадкой / Д. Сабырханов, О. С. Балабеков, С. С. Серманизов. – Чимкент, 1983. – С. 17. Деп. В НИИТЭХИМ. №266 X11-Д83.
6. Новиков, А. И. Конические скрубберы с псевдооживленной шаровой насадкой / А. И. Новиков, А. П. Скворцов, В. А. Кишкарев // *Хим.пром.* – 1974. –

№ 11. – С. 846-849.

7. **Ковалев, О. С.** Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений / **О. С. Ковалев, И. Л. Мухленов.** – М.: Химия, 1987. – 208 с.
8. **Балтабаев, Л. Ш.** Исследование процессов очистки отходящих газов фосфорного производства в аппаратах с подвижной насадкой: дис. канд. техн. наук: 05.17.08 / **Балтабаев Леонид Шакирович.** – М., 1973. – 190с.
9. **Каган, А. М.** Высокоэффективное контактное устройство для процессов абсорбции и ректификации – нерегулярная металлическая насадка ГИАП-НЗ / **А. М. Каган, Н. И. Гельперин, В. В. Дильман, Л. А. Юдина, А. А. Палимов, А. С. Пушнов** // *Хим. пром.* – 1992. – №8. – С. 28 – 34.
10. **Витковская, Р. Ф.** Полимерные контактные устройства из объемных структур для тепло- массообменных аппаратов / **Р. Ф. Витковская, Н. Ф. Зыбина** // *Вестник С.-Петербургского гос. ун-та технологии и дизайна.* – 1998. – №2. – С. 120-127.
11. **Вальдберг, А. Ю.** К вопросу о предельных параметрах пенного режима в аппаратах с полным протеканием жидкости через отверстия решеток. / **А. Ю. Вальдберг, Э. Я. Тарат** // *Журнал прикладной химии.* – 1970. – 43, №8. – С. 1712-1715.
12. **Идельчик, И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Изд. 2-е, перераб. и доп. / **И. Е. Идельчик.** – М.: Машиностроение, 1975. – 560 с.
13. **Биргер, М. И.** Справочник по пыли — и золоулавливаю. / **М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков и др.** // Под общ. ред. А. А. Русанова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
14. **Балабеков, О. С.** Расчет и конструирование тепломассообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой / **О. С. Балабеков, А. А. Волненко.** — Шымкент, 2015- 184 с.
15. **Балабеков, О. С.** Расчет и конструирование аппаратов с подвижной насадкой. / **О. С. Балабеков.** — Алма-Ата. 1984. – 34 с.
16. **Perry, D. C.** Gas absorption and reaction in a wet pneumatic foam / **D. C. Perry, P. Stevenson** // *Chemical Engineering Science.* – 2015. – V. 126. – P. 177-185. – doi:10.1016/j.ces.2014.11.037.
17. **Marias, F.** Effects of Freeboard Volatile Release During Fluidized Bed Incineration of a Model Waste // **F. Marias, J. R. Puiggali, G. Flamant** // *Process Safety and Environmental Protection.* – 2001. – V. 79, Issue 4, – P. 244-252. – doi:10.1205/095758201750362280.
18. **Моисеев, В. Ф.** Обработка газожидкостных систем на трубчатых решетках со стабилизатором пенного слоя / **В. Ф. Моисеев, Е. В. Манойло, М. И. Васильев, К. Ю. Репко, Д. В. Давыдов** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* - Харьков: НТУ «ХПИ». - 2017. – № 53 (1274). – С. 114-123. – doi:10.20998/2413-4295.2017.53.17.
19. **Yin, F. H.** CFD Simulation and Experimental Study of Liquid Dispersion in Randomly Packed Metal Pall Rings / **F. H. Yin, A. Afacan, K. Nandakumar, K. T. Chuang** // *Chemical Engineering Research and Design.* – 2002. – V. 80, Issue 2. – P. 135-144. – doi:10.1205/026387602753501852.
20. **Jungkee, Jang.** CFD simulation of a pharmaceutical bubbling bed drying process at three different scales / **Jungkee Jang, Hamid Arastooour** // *Powder Technology.* – 2014. – V. 263. – P. 14-25. – doi:10.1016/j.powtec.2014.04.054.

Bibliography (transliterated)

1. **Balabekov, O. S.** Gidrodinamika, massoobmen i pyleulavlivaniye pri protivotochnykh i pryamotochnykh dvukhfaznykh kapel'nykh i plenochnykh techeniyakh v sloye podvizhnoy nasadki: dis. d-ra tekhn. nauk: 05.17.08 / **Balabekov Orazaly Satimbekovich.** M., 1985, 295.
2. **Lyashuk, A., Berengarten, M. G.** Gidrodinamicheskiye kharakteristiki absorbera s podvizhnoy nasadkoy. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye*, 2001, **J3**, 3–7.
3. **Nikov, J., Delmas, H.** Solid – liquid mass transfer in three – phase fixed and fluidized beds. *Chem. Eng. Sci*, 1987, **42**, J5, 1089-1093.
4. **Palaty, Z.** Koefficienty pfestupe hmoty v plynu v absorberu s pohyblivon naplni. *Sb.Ved.pr./VSCHT, Pardubice*, 1991, **55**, 283-301.
5. **Sabyrkhanov, D., Balabekov, O. S., Sermanizov, S. S.** Klassifikatsiya apparatov s podvizhnoy nasadkoy. *Chimkent*, 1983, 17. Dep. V NIITEKHIM. №266 KH11-D83.
6. **Novikov, A. I., Skvortsov, A. P., Kishkarev, V. A.** Konicheskiye skrubbery s psevdoozhizhennoy sharovoy nasadkoy. *Khim.prom*, 1974, **11**, 846-849.
7. **Kovalev, O. S., Mukhlenov, I. L.** Absorbtsiya i pyleulavlivaniye v proizvodstve mineral'nykh udobreniy. M.: Khimiya, 1987, 208.
8. **Baltabayev, L. Sh.** Issledovaniye protsessov oчитki otkhodyashchikh gazov fosfornogo proizvodstva v apparatakh s podvizhnoy nasadkoy: dis. kand. tekhn. nauk: 05.17.08 / **Baltabayev Leonid Shakirovich.** M., 1973, 190.
9. **Kagan, A. M., Gel'perin, N. I., Dil'man, V. V., Yudina, L. A., Palimov, A. A., Pushnov, A. S.** Vysokoeffektivnoye kontaktnoye ustroystvo dlya protsessov absorbtsii i rektifikatsii – neregulyarnaya metallicheskaya nasadka GIAP-NZ. *Khim. prom*, 1992, **8**, 28 – 34.
10. **Vitkovskaya, R. F., Zyбина, N. F.** Polimernyye kontaktnyye ustroystva iz ob'yemnykh struktur dlya teplo-masoobmenykh apparatov. *Vestnik S.-Peterburgskogo gos. un-ta tekhnologii i dizayna*, 1998, **2**, 120-127.
11. **Val'dberg, A. Yu., Tarat, E. Ya.** K voprosu o predel'nykh parametrah pennogo rezhima v apparatakh s polnym protokaniyem zhidkosti cherez otverstyia reshetok. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 1970, **43**, 8, 1712-1715.
12. **Idel'chik, I. Ye.** Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. Izd. 2-ye, pererab. i dop. M.: Mashinostroyeniye, 1975, 560.
13. **Birger, M. I., Val'dberg, A. Yu., Myagkov, B. I., i dr.** Spravochnik po pyle — i zoloulavlivaniyu. Pod obshch. red. A. A. Rusanova, M.: Energoatomizdat, 1983, 312.
14. **Balabekov, O. S., Volnenko, A. A.** Raschet i konstruirovaniye teplomassoobmennykh i pyleulavlivayushchikh apparatov s podvizhnoy i regul'yarnoy nasadkoy. Shymkent, 2015, 184.
15. **Balabekov, O. S.** Raschet i konstruirovaniye apparatov s podvizhnoy nasadkoy. Alma-Ata, 1984, 34.
16. **Perry, D. C., Stevenson, P.** Gas absorption and reaction in a wet pneumatic foam. *Chemical Engineering Science*, 2015, **126**, 177-185, doi:10.1016/j.ces.2014.11.037.
17. **Marias, F., Puiggali, J. R., Flamant, G.** Effects of Freeboard Volatile Release During Fluidized Bed Incineration of a Model Waste. *Process Safety and Environmental Protection*, 2001, **79**, 4, 244-252, doi:10.1205/095758201750362280.
18. **Moiseev, V. F., Manoilo, E. V., Vasyliiev, M. I., Repko, K. Yu., Davydov, D. V.** Processing of gas-liquid systems on

- tubular gratings with stabilizer of a foam layer. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **53** (1274), 114–123, doi:10.20998/2413-4295.2017.53.17.
19. **Yin, F. H., Afacan, A., Nandakumar, K., Chuang, K. T.** CFD Simulation and Experimental Study of Liquid Dispersion in Randomly Packed Metal Pall Rings. *Chemical Engineering Research and Design*, 2002, **80**, 2, 135-144, doi:10.1205/026387602753501852.
20. **Jungkee, Jang, Hamid, Arastoopour.** CFD simulation of a pharmaceutical bubbling bed drying process at three different scales. *Powder Technology*, 2014, **263**, 14-25, doi:10.1016/j.powtec.2014.04.054.

Сведения об авторах (About authors)

Моїсєєв Віктор Федорович – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; e-mail: vmoiseev1209@gmail.com.

Victor Moiseev – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Associate Professor of Department of "Chemical Technics and Industrial Ecology", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: vmoiseev1209@gmail.com.

Манойло Євгенія Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; e-mail: bublikova1@gmail.com.

Eugenia Manoilo - Candidate of Technical Sciences, Docent of Department of "Chemical Technics and Industrial Ecology", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: bublikova1@gmail.com.

Пономарьова Наталія Георгіївна - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, м. Харків, Україна.

Natalia Ponomarova - Candidate of Technical Sciences, Docent of Department of "Industrial technologies, processing and equipment", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

Репко Каліф Юрійович – магістр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна.

Kalif Repko – magister of science, aspirant of Department of "Chemical Technics and Industrial Ecology", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

Давидов Денис Валерійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна.

Denys Davydov - student of Department of "Chemical Technics and Industrial Ecology", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Моїсєєв, В. Ф. Методологія розрахунку режимно-конструктивних і гідродинамічних параметрів пінних апаратів для процесів масообміну / **В. Ф. Моїсєєв, Є. В. Манойло, Н. Г. Пономарьова, К. Ю. Репко, Д. В. Давидов** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 165-176. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.25.

Please cite this article as:

Moiseev, V., Manoilo, E., Ponomaryova, N., Repko, K., Davydov, D. Methodology of calculation of construction and hydrodynamic parameters of a foam layer apparatus for mass-transfer processes. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 165-176, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.25.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Моїсєєв, В. Ф. Методология расчета режимно-конструктивных и гидродинамических параметров пенных аппаратов для процессов массообмена / **В. Ф. Моїсєєв, Е. В. Манойло, Н. Г. Пономарьова, К. Ю. Репко, Д. В. Давидов** // *Вестник НТУ «ХПІ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16(1292). – С. 165-176. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.25.

АННОТАЦІЯ Промышленная реализация метода стабилизации газожидкостного слоя позволяет значительно расширить область применения пенных аппаратов и открывает новые возможности интенсификации технологических процессов с одновременным созданием малоотходных технологий. В статье установлены основные параметры, влияющие на гидродинамику пенных аппаратов, рассмотрены основные конструкции и режимы работы пенных аппаратов. Выявлена связь гидродинамических параметров. Рассмотрены гидродинамические закономерности пенного слоя. Указанные факторы, влияющие на процесс массообмена в газовой и в жидкой фазах. Проведенный анализ ряда исследований показал, что перспективным направлением интенсификации процесса массообмена является разработка аппаратов с трехфазным псевдооживленным слоем орошаемой насадки сложных форм из сетчатых материалов. Следовательно, необходимо проведение специальных исследований гидродинамических режимов работы аппарата с сетчатой насадкой и определением параметров, влияющих на скорость перехода насадки из одного режима в другой.

Ключевые слова: промышленные газовые выбросы; процесс улавливания; гидродинамика, массообмен; пенный аппарат; пенный слой, исследования процессов очистки; стабилизация пенного слоя; интенсивный аппарат

Поступила (received) 04.05.2018

УДК [637.146.34:637.247]:
[663.674:637.345–022.45]–021.465

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.26

КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ НЕПРЕРЫВНЫМ ПРОЦЕССОМ МЕМБРАННОГО УДАЛЕНИЯ ЛАКТОЗЫ ИЗ ПАХТЫ

А. А. ТРУБНИКОВА*

кафедра технологии молочных, олеино-жировых продуктов и косметики, ОНАХТ, м.Одеса, УКРАЇНА
*email: sc228004@ukr.net

АННОТАЦИЯ Мембранные процессы, такие как УФ, МФ, НФ, ОО давно зарекомендовали себя в качестве эффективного средства улучшения свойств различных молочных продуктов, в т.ч. вторичных (пахты, сыворотки, обезжиренного молока). Имея различные характеристики НФ и УФ мембраны могут эффективно задерживать высокомолекулярные вещества и пропускать низкомолекулярные. Кроме того, НФ мембраны способны разделить органические вещества от неорганических. Базируясь на этих свойствах мембран, их эксплуатационных характеристиках и общих зависимостях мембранного разделения можно эффективно удалять лактозу из концентратов пахты при сохранении минерального состава непрерывно. Мембранное разделение имеет при этом ряд преимуществ перед проведением ферментативного удаления лактозы, которое используют на практике. Непрерывность мембранного удаления лактозы может быть достигнута определенной комбинацией УФ, ДФ и НФ обработки. Целью данных исследований является изучение возможности организации непрерывного мембранного удаления лактозы из пахты и разработка соответствующей схемы установки. В ходе экспериментов определили, что УФ мембраны ВПУ-15000 по своим характеристикам подходят для УФ и ДФ. Их селективность по лактозе $R=1\%$. НФ мембраны марки ОПМН имеет высокую ($R=99,7\%$) селективность по лактозе и низкую по минеральным веществам. Это позволяет использовать их для получения пермеата, который применяется как буферный раствор. Разработана схема автоматического управления и контроля мембранного установкой, состоящая из трех блоков: УФ концентрирования, ДФ, и НФ. Установка обеспечивает непрерывную обработку пахты с целью получения высокобелково-липидного концентрата не содержащего лактозы. Слабым звеном мембранной установки является необходимость регенерации мембран. В этом направлении требуются дополнительные исследования.

Ключевые слова: мембраны; мембранные технологии; безлактозные продукты; диафильтрационная очистка; ультрафильтрация пахты; автоматизация мембранных процессов.

CONTROL AND MANAGEMENT CONTINUOUS MEMBRANE PROCESS REMOVAL LACTOSE WITH BUTTERMILK

A. TRUBNIKOVA*

Department of technology of milk, oil and fat products and cosmetics, Odessa national Academy of food technologies, Odessa, UKRAINE

ABSTRACT Membrane processes, such as UV, MF, NF, RO have long established themselves as an effective means of improving the properties of various dairy products, incl. secondary (buttermilk, whey, skim milk). Having different characteristics of NF and UV membranes can effectively retard high-molecular substances and pass low-molecular. In addition, NF membranes are able to separate organic substances from inorganic ones. Based on these properties of membranes, their performance characteristics and general dependencies of membrane separation, it is possible to effectively remove lactose from buttermilk concentrates while maintaining the mineral composition continuously. Membrane separation has several advantages over the enzymatic removal of lactose, which is used in practice. Continuity of membrane lactose removal can be achieved by a specific combination of UV, DF and NF treatment. The aim of these studies is to study the possibility of organizing continuous membrane removal of lactose from buttermilk and developing an appropriate installation scheme. In the course of the experiments it was determined that the UV membranes of the ВПУ-15000 are suitable for UV and DF. Their selectivity for lactose is $R = 1\%$. The NF membrane of the ОПМН brand has a high ($R = 99.7\%$) selectivity for lactose and a low mineral content. This allows them to be used to produce permeate, which is used as a buffer solution. A scheme for automatic control and monitoring of a membrane plant was developed, consisting of three blocks: UV concentration, DF, and NF. The plant provides continuous processing of buttermilk to obtain a high-protein-lipid concentrate of lactose-free. A weak link in the membrane plant is the need for membrane regeneration. In this direction, more research is required.

Key words: membranes, membrane; technologies lactose-free products; diafiltration cleaning; ultrafiltration of buttermilk; automation of membrane processes.

Введение

Мембранные процессы, такие как УФ, МФ, НФ, и ОО давно зарекомендовали себя как выгодное

средство улучшения свойств и создания новых молочных продуктов. Во многих случаях только мембранные технологии позволяют решить проблему утилизации отходов и ВМР при значительной

экономии энергии, ресурсов и общих экономических затрат. При этом свойства полученных продуктов сохраняются близкими к естественным. Мембранные процессы используются для производства лечебно-профилактических продуктов в т.ч. для людей, страдающих непереносимостью лактозы [1,2].

Мембранные процессы осуществляют под давлением. Обрабатываемые растворы при этом циркулируют над поверхностью мембран. Мембраны в зависимости от размера пор и некоторых других характеристик избирательно пропускают и задерживают вещества с различным размером молекул. Например, при нанофильтрации эффективно задерживаются вещества с молекулярной массой 100...500 кДа, при ультрафильтрации $10^3...10^6$ Да. Имеет значение также заряд и форма молекулы. В общем случае при мембранной обработке из исходного раствора образуется два – ретентат (концентрат) и пермеат (фильтрат). Их химический состав отличается и зависит от вида растворенных веществ и размера пор мембран.

В молочной промышленности применение мембран известно давно. Мембранные технологии используют для концентрирования белков, нормализации молока, фракционирования белков, очистки стоков и обработки вторичных молочных ресурсов. Нативные свойства биологически активных веществ молока при этом сохраняются наиболее полно.

Важнейшее направление использования мембран – обработка пахты, которая содержит большинство компонентов молока [3], среди них лактоза, непереносимость которой отмечается у многих людей. В последние годы для удаления лактозы применяют мембраны, ферменты или их комбинацию. В большинстве случаев эта обработка реализуется периодическим способом. Например, в работе [4–7] исследованы технологические аспекты ультра- и нанофильтрации сыворотки, публикации [8] отражают микрофильтрационную обработку пахты. Ферментативный гидролиз и мембранная очистка предмет рассмотрения в работах [9–13].

И хотя эти способы достаточно точно отражают отдельные стадии процесса удаления лактозы т.е. ферментацию, ультрафильтрацию, диафильтрацию, данных, позволяющих осуществить процесс непрерывно крайне мало.

Целью данной работы является изучение возможности организации непрерывного удаления лактозы из пахты с применением мембранных технологий ультра- и нанофильтрации, которые реализуются в одной установке и разработка ее схемы контроля и управления.

Достижение этой цели осуществлялось через задачу лабораторного исследования ультра-, диа- и нанофильтрации для получения экспериментальных данных по производительности и селективным свойствам полуволоконных ультрафильтрационных мембран и плоских нанофильтрационных мембран.

Объекты и методы исследований

Пахта, полученная при производстве масла способом периодического сбивания на предприятии «ГМЗ №1» г.Одесса, была объектом ультрафильтрационного концентрирования и диафильтрации с целью получения основы для безлактозных и низколактозных продуктов.

Для ультрафильтрации применяли лабораторную установку УПЛ-0,6 с полуволоконным модулем АР-2 с мембранами (ВПУ-15000), материал мембран – полиамид. Для нанофильтрации пермеата пахты применяли лабораторную плоскорамную установку ФТ-01, оснащенную мембранами марки ОПМН-П, материал мембран – эфиры целлюлозы при рабочих параметрах $p = 1,6$ МПа, $t = 50$ °С.

Концентрацию компонентов химического состава определяли по общепринятым методикам [12].

В ходе обработки определяли фактор концентрирования пахты по формуле (1):

$$F = \frac{V_0}{V_k}, \quad (1)$$

где V_0 , V_k – соответственно начальный и конечный объем пахты при ультрафильтрации.

Селективность мембран по белку и лактозе определяли по формуле (2), (%):

$$R = \frac{C_k - C_\phi}{C_k}, \quad (2)$$

где C_k , C_ϕ – соответственно концентрация компонентов в концентрате (ретентате) и фильтрате (пермеате), %.

Эффективность удаления лактозы рассчитывали в зависимости от концентраций во время очистки по формуле (3):

$$\text{ЭУ} = \frac{C_{к0} - C_{кк}}{C_{к0}} \times 100\%, \quad (3)$$

где $C_{к0}$, $C_{кк}$ – соответственно концентрации лактозы в начале и в конце процесса для определенного диаобъема буфера, %.

Диафильтрационный объем буфера составлял соотношение:

$$\text{ДО} = \frac{V_\phi}{V_k}, \quad (4)$$

где V_ϕ – объем отобранного фильтрата, V_k – первоначальный объем концентрата пахты, взятый для очистки

Экспериментальные данные

Пахту концентрировали при следующих технологических параметрах: $p=1,5$ атм (0,15 МПа) и $t=50$ °С на полуволоконной установке. Полученный пермеат подвергался дальнейшей нанофильтрации. Селективность мембран ВПУ-15000 по лактозе, которая рассчитана по формуле 2, составила 1 %, для белка – 98,8 %.

Химический состав продуктов ультрафильтрационной обработки пахты при факторе концентрирования ($F=3$) приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав продуктов ультрафильтрационной обработки пахты

Показник	Пахта-сырье	УФ ретентат $F=3$	УФ пермеат $F=3$
Массовая доля белка, %	3,2	9,6	0,11
Массовая доля жира, %	0,4	1,2	–
Массовая доля лактозы, %	4,5	4,54	4,48
Массовая доля минеральных веществ, %	0,7	0,7	0,7

Приведенные в таблице 1 данные химического состава свидетельствуют о низкой задерживающей способности ультрафильтрационных мембран по отношению к лактозе и, особенно, минеральным веществам.

В качестве растворителя, который снижает концентрацию лактозы использован наночастицы пермеата ультрафильтрации пахты. Этот способ позволяет сохранять химический состав концентрата с эффективным удалением лактозы. На основе экспериментальных данных производительности мембран и их селективности по лактозе рассчитаны основные характеристики диафильтрации. Для практических целей целесообразно использовать

наночастицы пермеата пахты с применением высокоселективных по лактозе мембран. Селективность по солям должна быть минимальной.

Химический состав продуктов наночастицы ультрафильтрации в сравнение с исходным УФ пермеатом представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Изменение концентрации лактозы и минеральных веществ при наночастицы ультрафильтрации УФ пермеата

Показатель	УФ пермеат	НФ ретентат $F=4$	НФ пермеат
Массовая доля лактозы, %	4,48	17,9	0,05
Массовая доля минеральных веществ, %	0,70	0,73	0,70

Из данных таблицы 2 вытекает, что селективность испытываемых мембран по лактозе была очень высокой (больше 99 %). В тоже время, селективность по минеральным веществам практически равна 0 %.

Лабораторные эксперименты показали, что средняя производительность мембран при диафильтрации с применением наночастицы ультрафильтрации составила $10 \text{ л/м}^2 \cdot \text{ч}$.

Изменение концентраций лактозы в ретентате и пермеате представлены в табличном виде вместе с рассчитанной эффективностью удаления лактозы (табл. 3).

Таблица 3 – Эффективность удаления лактозы при диафильтрации

Показатель	Диафильтрационный объем, ДО						
	1	2	3	4	5	6	7
Концентрация лактозы в ретентате, $C_{к\text{л}}$, %	1,93	0,75	0,29	0,11	0,04	0,02	0,01
Концентрация лактозы в пермеате, $C_{ф\text{л}}$, %	3,07	2,10	1,57	1,22	0,99	0,83	0,71
ЭУ лактозы, ~ %	57,00	83,00	94,00	98,00	99,20	99,60	99,80

Расчет эффективности удаления лактозы показывает, что при диафильтрационном объеме 3 больше 90% этого нежелательного компонента удаляется из ретентата. По своим характеристикам ретентат становится низколактозным. Для достижения очень низких концентраций лактозы (меньше 0,1 %) необходимы затраты буфера эквивалентные больше 4 диафильтрационных объемов.

Теоретическое обоснование схемы управления мембранной установкой для удаления лактозы из пахты

Условия непрерывности работы:

$$Q_{H_2O} = Q_{НФР}$$

$$Q_{УФР} = Q_{ДФР}$$

$$ДО = Q_{НФП} / Q_{УФР} \quad ДО = 3 \dots 7$$

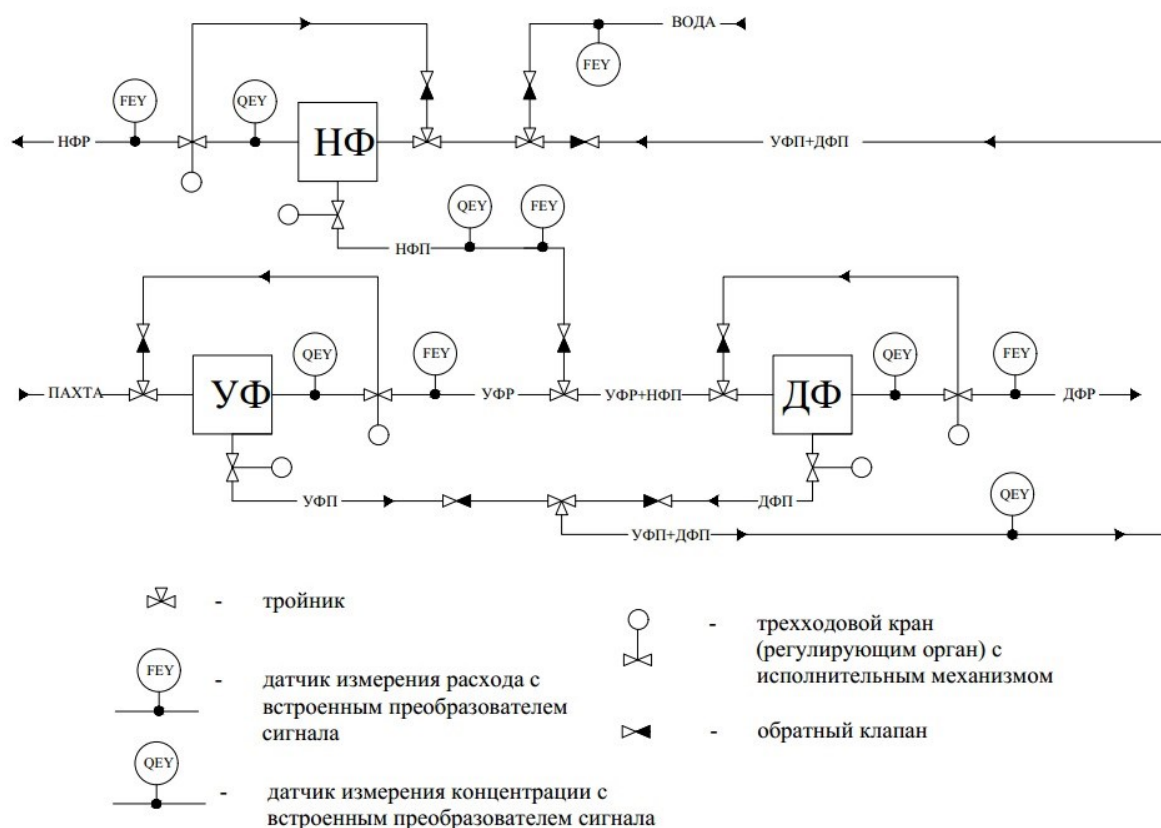


Рис. 1 – Схема мембранной установки для удаления лактозы из концентрата пахты

УФ – блок ультрафильтрационного концентрирования; ДФ – блок диафильтрации; НФ – блок нанофильтрации.

Потоки: П – пахта; УФР – ультрафильтрационный ретентат пахты; УФП – ультрафильтрационный пермеат пахты; ДФР – диафильтрационный ретентат пахты; ДФП – диафильтрационный пермеат пахты.

Разработанная схема мембранной установки для непрерывного удаления лактозы представлена на рис.1.

Установка содержит 3 блока мембранной обработки УФ, ДФ и НФ. Каждый из блоков выполняет свою задачу. Блок УФ обеспечивает концентрирование пахты до желаемого содержания ценных высокомолекулярных соединений (белков и жиров). Эта концентрация определяется фактором концентрирования пахты, который зависит от дальнейшего назначения ее концентрата. Например, если безлактозный концентрат предполагается использовать как основу для производства мороженого, то фактор концентрирования составляет 4...5. На этой стадии непрерывно удаляется УФ пермеат, представляющий раствор солей и лактозы. Селективные свойства УФ мембран позволяют эффективно задерживать белок и жиры. УФ ретентат непрерывно поступает в блок ДФ очистки от лактозы. Здесь происходит непрерывное разбавление ретентата

НФ пермеатом. Этот раствор получают за счет непрерывной нанофильтрации объединенного УФ пермеата блоков УФ и ДФ. Свободный от лактозы или с желаемой концентрацией этого углевода ДФ ретентат удаляется как готовый продукт на дальнейшую переработку.

Блок НФ обеспечивает НФ концентрирования УФ пермеата за счет применения мембран, позволяющих эффективно задерживать лактозу и пропускать соли. Образующийся НФ ретентат выводится как побочный продукт. Сухие вещества в этом растворе в основном представлены лактозой (концентрацией до 23%). Таким образом он может быть использован для производства лактозы или как питательная среда в биотехнологии для получения спирта или других продуктов.

НФ пермеат, содержащий в основном водный раствор солей, играет роль буферного раствора на стадии ДФ УФ ретентата. Солевой состав его идентичен молоку и пахте. Но пермеат не содержит лактозы и соответственно является хорошим растворителем лактозного раствора на стадии диафильтрации. За счет высокого содержания воды в НФ пермеате концентрация лактозы в УФ ретентате будет постепенно и непрерывно понижаться до желаемого значения. ДФ пермеат, содержащий лактозу и соли вместе с УФ пермеатом подается на нанофильтрацию и весь процесс повторяется снова до

тех пор, пока не будет достигнута необходимая концентрация лактозы в продукте.

Для того, чтобы обеспечить непрерывность обработки пахты по такой схеме требуется, чтобы соблюдались определенные соотношения между потоками продуктов пахты, полученными на соответствующих стадиях (блоках). Эти соотношения в основном диктуются требованиями материального баланса объединённой мембранной установки. Очевидно, что установка обеспечит непрерывность процесса, если будут соблюдены следующие условия по расходу потоков для стационарных условий:

$$Q_{УФР} = Q_{ДФР}, \quad (5)$$

где $Q_{УФР}$, $Q_{ДФР}$ – соответственно расход УФР поступающего на ДФ блок и выходящего из него, $дм^3/ч$;

$$Q_{НФП} = Q_{УФП+ДФП}, \quad (6)$$

где $Q_{НФП}$, $Q_{УФП+ДФП}$ – расходы нанофильтрационного и объединенного (УФ+ДФ) УФ пермеатов, $дм^3/ч$;

$$Q_{НФР} = Q_{Н_2O} \quad (7)$$

где $Q_{НФР}$, $Q_{Н_2O}$ – расходы НФ пермеата и воды, добавленной для обеспечения баланса расхода потоков, $дм^3/ч$;

$$Q_{НФП} = ДО \cdot Q_{УФР} \quad (8)$$

где $Q_{НФП}$, $Q_{УФР}$ – соответствующие расходы потоков НФ пермеата и УФ ретентата, поступающего на диафильтрацию, $дм^3/ч$;

ДО – диафильтрационный объем буферного НФ пермеата, обеспечивающий высокую степень удаления лактозы из УФ ретентата, $ДО=3...7$.

За счет непрерывного разбавления соевым раствором нанофильтрационного пермеата, ценные минеральные вещества молока реинтегрируются в УФ ретентат, что обеспечивает сохранность солевого состава. Добавление чистой воды на стадии нанофильтрации, конечно, снизит общую концентрацию минеральных веществ в УФ ретентате, хотя и незначительно. Этого недостатка можно избежать дополнительным введением эквивалентного источника этих солей, например, УФ пермеата сывортки.

Для нормальной работы установки и обеспечения стационарного режима требуется контроль и управление некоторыми параметрами, характеризующими потоки. В частности, крайне важно контролировать концентрацию сухих веществ в следующих потоках:

- УФ пермеате и ретентате;
- НФ пермеате и ретентате.

Концентрация сухих веществ в потоках будет связана и с концентрацией лактозы. Эту взаимосвязь можно установить расчётным или экспериментальным путем.

Измерение концентрации сухих веществ и использование специальных клапанов обеспечит рециркуляцию основных потоков в отдельных мембранных блоках, если не будет достигнуто желаемое значение. Расходомеры, установленные на

соответствующих участках системы вместе с исполнительными механизмами и насосами должны обеспечить вышеуказанное соотношение потоков.

Таким образом, при нормальной работе установки можно получить концентрат пахты с желаемым содержанием лактозы и белка. Однако, при этом следует учитывать характеристики мембран и рабочие параметры мембранных процессов УФ, НФ, которые рекомендуются их производителем (t , p , pH).

На основании экспериментальных исследований установлено что мембраны ВПУ-15000 и ОПМН-П для реализации установки имеют вполне приемлемые характеристики по селективности и удельной производительности. Исходя из полученных данных можно заключить, что для получения 100 л концентрата пахты с более низкой, чем в исходном продукте и молоке концентрацией лактозы необходимо обеспечить, чтобы мембранные блоки имели следующую площадь фильтрования:

Блок УФ $S=20 \text{ м}^2$ при средней производительности по пермеату $G=10 \text{ л/м}^2 \times \text{ч}$.

Блок ДФ $S=70 \text{ м}^2$ при средней производительности по пермеату $G=10 \text{ л/м}^2 \times \text{ч}$.

Блок НФ $S=45 \text{ м}^2$ при средней производительности по пермеату $G=15 \text{ л/м}^2 \times \text{ч}$.

Особенное значение будет иметь диафильтрационный объем ДО. В таблице 3 указано при каком значении ДО будет достигнут определенный эффект удаления лактозы.

Выводы

На основании экспериментальных и теоретических исследований получены данные, позволяющие сделать вывод о возможности реализации на практике непрерывного мембранного удаления лактозы из пахты. Характеристики мембран ВПУ-15000 (селективность по лактозе $R=1\%$; по солям $R=0\%$, удельная производительность по фильтрату $G=10 \text{ л/м}^2 \times \text{ч}$) и ОПМН-П (селективность по лактозе $R=99,7\%$; по солям $R=0\%$, удельная производительность по фильтрату $G=15 \text{ л/м}^2 \times \text{ч}$) обеспечивают непрерывность процесса и хорошее качество конечного продукта. Для нормального функционирования установки необходим контроль и управление концентрации сухих веществ и расхода потоков УФ пермеата, УФ ретентата и НФ пермеата, НФ ретентата.

Потребная площадь мембранного фильтрования для каждого мембранного блока может быть определена на основании экспериментальных данных удельной производительности. Соотношение расхода потоков установки можно изменить в зависимости от требуемой концентрации лактозы в конечном продукте. Например, для конечной концентрации лактозы $C=0,01\%$ необходим диафильтрационный объем $ДО=7$ или соотношение расходов $Q_{НФП}/Q_{УФР}=7$. Это соотношение изменит и

другие потоки, и их соотношения, например, $Q_{\text{НФ}}/Q_{\text{H}_2\text{O}}$ и т.д.

Существенным недостатком, который является следствием загрязненности мембран в данной установке, является неучитывание режимов регенерации мембран и стерилизации мембранного оборудования. Это направление является перспективой для дальнейшей работы.

Список литературы

1. **Di Stefano, M.** Visceral hypersensitivity and intolerance symptoms in lactose malabsorption / **M. Di Stefano et al.** // *Neurogastroenterology and Motility: The Official Journal of the European Gastrointestinal Motility Society*. – 2007. – 19, v.11. – P. 887-895. – doi: 10.1111/j.1365-2982.2007.00973.x.
2. **Xiong, L.** Prevalence of lactose intolerance in patients with diarrhea-predominant irritable bowel syndrome: data from a tertiary center in southern China / **L. Xiong, et al.** // *Journal of Health, Population and Nutrition*. – 2017. – 36. – №. 1. – P. 38. – doi: 10.1186/s41043-017-0113-1.
3. **Вышемирский, Ф. А.** Пахта: минимум калорий-максимум биологической ценности / **Ф. А. Вышемирский, Н. Н. Ожгихина** // *Молочная промышленность*. – 2011. – №. 9. – С. 54-56.
4. **Cuartas-Uribe, B.** A study of the separation of lactose from whey ultrafiltration permeate using nanofiltration / **B. Cuartas-Uribe, et al.** // *Desalination*. – 2009. – 241. – №. 1-3. – P. 244-255. – doi:10.1016/j.desal.2007.11.086.
5. **Дейниченко, Г. В.** Ультрафільтраційні процеси та технології раціональної переробки білково-вуглеводної молочної сировини: монографія / **Г. В. Дейниченко, З. О. Мазняк, І. В. Золотухіна**. Х.: Факт. – 2008.
6. **Агеев, Е. П.** Мембранные процессы разделения / **Е. П. Агеев** // *Крит. технологии. Мембраны*. – 2001. – №. 9. – С. 42–56.
7. **Мазняк, З. О.** Дослідження процесу ультрафільтраційного концентрування скотин та його апаратурне оформлення: дис. кандидата техн. наук: 05.18.12 / **Мазняк Захар Олександрович**. – Х., 2003. – 660 с.
8. **Morin, P.** Microfiltration of buttermilk and washed cream buttermilk for concentration of milk fat globule membrane components / **P. Morin, et al.** // *Journal of dairy science*. – 2007. – 90. – №. 5. – P. 2132-2140. – doi:10.3168/jds.2006-832.
9. **Choi, S. H.** Development of lactose-hydrolyzed milk with low sweetness using nanofiltration / **S. H. Choi, S. Lee, H. Won** // *Asian Australasian Journal Of Animal Sciences*. – 2007. – 20. – №. 6. – P. 989-993. – doi: 10.5713/ajas.2007.989.
10. **Jelen, P.** Low lactose and lactose-free milk and dairy products-prospects, technologies and applications / **P. Jelen, O. Tossavainen** // *Australian Journal of Dairy Technology*. – 2003. – 58. – №. 2. – P. 161-165.
11. **Novalin, S.** A new innovative process to produce lactose-reduced skim milk / **S. Novalin, W. Neuhaus, K. D. Kulbe** // *Journal of Biotechnology*. – 2005. – 119. – №. 2. – P. 212-218. – doi:10.1016/j.jbiotec.2005.03.018.
12. **Храмцов, А. Г.** Исследования в области получения безлактозных молочных продуктов / **А. Г. Храмцов, И. А. Евдокимов, И. К. Куликова, В. Д. Ершова** // *Материалы Международной научно-практической*

конференции «Молочная индустрия-2009». – М.: АНО «Молочная промышленность», 2009.

13. **Евдокимов, И. А.** Получение продуктов с пониженным содержанием лактозы / **И. А. Евдокимов, И. К. Куликова, В. Д. Эршова** // *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*. – 2010. – №. 2. – С. 64-68.
14. **Крусь, Г. Н.** Методы исследования молока и молочных продуктов / **Г. Н. Крусь, А. М. Шалыгина, З. В. Волокитина**; ред. А.М. Шалыгиной. – М.: Колос, 2000. – 368 с.

Bibliography (transliterated)

1. **Di Stefano, M., et.al.** Visceral hypersensitivity and intolerance symptoms in lactose malabsorption. *Neurogastroenterology and Motility: The Official Journal of the European Gastrointestinal Motility Society*, 2007, **19**, v.11, 887-895, doi: 10.1111/j.1365-2982.2007.00973.x.
2. **Xiong, L., et al.** Prevalence of lactose intolerance in patients with diarrhea-predominant irritable bowel syndrome: data from a tertiary center in southern China. *Journal of Health, Population and Nutrition*, 2017, **36**, 1, 38, doi: 10.1186/s41043-017-0113-1.
3. **Vyshemirskiy, F. A., Ozhgikhina, N. N.** Pakhta: minimum kaloriy-maksimum biologicheskoy tsennosti. *Molochnaya promyshlennost*, 2011, **9**, 54-56.
4. **Cuartas-Uribe, B., Alcaina-Miranda, M. I., So-riano-Costa, E.** A study of the separation of lactose from whey ultrafiltration permeate using nanofiltration. *Desalination*, 2009, **241**, 244–255, doi:10.1016/j.desal.2007.11.086.
5. **Deynichenko, G. V., Maznyak, Z. O., Zolotukhina, I. V.** Ultrafiltratsiyni protsesi ta tekhnologii ratsionalnoi pererobki bilkovo-vuglevodnoi molochnoi sirovini. Kh.: Fakt, 2008, 208.
6. **Ageev, Ye. P.** Membrannyye protsessy razdele-niya. *Krit. tekhnologii. Membrany*, 2001, **9**, 42–56.
7. **Maznyak, Z. O.** Doslidzhuvannya protsesu ultrafiltratsiynogo kontsentruvannya skotyn ta yogo aparaturne oformlennya: dis. kandidata tekhn. nauk: 05.18.12. Kh., 2003, 660.
8. **Morin, P., et al.** Microfiltration of buttermilk and washed cream buttermilk for concentration of milk fat globule membrane components. *Journal of dairy science*, 2007, **90**, 5, 2132-2140, doi:10.3168/jds.2006-832.
9. **Choi, S. H., Lee, S.-B., Won, H.-R.** Development of Lactose-hydrolyzed Milk with Low Sweetness Using Nanofiltration. *Asian Australasian Journal Of Animal Sciences*, 2007, **20** (6), 989-993, doi: 10.5713/ajas.2007.989.
10. **Jelen, R., Tossavainen, O.** Low lactose and lactose-free milk and dairy products – prospects, technologies and applications. *Australian Journal of Dairy Technology*, 2003, **58**, 2, 161-165.
11. **Novalin, S., Neuhaus, W., Kulbe, K. D.** A new innovative process to produce lactose-reduced skim milk. *Journal of Biotechnology*, 2005, **119**, 2, 212-218, doi:10.1016/j.jbiotec.2005.03.018.
12. **Khramtsov, A. G., Yevdokimov, I. A., Kulikova, I. K., Yereshova, V. D.** Issledovaniya v oblasti polu-cheniya bezlaktoznykh molochnykh produktov. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Molochnaya industriya-2009»*. M.: ANO «Molochnaya promyshlennost», 2009.
13. **Yevdokimov, I. A., Kulikova, I. K., Ershova, V. D.** Poluchenie produktov s ponizhennym soderzhani-em

laktozy. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta*, 2010, 2, 64-68.

14. **Krus, G. N., Shalygina, A. M., Volokitina, Z. V.** Metody issledovaniya moloka i mo-lochnykh produktov. red. A.M. Shalyginoy.M.: Kolos, 2000, 368.

Сведения об авторах (About authors)

Трубникова Анастасия Анатольевна – аспирант кафедры технологии молочных, олейно-жировых продуктов и косметики. Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, г.Одесса, Украина, 65039; E-mail: : sc228004@ukr.net.

Anastasiya Trubnikova – postgraduate of department of technology of milk, fats and perfumes and cosmetic products, Odessa national Academy of food technologies, Kanatnaya, 112, Odessa, Ukraine, 65039; E-mail: sc228004@ukr.net.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Трубникова, А. А. Контроль и управление непрерывным процессом мембранного удаления лактозы из пахты / **А. А. Трубникова**// *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 177-183. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.26.

Please cite this article as:

Trubnikova, A. Control and management continuous membrane process removal lactose with buttermilk. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 16(1292), 177-183, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.26.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Трубнікова, А. А. Контроль і управління безперервним процесом мембранного видалення лактози із маслянки / **А. А. Трубнікова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 177-183. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.26.

АНОТАЦІЯ Мембранні процеси, такі як УФ, МФ, НФ, ЗО давно зарекомендували себе як ефективний засіб поліпшення властивостей різних молочних продуктів, в т.ч. вторинних (маслянки, сироватки, знежиреного молока). Маючи різні характеристики НФ і УФ мембрани можуть ефективно затримувати високомолекулярні речовини і пропускати низькомолекулярні. Крім того, НФ мембрани здатні розділити органічні речовини від неорганічних. Базуючись на цих властивостях мембран, їх експлуатаційних характеристиках і загальних залежностях мембранного поділу можна ефективно видаляти лактозу з концентратів маслянки при збереженні мінерального складу безперервно. Мембранний поділ має при цьому ряд переваг перед проведенням ферментативного видалення лактози, яке використовують на практиці. Безперервність мембранного видалення лактози може бути досягнута певною комбінацією УФ, ДФ і НФ обробки. Метою даних досліджень є вивчення можливості організації безперервного мембранного видалення лактози із маслянки і розробка відповідної схеми установки. В ході експериментів визначили, що УФ мембрани ВПУ-15000 за своїми характеристиками підходять для УФ і ДФ. Їх селективність по лактозі $R = 1\%$. НФ мембрани марки ОПМН мають високу ($R = 99,7\%$) селективність по лактози і низьку по мінеральних речовин. Це дозволяє використовувати їх для отримання пермеата, який застосовується як буферний розчин. Розроблено схему автоматичного управління і контролю мембранною установкою, що складається з трьох блоків: УФ концентрування, ДФ, і НФ. Установка забезпечує безперервну обробку маслянки з метою отримання високобілкових-ліпідного концентрату що не містить лактози. Слабкою ланкою мембранної установки є необхідність регенерації мембран. В цьому напрямку потрібні додаткові дослідження.

Ключові слова: мембрани, мембранні технології; безлактозні продукти; діалізаційне очищення; ультрафільтрація маслянки; автоматизація мембранних процесів.

Поступила (received) 28.04.2018

УДК 338.27/ 637.51

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.27

ВИКОРИСТАННЯ ЦІЛЬОВОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ У ТЕХНОЛОГІЇ М'ЯСОМІСТКИХ ПРОДУКТІВ ПОДОВЖЕНОГО ТЕРМІНУ ЗБЕРІГАННЯ

Д. А. ШВЕДЮК^{1*}, В. М. ПАСІЧНИЙ²

¹ аспірант Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного Університету Харчових Технологій, Київ, УКРАЇНА

² професор кафедри технології м'яса та м'ясопродуктів Національного Університету Харчових Технологій, Київ, УКРАЇНА
*email: shvedyuk.d@ukr.net

АНОТАЦІЯ Виробництво м'ясомістких продуктів дозволяє зменшити собівартість продукції та розширити асортимент даного виду продуктів. Проте, використання у рецептурі рослинних складових може негативно вплинути на процеси автолізу та термін зберігання продукту через високий вміст моносахаридів у даному виді сировини. З огляду на це, перспективним напрямком досліджень є удосконалення технології м'ясомістких продуктів із подовженням терміну зберігання. Одним із шляхів досягнення цих цілей є застосування цільової ферментації, що дозволить з одного боку полімеризувати вуглеводи зменшивши кількість моносахаридів, а з іншого – підвищити органолептичні характеристики та біологічну цінність продукту.

Ключові слова: м'ясомісткі продукти; селективна ферментація; протеїнази; колагеназа; термін зберігання.

APPLICATION OF THE TARGET FERMENTATION IN THE TECHNOLOGY OF EXTENDED SHELF-LIFE MEAT-BASED PRODUCTS

D. SHVEDYUK^{1*}, V. PASICHNYI²

¹ postgraduate of Problematic scientific-research laboratory of NUFT, Kyiv, UKRAINE

² full professor of Department of meat and meat products technology of NUFT, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT In modern conditions, the expansion of the range of raw materials that can be used in the process of producing meat products is relevant. This is due both to the fluctuations in the state of the raw materials market (and its prices) on the scale of Ukraine, and the need to provide biologically-complete products of the growing population on a world scale. To perform these tasks one of the actively studied and used methods is the application of target fermentation. This technological approach has several advantages over other common methods of increasing biological value (the introduction of various fillers based on animal and plant proteins in the form of isolates, extrudates and emulsions).

The advantages of using fermentation in the technology of meat-based products include - the lower consumption of additional raw materials (namely the enzyme) per unit weight of the finished product (which in most cases leads to lower cost), the complete or predominant absence of the enzyme in the finished product (due to thermal inactivation), simplification of the additional raw materials preparation process, a wide range of basic raw materials, with which it is possible to combine enzyme. Application of targeted fermentation can influence peptide bonds in the proteins of the main raw material, increasing the amount of free amino acids and increasing the biological value of the product. This technique requires further research and has some unresolved (in whole or in part) issues. These include, in particular, the regimes for the introduction and processing of raw enzymes with separate or simultaneous proteolysis of meat and vegetable raw materials, the composition of the mixture of gases in the development of a modified atmosphere for packaging of this type of product, the optimal composition of enzyme compositions, which could manifest synergistic effects when introduced in meat and vegetable systems, methods for improving organoleptic characteristics at minimum costs and minimizing the introduction of synthetic aromatic ingredients, specification of raw materials assortment for meat-based products followed by selection of the best recipes that have the potential maximum biological value. From the considered literature it can be concluded that these questions are actively solved by leading scientists and have the theoretical foundations for further solution, therefore the chosen direction of research (improvement of the technology of meat products of extended storage with the use of targeted fermentation) is perspective both on a scale domestic industry, and in general.

Keywords: meat-based products; selective fermentation; proteinases; collagenase; shelf life.

Вступ

У сучасних умовах розширення асортименту сировини, що може бути використана у процесі виробництва м'ясопродуктів є актуальним. Це обумовлено як і коливаннями стану ринку сировини (та цін на ньому) у масштабі України, так і потребою забезпечувати біологічно-повноцінними продуктами

зростаюче населення у масштабі світу. Для виконання цих завдань одним із активно досліджуваних та вживаних методів є застосування цільової ферментації. Даний технологічний підхід має ряд переваг у порівнянні з іншими поширеними методами підвищення біологічної цінності (введення різних наповнювачів на основі тваринних та рослинних білків у вигляді ізолятів, екструдатів та емульсій).

До переваг застосування ферментації у технології м'ясомістких продуктів належать – менша витрата додаткової сировини (а саме ферменту) на одиницю маси готового продукту (що в більшості випадків веде до меншої собівартості), повна або переважна відсутність ферменту у готовому продукті (за рахунок термічної інактивації), спрощення процесу підготовки додаткової сировини, широкий спектр основної сировини, з якою можна поєднувати ферменти [1, 2]. Застосування цільової ферментації дозволяє впливати на пептидні зв'язки у білках основної сировини, збільшуючи кількість вільних амінокислот та підвищуючи біологічну цінність продукту.

Усі ферменти, які застосовують у м'ясопереробній промисловості можна класифікувати за походженням на ферменти відповідно мікробіологічного, рослинного та тваринного походження [2, 3]. Окремо варто виділити групу синтетичних ферментів. Назви та короткі характеристики основних ферментів, що використовуються у технології м'ясопродуктів приведена у табл.1. Окремо варто виділити ферменти синтетичного походження, які можуть виступати аналогами кожного з наведених видів ферментів, а також амілолітичні ферменти, пектинази і целулази для рослинних компонентів комбінованих м'ясо-рослинних систем. Ефективним також є використання природних ферментомістких систем з забезпеченням направленою автолізу фаршів і ковбас [4, 5].

Дотепер в м'ясній промисловості використовуються переважно протеази. Білкові зшиваючі ферменти (трансглютаміназа) вже протягом декількох десятиліть використовуються в якості модифікаторів текстури готових виробів. Структурна інженерія за допомогою окислювальних ферментів і моделювання аромату виробів ліпазами, глутаміназою, протеазами і пептидазами є прикладами нових ферментних технологій в харчовій промисловості. Однією з потенційних областей в м'ясній промисловості є дезінфекція м'яса з використанням ферментів, таких як папаїн і бромелайн, отриманих з рослинних джерел, таких як папайя і ананас. Твердість м'яса зазвичай обумовлена наявністю колагену, еластину та актоміозинового комплексу.

Органолептичні характеристики загалом та смак м'яса зокрема залежать від пептидів і амінокислот, присутніх в сировині [6, 7]. Ферменти, такі як протеази, використовуються для тендеризації та маринування сировини. Протеази можуть застосовуватися для виробництва білкових гідролізатів з різних побічних продуктів м'ясопереробної галузі, таких як кістки, сухожилля та шлям [8].

Протеази використовуються для поліпшення ніжності, головним чином при обробці низькосортних видів сировини та сировини від некондиційних тварин. В'язкість м'яса визначається двома важливими

факторами: вміст сполучної тканини (структурні білки які створюють каркас м'язів) і rigor mortis (посмертне скорочення м'язів) [9]. Структура та / або кількість колагену і еластину в сполучній тканині мають вирішальний вплив на консистенцію та жорсткість м'яса. Ендогенний фермент (кальпаїн) може розкласти міофібрилярні білки та комплекси, що утворюються в процесі посмертного задубіння, поліпшуючи характеристики м'яса; проте існує ще один ендогенний фермент (кальпастин), який інактивує кальпаїн [10].

Таблиця 1 – Основні ферменти, застосовувані у м'ясній промисловості

Походження	Назва	Джерело	Субстрат
Рослинні	Папаїн	Папайя	Актиміозин або колаген
	Бромелін	Ананас	
	Фіцін	інжир	
	Актинідин	ківі	
	Кукумін	Плід каччі	
	Зінгібаїн	Імбир	
Мікробіологічного походження	Коллагеназа	Clostridium histolyticum	Еластин та актімозин
	Грибкова протеаза	Aspergillus oryzae	
	Термофільний E-фермент	Bacillus E A.1	
	Протеази A-1 та 4-1.A	Thermus Rt4-1.A	
	Калдолізін	Thermus T-35	
	Еластаза	Bacillus sp. EL31410	
Тваринні	Панкреатин	Свинина	Міофібрилярні білки

Мета роботи

Метою роботи було розглянути особливості, перспективи та актуальність удосконалення технології м'ясомістких продуктів подовженого терміну зберігання із застосуванням цільової ферментації, проаналізувавши публікації провідних науковців за обраною тематикою та зробити висновок щодо перспективності комбінування різних видів ферментів у технології м'ясомістких продуктів, розглянути доступні на ринку види ферментів та технології їх застосування, виявити недоліки технологічного процесу виробництва м'ясомістких продуктів та перспективи їх усунення.

Виклад основного матеріалу

Більшість ферментів, що застосовуються у процесі обробки м'ясної сировини, належать до класу протеаз. Протеази, або протеолітичні ферменти,

розщеплюють білки до амінокислот. Окладні білкові речовини в рослині піддаються розкладу на більш прості сполуки.

У солоді з насіння знаходять ті ж самі продукти розщеплення білкових речовин, які утворюються в кишечнику тварин при розщепленні білків ферментом трипсином. У комахоїдних рослин знайдений фермент протеаза, що складається з трипсину і пепсину; у комахоїдної рослини росички протеаза виділяється назовні волосками, якими вкриті листки.

Більш поширена в рослинах внутрішньоклітинна протеаза — папаїн, або папаїназа, яка знайдена спочатку в плодах динного дерева *Carica papaya* і яка розщеплює білки до амінокислот в слабкокиєлому або нейтральному середовищі. Тепер відомо, що папаїназа разом з іншими внутрішньо клітинними ферментами широко розповсюджена в пророщеному зерні та в інших органах рослини.

Таким чином, сьогодні у технології м'ясопродуктів ферменти та сировина, що виробляється за їх безпосередньої участі, мають декілька основних напрямків використання. Перший напрямок застосування ферментної сировини — покращення органолептичних характеристик та полегшення технологічної обробки сировини з великим вмістом сполучної тканини [3, 7, 8]. Для даного виду технологічних операцій використовують традиційно папаїн, бромелін та (рідше) колагеназу. Відносно технології м'ясомістких продуктів застосування бромеліну є особливо примітним тим, що за даними ряду досліджень [6, 11], цей фермент може впливати на пептидні зв'язки у білках рослинного та тваринного походження з майже рівноцінною ефективністю. Тому, використання папаїну, його синтетичних аналогів та хімічно-подібних ферментів є перспективним та може дозволити сумістити у часі та просторі обробку рослинної та м'ясної сировини. Загалом вплив на консистенцію, жорсткість та ніжність основної сировини є найбільш традиційним використанням протеаз у м'ясній промисловості [12, 13]. Дослідження вчених з Ірану [14] також доводять перспективність суміщення дії протеолітичних факторів із каталізуючими факторами фізичної природи (зокрема з ультразвуком) для поглиблення протеолітичної дії ферменту.

Другий напрямок — безпосередньо підвищення біологічної цінності та кількості вільних амінокислот у продукті. Ферментація протягом останніх років активно використовується для підвищення біологічної цінності та ефективної переробки супутніх продуктів та відходів м'ясопереробної галузі для подальшого використання у виробництві як м'ясопродуктів, так і кормів для тварин. Даний напрямок досліджень є перспективним та має ряд невирішених проблем. Зокрема, дуже невелика кількість публікацій присвячена питанню поєднання ферментації м'ясної та рослинної сировини разом або виробництву

продуктів комбінованого складу де як м'ясна, так і рослинна сировина були б оброблені із застосуванням ферментів. Тому, ряд питань щодо удосконалення та поглибленого вивчення даної технології потребує подальшого дослідження. Серед потенційних питань можна виділити наступні: суміщення або розділення процесів ферментації м'ясної та рослинної сировини у часі, кількісне комбінування суміші ферментів і складових субстрату, розділення процесів інактивації ферментів у кожному виді сировини та їх режими (перспективним є застосування селективної інактивації при низьких температурах), термічний стан внесення рослинної сировини під час складання фаршів і ферментації.

Виходячи з даних напрямків використання (який потенційно може доповнитись у ході досліджень), є ряд потенційно невирішених питань щодо удосконалення технології м'ясомістких продуктів із застосуванням цільової ферментації.

Ще одним традиційним напрямком у застосуванні ферментації є виробництво покращувачів смаку та смакових добавок на основі гідролізатів рослинного білка, які традиційно у англійській літературі позначають як HVP. Продукти гідролізованого рослинного білка (HVP) представляють собою харчові продукти, отримані шляхом протеолізу білків, і використовуються в якості інгредієнтів, що надають продуктам смак бульйону (або м'яса).

Що стосується виробничого процесу, то можна провести відмінність між кислотно-гідролізованим рослинним білком (aHVP), ферментованим HVP і іншими приправами, наприклад ферментованим соєвим соусом. Гідролізовані рослинні білкові продукти особливо широко використовуються для поліпшення смаку продуктів кулінарії, соусів, м'ясних продуктів, снєків та інших страв, стабілізації їх буферної ємкості [5, 13, 20]. Кисотно-гідролізований рослинний білок (aHVP) є альтернативою до застосування ферментів, проте є дорожчим у процесі виробництва та має більший вплив на органолептику та рН продукту при застосуванні у технології м'ясопродуктів. Для процесу виробництва HVP ферменти (традиційно папаїн та грибові протеази) використовуються для руйнування пептидних зв'язків у білках. Щоб розкласти білок на амінокислоти, до суміші знежиреного білка і води додають вказані вище протеази. Оскільки під час виробничого процесу не утворюється сіль, додавання солі в якості інгредієнта є звичайною практикою для відповідності критеріям органолептичної оцінки та тривалості зберігання продукту. Головним в подальшому процесі є регулювання рН середовища в межах, які є оптимальними для дії ферментної системи. Залежно від активності ферментів, для руйнування білків потрібно до 12-24 години. Суміш нагрівають для інактивації ферментів (до 55-65 °C) і потім фільтрують для видалення нерозчинної гумінової кислоти [13]. Відносно технології м'ясомістких

продуктів, даний технологічний підхід може бути корисним для тих випадків, коли потрібно проводити роздільну обробку рослинної та м'ясної сировини.

Відносно новим напрямком є застосування ферментних препаратів мікробіологічного походження (або мікробіологічних препаратів, що містять штами мікроорганізмів, які починають продукування ферменту вже після внесення у м'ясну систему) із метою дезінфекції та подовження терміну зберігання м'яса та м'ясопродуктів. Прикладом цього є розробка колективу компанії EcoLab Inc [13] – антимікробна композиція для подовження термінів зберігання харчових (зокрема м'ясних) продуктів. Рецепт антимікробної композиції є варіативною та включає в себе ПНЖК, антимікробний препарат (на основі обраних штамів бактерій або препаратів перкарбонової кислоти) та ферментну основу (папаїн або бромелін). В одному з варіантів реалізації антимікробна композиція може бути нанесена на м'ясо, птицю або рибний продукт, зокрема, шляхом замочування або занурення даної сировини або продукту в композиційний субстрат. Харчовий продукт дозволяється вносити в протимікробну композицію від 45 секунд до 20 хвилин, залежно від бажаного результату та виду сировини. З точки зору технології м'ясомістких продуктів, можливим є потенційне застосування аналогічних композицій як безпосередньо вказаним методом, так і у вигляді біодеградуєчої плівки для вирішення однієї з основних проблем даного виду продукції – мікробіологічної стабільності та подовження терміну зберігання.

Обговорення результатів

Таким чином, очевидним є те, що м'ясопереробна галузь має ряд не вирішених питань щодо впровадження і вдосконалення ресурсозберігаючих технологій [14]. Побічні продукти забою та первинної переробки сільськогосподарських тварин можуть бути не тільки джерелом кормової, ендокринної та технічної сировини, але й застосовуватись безпосередньо на харчові цілі. З іншого ж боку, джерела сировини рослинного походження мають значно коротший цикл відновлення, менші затрати праці відносно 1 т виробленої сировини та ширшу зонність походження. Проте використання рослинних компонентів в складі м'ясних і м'ясомістких продуктів має ряд технологічних і нормативних обмежень.

Відповідно до особливостей хімічного складу і текстури рослинної сировини існує обмеженість її використання в наслідок суттєвого впливу на органолептичні показники, зниження мікробіологічної стабільності продукту внаслідок великої кількості вуглеводів, нижча збалансованість білкового складу і рівень доступності білків системі травлення, складність операцій підготовки рослинної сировини, можливість її модифікації [17, 18, 20].

Більшу частину цих проблем можна повністю або частково вирішити шляхом застосування цільової ферментації, проте, необхідною і раціональною передумовою є застосування і інших методів у поєднанні з даним технологічним підходом.

Процес протеолізу рослинних білків формує продукт з модифікованими характеристиками. Оскільки велика кількість білків під дією ферментації впливають на смак і аромат, завдяки накопиченню в процесі ферментації низькомолекулярних речовин з вираженим сенсорним впливом на органи чуття [19]. Варто також згадати, що аналогічні процеси протеолізу застосовують у вищезгаданій технології НVP для надання бульйонного смаку гідролізату, тому є всі підстави вважати можливим моделювання смакових властивостей рослинної сировини шляхом ферментації. У разі недостатності цього методу впливу, сучасний ринок пропонує велику кількість інгредієнтів для покращення текстури та смаку продукції.

Проблема мікробіологічної стабільності продукту) може бути вирішена як і шляхом ферментації (антимікробний потенціал деяких протеаз згадано вище), так і застосуванням інноваційних методів пакування та можливого комбінування цих методів із нанесенням їстівних плівок антимікробної дії безпосередньо на поверхню продукту. З цієї точки зору додаткового дослідження потребують методи створення модифікованої атмосфери для зберігання продуктів [21]. Очевидним є те, що склад цієї атмосфери може відрізнитись і від складу модифікованої атмосфери для рослинних продуктів і від аналогічного складу для м'ясних продуктів.

Тому, це питання потребує подальших досліджень. Також, варто зазначити, що зменшення кількості моносахаридів (які служать поживним середовищем для мікрофлори та можуть впливати на автолітичні процеси), можливе шляхом ферментативної обробки, що призведе до полімеризації цих речовин до полісахаридів. Цей метод потребує подальший досліджень, проте перспективним є застосування ферментів, які використовуються у виноробстві [3, 6].

Вирішення питань щодо підвищення біологічної цінності м'ясомістких продуктів, може бути вирішена використанням комбінації з декількох протеаз, які діють на різні групи білків і власне балансуванням амінокислотного складу продуктів при моделюванні і розробленні нових рецептурних композицій [22]. Дані дослідження потребують системного підходу при врахуванні рецептурних співвідношень і активності ферментів, власне хімічного складу системи, режимів попередньої теплової (хімічної) обробки (модифікації) сировини.

Також перспективним напрямком є комбінування колагенази або папаїну з більшістю відомих протеаз синтетичного або мікробіологічного походження з урахуванням наявності в системі сполучнотканинних білків [3, 9].

Висновки

З наведених вище даних, зібраних методом аналізу та синтезу у процесі літературного пошуку серед публікацій провідних науковців у обраній тематиці, можна зробити висновок про перспективність досліджень в напрямку удосконалення технології м'ясомістких продуктів, зокрема з подовженим терміном зберігання із застосуванням цільової ферментації. На користь цього свідчить широкий спектр досліджень щодо використання ферментів в галузях харчової промисловості для сировини різної за походженням і технологічним призначенням. Тому подальші дослідження для вибраного нами напрямку є актуальними.

Для використання в складі м'ясомістких продуктів потребують наукового обґрунтування режими внесення та обробки ферментами сировини при селективному або одночасному протеолізі м'ясної та рослинної сировини, склад суміші газів при розробці модифікованої атмосфери для пакування даного виду продукції, раціональний склад і активність ферментних композицій, який міг би проявити ефекти синергізму щодо технологічних складових в процесі виробництва продуктів на м'ясній основі, а також його зберігання з використанням сучасних систем пакування.

З узагальненого аналізу літературних джерел можна зробити висновки про те, що дані питання активно вирішуються провідними науковцями та мають сформоване теоретичне підґрунтя для подальшого вирішення, тому обраний напрямок досліджень (удосконалення технології м'ясомістких продуктів подовженого терміну зберігання із застосуванням цільової ферментації) є перспективним.

Список літератури

1. **Manea, Iuliana.** Study Concerning The Proteolytic Activity Of Vegetable Enzymes On Cured Meat Quality / **Iuliana Manea, Laur Manea, Valeri Marinescu** // *Annals. Food Science and Technology.* – 2016. – P. 421-425.
2. **Cazarin, C.** Enzymes in meat processing. Enzymes in food and beverage processing / **C. Cazarin, et al.** // *CRC, Boca Raton.* – 2015. – P. 337-351. – doi:10.1080/10408398.2012.701253.
3. **Chaudhary, Sorabh.** The Use of Enzymes in Food Processing: A Review / **Sorabh Chaudhary, et al.** // *South Asian Journal of Food Technology and Environment.* – 2015. – 1.4. – P. 2394-5168. – doi:10.1007/978-3-319-13521-2.
4. **Pasichny, V.** Characteristics of the main raw meat and offal for manufacture sausage of boiled group / **V. Pasichny** // *Meat Case.* – 2008. – 39 – 41.
5. **Oschipok, I.** Study use of food additives in the manufacture of sausages with directed autolysis / **I. Oschipok** // *Scientific Messenger of Lviv National*

- University of Veterinary Medicine and Biotechnologies named after S.Z. Gzhyskyj.* – 2009. – P. 274-279.
6. **Smittle, R. B., John, B. P., Sunvold, G. D.** Improved meat slurry methods of production and compositions. U.S. Patent Application No 14/777,394, 2016.
 7. **Banerjee, R.** Antioxidant Dietary Fiber: An Approach to Develop Healthy and Stable Meat Products / **Rituparna Banerjee, Arun K.Verma, Mohammed Wasim Siddiqui** // *In: Natural Antioxidants. Apple Academic Press.* – 2017. – p. 319-362.
 8. **Zhang, X., Saigh, M. M.** Enzyme fortified foods; add-ons, suspended and coated processes. U.S. Patent Application No 14/989,238, 2017.
 9. **Sonklin, Chanikan.** Volatile flavour compounds, sensory characteristics and antioxidant activities of mungbean meal protein hydrolysed by bromelain / **Chanikan Sonklin, et al.** // *Journal of Food Science and Technology.* – 2018. – 55.1. – P. 265-277. – doi:10.1016/j.foodres.2013.11.018.
 10. **Vaclavik, Vickie A.** Meat, poultry, fish, and dry beans / **Vickie A. Vaclavik, Elizabeth W. Christian** // *In: Essentials of Food Science. Springer, New York, NY.* – 2014. – p. 133-172. – doi:10.1016/S0002-8223(02)90140-9.
 11. **Makino, Y., Nishimoto, Y.** Enzyme Preparation for Modifying Food Material. U.S. Patent Application No 14/400,701, 2015.
 12. **Ray, Lalitagauri.** Enzymes-An Existing and Promising Tool of Food Processing Industry / **Lalitagauri Ray, Sunita Pramanik, Debabrata Bera** // *Recent patents on biotechnology.* – 2016. – 10.1. – P. 58-71.
 13. **Roşca, Adrian.** Tenderizing machines for traditional meat products processing / **Adrian Roşca, Daniela Roşca, Aurel Dorin Simion** // *Progress of Cryogenics and Isotopes Separation.* – 2014. – 17.1. – P. 97.
 14. **Barekat, Sorour.** Improvement of meat tenderness by simultaneous application of high-intensity ultrasonic radiation and papain treatment / **Sorour Barekat, Nafiseh Soltanizadeh** // *Innovative food science & emerging technologies.* – 2017. – 39. – P. 223-229. – doi:10.1016/j.ifset.2016.12.009.
 15. **Gutzmann, Timothy Allen, et al.** Antimicrobial compositions for use on food products. U.S. Patent No 8, 916, 510, 2014.
 16. **Toldrá, Fidel.** New insights into meat by-product utilization / **Fidel Toldrá, Leticia Mora, Milagro Reig** // *Meat science.* – 2016. – 120. – P. 54-59. – doi:10.1016/j.meatsci.2016.04.021.
 17. **Campos, Débora A.** Platform design for extraction and isolation of Bromelain: Complex formation and precipitation with carrageenan / **Débora A. Campos, et al.** // *Process Biochemistry.* – 2017. – 54. – P. 156-161. – doi:10.1016/j.procbio.2016.12.014.
 18. **Adam, Georgius Abidal.** Meat tendering using food grade natural products for reducing muscle contraction. U.S. Patent Application No 14/829, 539, 2017.
 19. **Żochowska-Kujawska, J.** Effects of natural plant tenderizers on proteolysis and texture of dry sausages produced with wild boar meat addition / **J. Żochowska-Kujawska, et al.** // *African Journal of Biotechnology.* – 2013. – 12. – P. 38. – doi: 10.5897/AJB2013.12830.
 20. **Ivanov, S. V.** Vplyv nanokompozytu na funktsionalni pokaznyky bilkovykh preparativ tvarynnoho pokhodzhennia / **S. V. Ivanov, V. M. Pasichnyi, I. M. Strarashynskyi, O. P. Fursik** // *Naukovyi visnyk*

- Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterinarnoi medytsyny ta biotekhnolohii imeni S. Z. Gzhytskoho.* – 2014. – 57-61.
21. **Pasichnyi, V. M.** Use of modified atmosphere and vacuuming for packing and storage of cooled meat and its semi-products / **V. M. Pasichnyi** // *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies named after S.Z. Gzhytskyj.* – 2018. – 68-72. – doi:10.15421/nvlvet6813.
22. **Shvedyuk, D.** Amino acid composition and biological value of meat semi-finished products with use of plant raw material and protein-fatty emulsions / **D. Shvedyuk** // *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies named after S.Z. Gzhytskyj.* – 2017. – P. 111-114. – doi:10.15421/nvlvet8023.
10. **Vaclavik, Vickie A., Christian, Elizabeth W.** Meat, poultry, fish, and dry beans. In: *Essentials of Food Science.* Springer, New York, NY, 2014, 133-172, doi:10.1016/S0002-8223(02)90140-9.
11. **Makino, Y., Nishimoto, Y.** Enzyme Preparation for Modifying Food Material. U.S. Patent Application No 14/400, 701, 2015.
12. **Ray, L., Pramanik, S., Bera, D.** Enzymes-An Existing and Promising Tool of Food Processing Industry. *Recent patents on biotechnology*, 2016, **10.1**, 58-71.
13. **Roşca, A., Roşca, D., Simion, A. D.** Tenderizing machines for traditional meat products processing. *Progress of Cryogenics and Isotopes Separation*, 2014, **17.1**, 97.
14. **Barekat, S., Soltanizadeh, N.** Improvement of meat tenderness by simultaneous application of high-intensity ultrasonic radiation and papain treatment. *Innovative food science & emerging technologies*, 2017, **39**, 223-229, doi:10.1016/j.ifset.2016.12.009.
15. **Gutzmann, Timothy Allen, et al.** Antimicrobial compositions for use on food products. U.S. Patent No 8, 916, 510, 2014.
16. **Toldrá, Fidel, Mora, Leticia, Reig, Milagro.** New insights into meat by-product utilization. *Meat science*, 2016, **120**, 54-59, doi:10.1016/j.meatsci.2016.04.021.
17. **Campos, Débora A., et al.** Platform design for extraction and isolation of Bromelain: Complex formation and precipitation with carrageenan. *Process Biochemistry*, 2017, **54**, 156-161, doi:10.1016/j.procbio.2016.12.014.
18. **Adam, Georgius Abidal.** Meat tendering using food grade natural products for reducing muscle contraction. U.S. Patent Application No 14/829, 539, 2017, doi: 10.5897/AJB2013.12830.
19. **Żochowska-Kujawska, J., et al.** Effects of natural plant tenderizers on proteolysis and texture of dry sausages produced with wild boar meat addition. *African Journal of Biotechnology*, 2013, **12**, 38, doi: 10.5897/AJB2013.12830.
20. **Ivanov, S. V., Pasichnyi, V. M., Strarashynskyi, I. M., Fursik, O. P.** Vplyv nanokompozytu na funktsionalni pokaznyky bilkovykh preparativ tvarynnoho pokhodzhennia. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterinarnoi medytsyny ta biotekhnolohii imeni S. Z. Gzhytskoho*, 2014, 57-61.
21. **Pasichnyi, V. M.** Use of modified atmosphere and vacuuming for packing and storage of cooled meat and its semi-products. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies named after S.Z. Gzhytskyj*, 2018, 68-72, doi:10.15421/nvlvet6813.
22. **Shvedyuk, D.** Amino acid composition and biological value of meat semi-finished products with use of plant raw material and protein-fatty emulsions. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies named after S.Z. Gzhytskyj*, 2017, 111-114, doi:10.15421/nvlvet8023.

Bibliography (transliterated)

1. **Manea, I., Manea, L., Marinescu, V.** Study Concerning The Proteolytic Activity Of Vegetable Enzymes On Cured Meat Quality. *Annals. Food Science and Technology*, 2016, 421-425.
2. **Cazarin, C., et al.** Enzymes in meat processing. Enzymes in food and beverage processing. *CRC, Boca Raton*, 2015, 337-351, doi:10.1080/10408398.2012.701253.
3. **Chaudhary, Sorabh, et al.** The Use of Enzymes in Food Processing: A Review. *South Asian Journal of Food Technology and Environment*, 2015, 1.4: 2394-5168, doi:10.1007/978-3-319-13521-2.
4. **Pasichny, V.** Characteristics of the main raw meat and offal for manufacture sausage of boiled group. *Meat Case*, 2008, 39 – 41.
5. **Oschipok, I.** Study use of food additives in the manufacture of sausages with directed autolysis. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies named after S.Z. Gzhytskyj*, 2009, 274-279.
6. **Smittle, R. B., John, B. P., Sunvold, G. D.** Improved meat slurry methods of production and compositions. U.S. Patent Application No 14/777, 394, 2016.
7. **Banerjee, R., Verma, A. K., Siddiqui, M. W.** Antioxidant Dietary Fiber: An Approach to Develop Healthy and Stable Meat Products. In: *Natural Antioxidants.* Apple Academic Press, 2017, 319-362.
8. **Zhang, X., Saigh, M. M.** Enzyme fortified foods; add-ons, suspended and coated processes. U.S. Patent Application No 14/989, 238, 2017.
9. **Sonklin, C., et al.** Volatile flavour compounds, sensory characteristics and antioxidant activities of mungbean meal protein hydrolysed by bromelain. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, **55.1**, 265-277, doi:10.1016/j.foodres.2013.11.018.

Відомості про авторів (About authors)

Шведюк Дмитро Анатолійович – аспірант, Проблемна науково-дослідна лабораторія, Національний Університет Харчових технологій, м. Київ; e-mail: shvedyuk.d@ukr.net.

Dmytro Shvedyuk – postgraduate, National University of Food Technologies, Problematic scientific-research laboratory, Kyiv, Ukraine; e-mail: shvedyuk.d@ukr.net; ORCID: orcid.org/0000-0002-9591-9364.

Пасічний Василь Миколайович – доктор технічних наук, професор, Національний Університет Харчових технологій, професор кафедри Технології м'яса та м'ясних продуктів; м. Київ, Україна; e-mail: pasww1@ukr.net.

Vasyl Pasichnyi – Doctor of Science, Professor, National University of Food Technologies, professor of Department of meat and meat products, Kyiv, Ukraine; e-mail: pasww1@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3219-1564>.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Шведюк, Д. А. Використання цільової ферментації у технології м'ясомістких продуктів подовженого терміну зберігання / **Д. А. Шведюк, В. М. Пасічний** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 184-190. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.27.

Please cite this article as:

Shvedyuk, D., Pasichnyi, V. Application of the target fermentation in the technology of extended shelf-life meat-based products. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 184-190, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.27.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Шведюк, Д. А. Использование целевой ферментации в технологии мясосодержащих продуктов длительного срока хранения / **Д. А. Шведюк, В. Н. Пасичный** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 184-190. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.27.

АННОТАЦИЯ Производство мясосодержащих продуктов позволяет уменьшить себестоимость продукции и расширить ассортимент данного вида продуктов. Однако, использование в рецептуре растительных составляющих может негативно повлиять на процессы автолиза и срок хранения продукта за высокого содержания моносахаридов в данном виде сырья. Учитывая это, перспективным направлением исследований является совершенствование технологии мясосодержащих продуктов с удлинением срока хранения. Одним из путей достижения этих целей является применение целевой ферментации, что позволит, с одной стороны полимеризовать углеводы уменьшив количество моносахаридов, а с другой - повысить органолептические характеристики и биологическую ценность продукта.

Ключевые слова: мясосодержащие продукты; селективная ферментация; протеиназы; коллагеназа; срок хранения.

Поступила (received) 08.05.2018

УДК 541.128.13

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.28

СУМІСНЕ ОДЕРЖАННЯ АКРИЛОВОЇ КИСЛОТИ ТА МЕТИЛАКРИЛАТУ ОКИСНЮВАЛЬНОЮ КОНДЕНСАЦІЄЮ МЕТАНОЛУ З ОЦТОВОЮ КИСЛОТОЮ

І. І. ШПИРКА*, Р. В. НЕБЕСНИЙ, З. Г. ПІХ

кафедра технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка»; м. Львів, УКРАЇНА
*email: iryna.i.shpyrka@lpnu.ua

АНОТАЦІЯ Досліджено процес окиснювальної конденсації метанолу з оцтовою кислотою в газовій фазі на катализаторі $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-WO}_3\text{-V}_2\text{O}_5$, модифікованому гідротермальним методом. Встановлено головні відмінності, між модифікованим та звичайним катализатором (з аналогічним кількісним та якісним складом), які базуються на основних технологічних параметрах – селективності та виходу за акрилатами, а також конверсії вихідних речовин. Встановлено оптимальні умови здійснення процесу окиснювальної конденсації оцтової кислоти з метанолом.

Ключові слова: акрилова кислота; оцтова кислота; метанол; гетерогенний катализ; окиснювальна конденсація.

COMPATIBLE OBTAINING ACRYLIC ACID AND METHYL ACRYLATE OXIDATIVE CONDENSATION OF METHANOL TO ACETIC ACID

I. SHPYRKA, R. NEBESNYI, Z. PIKH

Department of Technology of organic products, Lviv Polytechnic National University; Lviv, UKRAINE

ABSTRACT The purpose of the work was to investigate the effect of modification of the catalyst of oxidising condensation of methanol with acetic acid to acrylic acid. To achieve this goal, the following tasks must be accomplished: 1. Modify silica gel as a rigid skeleton of a heterogeneous catalyst by hydrothermal treatment. 2. To investigate the ability of the developed catalyst to intensify the process of acrylic acid production and to determine the optimal parameters of the process. 3. Establish dependence of selectivity, yields of acrylates and conversion of reagents from contact time, temperature and oxygen concentration. New catalyst with a modified nanoporous structure for the synthesis of acrylic acid by the oxidation condensation of methanol with acetic acid has been developed. A hydrothermal treatment of the silica gel KSKG brand was performed which was used to prepare catalytic system $\text{SiO}_2 / \text{B}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-WO}_3\text{-V}_2\text{O}_5$ with the atomic ratio of metal oxides B: P: (W: V) = 3: 1: 0.3, and (W: V) = 2:3. Catalyst was tested in the process of acrylic acid formation. The optimal conditions of synthesis and their influence on the basic technological parameters (acrylate selectivity and conversion of raw materials) were established. The optimal conditions for the production of acrylic acid with analysed catalyst are as follows: temperature - 400 °C, mixture of reagents $\text{CH}_3\text{OH}: \text{CH}_3\text{COOH} = 1.2: 1$, oxygen concentration in the oxidant stream is 100% and contact time - 8 seconds. Comparing the results obtained with modified and unmodified catalysts, it has been proven that modification of the porous structure of catalyst carrier can significantly improve its catalytic properties during the oxidative condensation of acetic acid with methanol into acrylic acid and methyl acrylate.

Keywords: acrylic acid; acetic acid; methanol; heterogeneous catalysis; oxidation condensation.

Вступ

Акрилова кислота (АК) - це цінний продукт в галузі органічного синтезу і широко використовується у виробництві високоякісних фарб і лаків, органічного скла, як допоміжна речовина в текстильній промисловості, у виробництві суперабсорбентів, у медицині [1-6]. Світове виробництво АК становить понад 5 млн. тонн на рік, і, згідно досліджень, ринок акрилатних мономерів постійно зростає [7]. Одним з найперспективніших способів виробництва АК є альдольна конденсація оцтової кислоти (ОК) з формальдегідом (ФА) [8]. Перевагами одержання АК методом альдольної конденсації є:

- розширення сировинної бази синтезу АК та можливість знизити залежність від нафтових джерел сировини;

- більш ефективне використання сировинних ресурсів, що досягається за рахунок вищої селективності утворення цільового продукту.

З метою диверсифікації сировинної бази доцільним було сумістити стадії окиснення метанолу до формальдегіду з процесом альдольної конденсації формальдегіду з ОК на одному катализаторі в одному реакторі, де утворений внаслідок окиснення метанолу ФА далі реагуватиме з ОК з утворенням АК. В разі успіху такий крок створює перспективи зменшення кількості стадій виробництва АК [9].

Додатковою перевагою одержання АК сумісним окисненням та конденсацією порівняно з

двома незалежними процесами також є краща енергоефективність.

Процес одержання акрилової кислоти відповідним методом є досить привабливий з точки зору технології та економічних міркувань. З його впровадженням можливо вирішити ряд проблем, пов'язаних з використанням формаліну, який спричиняє накопичення небажаної води у реакційній системі. Можливо отримати цільовий продукт за спрощеною схемою. Проте існує вагома перешкода, яка полягає у створенні комерційно привабливого каталізатора. Оскільки перспективним є синтез акрилової кислоти за один прохід, каталізатор повинен бути придатний для окиснення метанолу до формальдегіду, який вступатиме у конденсацію з оцтовою кислотою.

Тому, з огляду на велику перспективність здійснення синтезу акрилатів методом конденсації, відомі каталітичні системи потребують подальшого глибокого вивчення та якісних модифікаційних змін структури і складу для вирішення існуючих проблем, що в свою чергу робить доцільними додаткові дослідження у цій області.

Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми

З попередніх досліджень відомо, що каталітична система складу $B-P-W-V-O_x$ є ефективною у процесі одностадійного одержання акрилової кислоти з метанолу та оцтової кислоти.

Показано, що в процесі утворюється також інший цінний мономер – метилакрилат, який у промисловості одержують естерифікацією акрилової кислоти з метанолом в окремому реакторі.

Застосування розробленого каталізатора дозволяє одержувати акрилову кислоту та метилакрилат з сумарним виходом 30,4 % при сумарній селективності їх утворення 93,9 %. При рециркуляції непрореагованих речовин (оцтової кислоти та метилацетату) сумарний вихід акрилової кислоти та метилакрилату становитиме до 93,4 % [10].

Тому вирішено модифікувати каталізатор методом гідротермальної обробки носія для процесу окиснювальної конденсації ОК з метанолом до утворення АК.

Мета та завдання досліджень

Мета роботи - Встановити вплив гідротермальної обробки носія на ефективність у процесі окиснювальної конденсації ОК з метанолом до утворення АК.

У роботі передбачається вирішення таких завдань:

- дослідження ефективності модифікованої каталітичної системи у процесі одержання акрилової кислоти та метилакрилату окиснювальною конденсацією оцтової кислоти з метанолом;

- дослідження впливу технологічних параметрів процесу, а саме час контакту, температуру, співвідношення реагентів та концентрацію кисню в реакційній суміші на ефективність розробленого каталізатора, тобто конверсію реагентів, селективність та вихід акрилатів.

Матеріали та методи досліджень

Для дослідження процесу окиснювальної конденсації ОК з М для одержання АК приготовлено каталітичні системи на основі сумішей оксидів бору, фосфору, ванадію та вольфраму. Спочатку носій, а саме силікагель марки КСКГ (з питомою поверхнею 600 м²/г), піддали гідротермальній обробці в газовій фазі при температурі 150 °С протягом 3 годин. На приготований носій наносили активну фазу каталізатора методом просочування. Атомне співвідношення компонентів в каталізаторі $B:P:(W+V)$ становить 3:1:0,3; атомне співвідношення $W:V = 2:3$. Каталітичні властивості досліджували в реакторі проточного типу зі стаціонарним шаром каталізатора, температуру змінювали в межах 300 – 400 °С з інтервалом 25 °С, а час контакту становив 8с.

Гідротермальна обробка вплинула на фізико-хімічні властивості досліджуваного каталізатора, а саме, збільшились питома площа поверхні та середній розмір пор від 9,7 до 12,6 нанометрів.

Результати досліджень та їх обговорення

На першому етапі роботи досліджено вплив часу контакту на селективність утворення та вихід цільових продуктів. Залежність селективності утворення акрилової кислоти від часу контакту зображено на рис. 1. Селективність утворення метилацетату при збільшенні часу контакту до 8 с., плавно зменшується, а вже при збільшенні часу контакту до 16 с. селективність утворення виходить на плато. Для АК селективність плавно збільшується при збільшенні часу контакту від 4 с. до 8 с. і становить понад 21%. Селективність утворення АК залишається незмінною. При цьому селективність утворення АЦ при збільшенні часу контакту поступово спадає, а для МАкр – зростає.

На рис. 2. наведено вплив часу контакту на вихід АК в присутності каталізатора типу K_2 при температурі процесу 350 °С. Як видно з рис. 2., вихід Мац, АК, АЦ, МАкр плавно зростає зі збільшенням часу контакту. Найбільше значення виходу АК спостерігається при досягненні часу контакту 8 с. і становить 6,3 %. Проаналізувавши дані рис.3.3, встановлено, що найкращим часом контакту є 8 с. при температурі 350 °С, при цьому вихід АК становить 6,3%.

Дослідження впливу часу контакту на параметри процесу одержання акрилової кислоти з оцтової кислоти та метанолу здійснювали при температурі 350 °С. Встановлено, що зі збільшенням

часу контакту від 4 до 16 с. сумарна селективність утворення АК та МАкр дещо збільшується, проте їх сумарний вихід при збільшенні часу контакту до 8 с. спочатку зростає, а потім плавно виходить на плато.

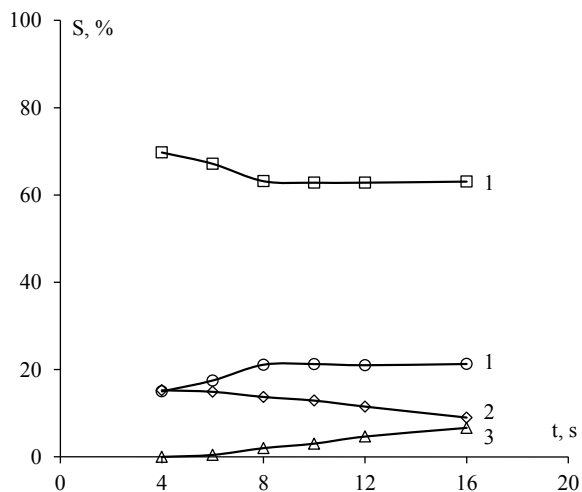


Рис. 1 – Вплив часу контакту на селективності утворення Мац (1), АК (2), АЦ(3), МАкр (4) у присутності каталізатора K_2 . Температура 350 °C; мольне співвідношення ОК:М = 1:1

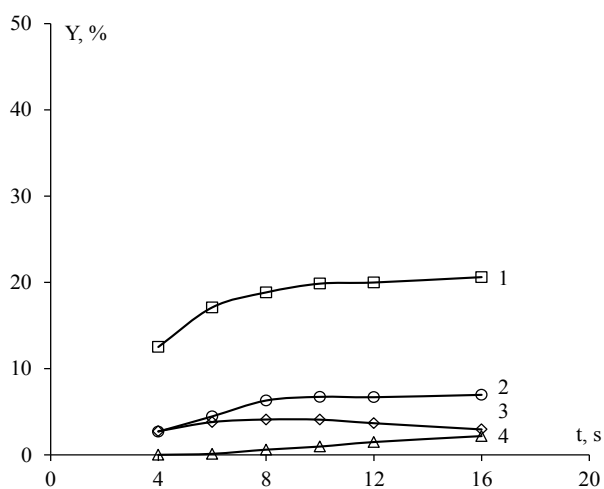


Рис. 2 – Вплив часу контакту на вихід Мац (1), АК (2), АЦ(3), МАкр (4) у присутності каталізатора K_2 . Температура 350 °C; мольне співвідношення ОК:М = 1:1

Таким чином, у результаті проведення експериментів встановлено, що оптимальним часом контакту з технологічної точки зору є 8 с., при цьому сумарний вихід акрилатів становить 6,9 %, а сумарна селективність їх утворення 62,7 % при конверсії ОК 29,8 %.

Для встановлення оптимальних умов процесу одержання акрилової кислоти шляхом окиснювальної конденсації оцтової кислоти з метанолом, дослідження здійснювали на оптимальному

каталізаторі типу K_2 (атомне співвідношення W:V = 2:3); температуру змінювали в межах 300 – 400 °C з інтервалом 25 °C, а час контакту становив 8 с.

Як видно з рис. 3, значення селективності плавно зростає при збільшенні температури для АК, АЦ та МАкр, а селективність утворення Мац при рості температури зменшується. При температурі 400 °C селективність утворення АК, АЦ та МАкр досягають найбільшого значення і відповідно становить 56,8%, 27,6% та 6,1%. При значенні температури 300 °C найбільша селективність спостерігається для Мац – 95,5 %, а найменше значення селективності при тій же температурі становить близько 1% для АК, АЦ та МАкр.

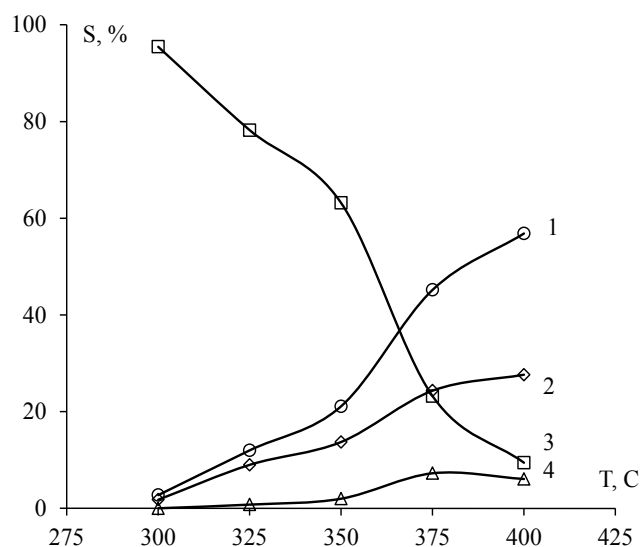


Рис. 3 – Вплив температури на селективності утворення АК (1), АЦ (2), Мац (3), МАкр (4) у присутності каталізатора K_2 . Час контакту 8 с; мольне співвідношення ОК:М = 1:1

При збільшенні температури вихід АК, АЦ та МАкр зростає (рис. 4). Найбільше значення виходу АК, АЦ та МАкр спостерігається при температурі процесу 400 °C і відповідно становить 28,6 %, 13,9 % та 4,8 %. Вихід Мац зростає до температури 350 °C, проте за подальшого збільшення температури процесу до 400 °C – зменшується. Найбільше значення виходу Мац становить 18,8 % при температурі 350 °C, а найменше значення виходу при цій же температурі становить 0,6 % для МАкр.

Досліджено вплив співвідношення реагентів (метанол:оцтова кислота) на процес одержання акрилової кислоти шляхом окиснювальної конденсації ОК з М, дослідження здійснювали на оптимальному каталізаторі типу K_2 (температура обробки носія становить 150 °C); температура процесу – 350 °C, а час контакту – 8 с. Для проведення дослідів готували зразки різного мольного співвідношення реагентів М:ОК = 1:1; 1,1:1; 1,2:1; 1,5:1; 2:1; 5:1.

Залежність селективності утворення акрилової кислоти від співвідношення реагентів зображено на рис. 5. При збільшенні співвідношення реагентів до 1:1,5 збільшується селективність утворення АК і МАкр, проте подальше збільшення вмісту метанолу в зразках від 1,5:1 до 5:1, практично не впливає на селективність утворення АК і МАкр. Для АЦ та Мац селективність їх утворення плавно зменшується до співвідношення реагентів 1:1,5, і з подальшим збільшенням практично залишається незмінною. Найбільше значення селективності утворення АК становить 24,5%, при співвідношенні реагентів М:ОК=5:1.

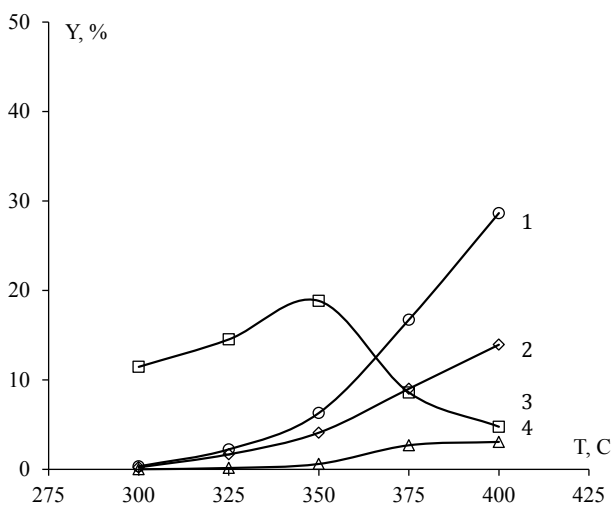


Рис. 4 – Вплив температури на виходи АК (1), АЦ (2), Мац (3), МАкр (4) у присутності каталізатора K_2 . Час контакту 8 с; мольне співвідношення ОК:М = 1:1

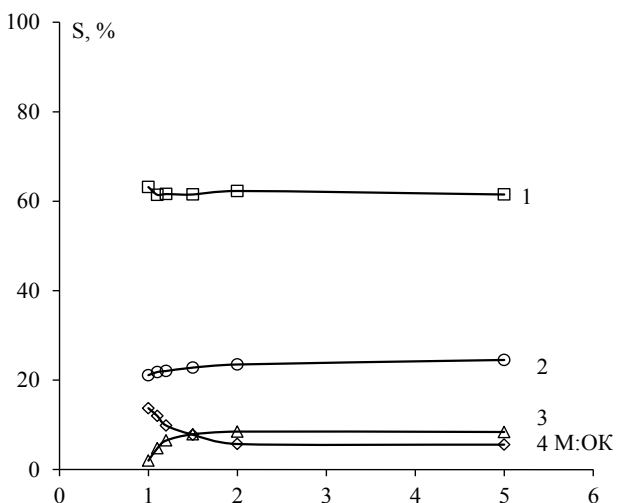


Рис. 5 – Вплив співвідношення реагентів на селективності утворення Мац(1), АК (2), МАкр (3), АЦ (4) у присутності каталізатора K_2 . Час контакту 8 с; температура процесу 350 °C

Як показали дослідження, зі збільшенням співвідношення реагентів (метанол : оцтова кислота = 2:1), спостерігається зростання виходу Мац, АК та МАкр, і становить відповідно 21,3%, 8% та 2,9%. Вихід АЦ при збільшенні співвідношення реагентів зменшується, найвище значення становить 4,1% при М:ОК = 1:1, а найменше 1,9 % для М:ОК = 5:1.

На рис. 6. наведено вплив зміни співвідношення реагентів на сумарну селективність утворення АК і МАкр (1), конверсію ОК (2) та сумарний вихід АК і МАкр (3). На всьому дослідженому діапазоні сумарна селективність та вихід АК і МАкр зі збільшенням співвідношення реагентів зростає.

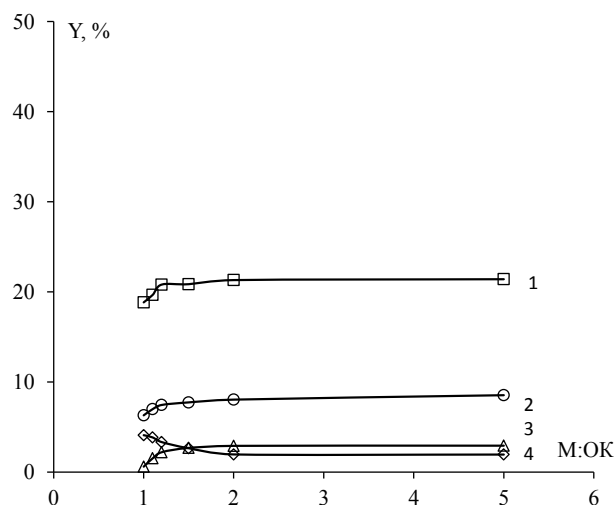


Рис. 6 – Вплив співвідношення реагентів на виходи Мац (1), АК (2), МАкр (3), АЦ (4) у присутності каталізатора K_2 . Час контакту 8 с; температура процесу 350 °C

Також визначено вплив концентрації кисню на процес одержання акрилової кислоти шляхом окиснювальної конденсації ОК з М дослідження здійснювали на каталізаторі K_2 ; температура процесу 350 °C, а час контакту становив 8 с. Для реакції брали наступні значення концентрації кисню $C(O_2)$ =10%, 21 %, 50 %, 75 %, 100 %.

Як видно з рис.7, значення селективності плавно зростає при збільшенні концентрації кисню для АК і МАкр і становлять відповідно 42,6 і 4 % при концентрації кисню 100 %. Для АЦ та Мац селективність їх утворення зі збільшенням концентрації кисню зменшується, найбільше значення селективності спостерігається при концентрації кисню 10 % - 14,5 і 65,2 % відповідно.

Зі збільшенням концентрації кисню вихід АК плавно зростає, найбільше значення виходу АК становить 11,4 % при концентрації кисню 100 %. При цій ж концентрації кисню спостерігається зменшення виходу Мац і АЦ, а саме 12,6 і 1,7%. Найбільше значення виходів Мац і АЦ становить 21,5 і 4,8% при

концентрації кисню 10%. А вихід МАкр не суттєво змінюється в процесі збільшення концентрації кисню.

Встановлено, що при збільшенні концентрації кисню до 100% зменшує вихід АЦ, що у свою чергу веде до зростання виходів АК і МАкр.

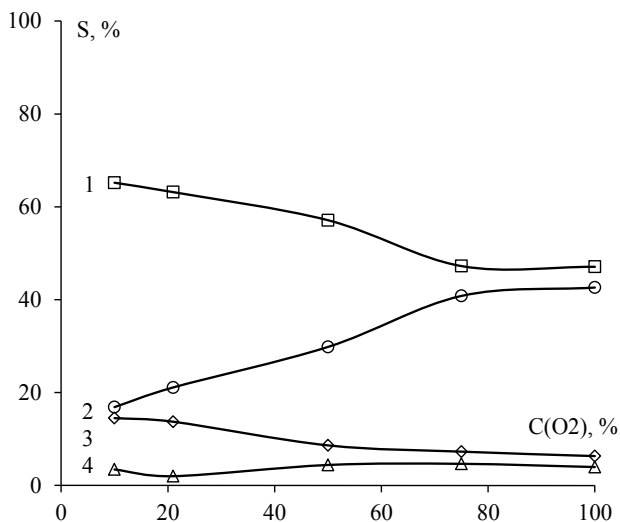


Рис. 7 – Вплив концентрації кисню на селективності утворення Мац (1), АК (2), АЦ (3), МАкр (4) у присутності каталізатора K₂. Час контакту 8 с; температура процесу 350 °C

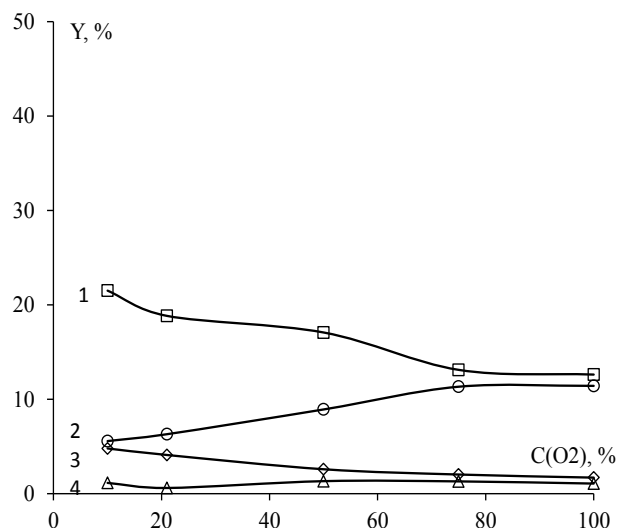


Рис. 8 – Вплив концентрації кисню на виходи Мац (1), АК (2), АЦ (3), МАкр (4) у присутності каталізатора K₂. Час контакту 8 с; температура процесу 350 °C

Порівнюючи результати, одержані на модифікованому і не модифікованому каталізаторах видно, що модифікація поруватої структури носія каталізатора дозволяє суттєво покращити його каталітичні властивості в процесі окиснювальної конденсації ОК з метанолом в АК та МАкр (рис. 7). Так, на немодифікованому каталізаторі сумарний

вихід акрилатів становить 30,4 % при сумарній селективності їх утворення 93,4 % та конверсії ОК 37,7 %. А на каталізаторі, який пройшов попередню гідротермальну обробку сумарний вихід акрилатів становить 57,1 % при сумарній селективності їх утворення 93,4 % та конверсії ОК 50 %.

Отже, модифікація нанопористої структури каталізатора шляхом гідротермальної обробки носія дозволяє суттєво підвищити ефективність одержання АК та МАкр методом окиснювальної конденсації метанолу з ОК, а отже робить значний крок на шляху до промислового впровадження цього перспективного методу одержання акрилатних мономерів.

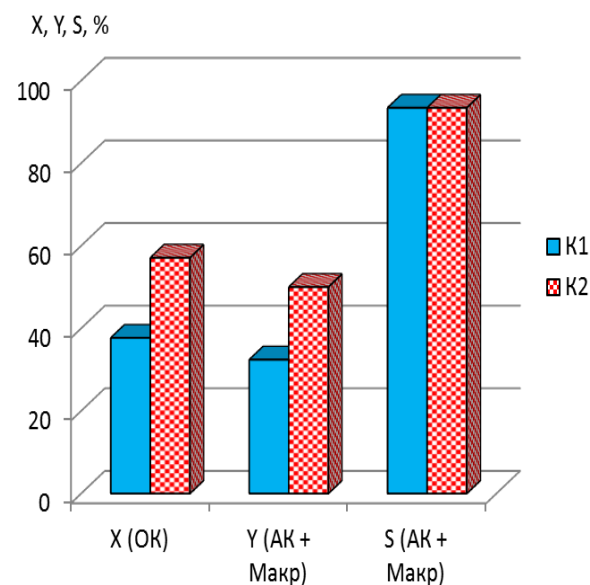


Рис. 7 – Порівняння каталітичної активності в оптимальних умовах на обробленому та необробленому носії в процесі окиснювальної конденсації метанолу з оцтовою кислотою

Висновки

Здійснено гідротермальну обробку силікагелю марки КСКГ, з якого приготовано каталітичну систему SiO₂/B₂O₃-P₂O₅-WO₃-V₂O₅ з атомним співвідношенням оксидів металів В:Р:(W:V) = 3:1:0.3, та (W:V) = 2:3.

Випробувано каталізатор у процесі утворення акрилової кислоти та метилакрилату методом окиснювальної конденсації метанолу з ОК. Встановлено оптимальні умови синтезу та їх вплив на основні технологічні параметри (селективність за акрилатами та конверсію сировини). Оптимальними умовами виробництва акрилової кислоти на досліджуваному каталізаторі є наступні: температура – 400 °C, суміш реагентів CH₃OH : CH₃COOH = 1,2 : 1, концентрація кисню в потоці окисника 100 % та час контакту – 8 секунд. Так, на каталізаторі, який пройшов попередню гідротермальну обробку сумарний вихід акрилатів становить 57,1 % при

сумарній селективності їх утворення 93,4 % та конверсії ОК 50 %.

Отже, модифікація нанопористої структури каталізатора шляхом гідротермальної обробки носія дозволяє суттєво підвищити ефективність одержання АК та МАкр методом окиснювальної конденсації метанолу з ОК, а отже робить значний крок на шляху до промислового впровадження цього перспективного методу одержання акрилатних мономерів.

Список літератури

1. **Tu, X.** Controlled silylation of MoVTeNb mixed oxide catalyst for the selective oxidation of propane to acrylic acid / **X. Tu, M. Niwa, A. Arano, Y. Kimata, E. Okazaki, S. Nomura** // *Applied Catalysis A, General*. – 2018. – 549. – P. 152-160. – doi:10.1016/j.apcata.2017.09.013.
2. **Chu, H. S.** Direct fermentation route for the production of acrylic acid / **H. S. Chu, J.-H. Ahn, J. Yun, I. S. Choi, T.-W. Nam, K. M. Cho** // *Metabolic Engineering*. – 2015. – 32. – P. 23-29. – doi:10.1016/j.ymben.2015.08.005.
3. **Sun, P.** NaY Zeolites Catalyze Dehydration of Lactic Acid to Acrylic Acid / **P. Sun, D. Yu, Z. Tang, H. Li, H. Huang** // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2010. – 49 (19). – P. 9082–9087. – doi: 10.1021/ie101093x.
4. **Maitz, M. F.** Applications of synthetic polymers in clinical medicine / **M. F. Maitz** // *Biosurface and Biotechnology*. – 2015. – 1(3). – P. 161-176. – doi:10.1016/j.bsbt.2015.08.002.
5. **Cheng, D.** Preparation of low cost superabsorbent hydrogel by urea and acrylic acid / **D. Cheng, Y. Liu, G. Yang, G. Hao, Y. Wang, A. Zhang** // *Materials Letters*. – 2017. – 204. – P. 16-18. – doi: 10.1016/j.matlet. 2017.05.136.
6. **Wang, Su.** Preparation and rheological properties of starch-g-poly(butyl acrylate) catalyzed by horseradish peroxidase / **Su Wang, Jin Xu, Qiang Wang, Xuerong Fana, Yuanyuan Yu, Ping Wang, Ying Zhang, Jiugang Yuan, Artur Cavaco-Paulo** // *Process Biochemistry*. – 2017. – 59. – P. 104-110. – doi: 10.1016/j.procbio.2017.01.014.
7. **Zhang, J.** Modeling and simulation of a bio-inspired symmetrical jumping robot / **J. Zhang, X. Feng, Y. Zhao, W. Ji, C.T. Au** // *J. Ind. Eng. Chem.* – 2014. – 20. – P. 1353. – doi: 10.5772/60579.
8. **Жизневський, В. М.** Одержання акрилатних мономерів газофазно-каталітичною конденсацією карбонільних сполук в газовій фазі / **В. М. Жизневський, Р. В. Небесний, В. В. Івасів, С. В. Шибанов** // *Доповіді НАН України*, 2010. – №10. – С. 114–118.
9. **Mamoru, Ai.** Reaction of acetic acid with methanol over vanadium-titanium binary phosphate catalysts in the presence of oxygen / **Mamoru Ai** // *Applied Catalysis*. – 1990. – 59(1). – P. 227-235. – doi: 10.1016/S0166-9834(00)82200-9.

10. **Небесний, Р. В.** Одержання акрилової кислоти з метанолу та оцтової кислоти в присутності складних оксидних каталізаторів / **Р. В. Небесний, З. Г. Піх, І. І. Шпирка, В. В. Івасів, Ю. В. Небесна, У. В. Фуч** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 62 (1171). – С. 125 - 130.

Bibliography (transliterated)

1. **Tu, X., Niwa, M., Arano, A., Kimata, Y., Okazaki, E., Nomura, S.** Controlled silylation of MoVTeNb mixed oxide catalyst for the selective oxidation of propane to acrylic acid. *Applied Catalysis A, General*, 2018, **549**, 152-160, doi:10.1016/j.apcata.2017.09.013.
2. **Chu, H. S., Ahn, J.-H., Yun, J., Choi, I. S., Nam, T.-W., Cho, K. M.** Direct fermentation route for the production of acrylic acid. *Metabolic Engineering*, 2015, **32**, 23-29, doi:10.1016/j.ymben.2015.08.005.
3. **Sun, P., Yu, D., Tang, Z., Li, H., Huang, H.** NaY Zeolites Catalyze Dehydration of Lactic Acid to Acrylic Acid. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2010, **49** (19), 9082–9087, doi: 10.1021/ie101093x.
4. **Maitz, M. F.** Applications of synthetic polymers in clinical medicine. *Biosurface and Biotechnology*, 2015, **1**(3), 161-176, doi: 10.1016/j.bsbt.2015.08.002.
5. **Cheng, D., Liu, Y., Yang, G., Hao, G., Wang, Y., Zhang, A.** Preparation of low cost superabsorbent hydrogel by urea and acrylic acid. *Materials Letters*, 2017, **204**, 16-18, doi: 10.1016/j.matlet. 2017.05.136.
6. **Wang, Su, Xu, Jin, Wang, Qiang, Fana, Xuerong, Yu, Yuanyuan, Wang, Ping, Zhang, Ying, Yuan, Jiugang, Cavaco-Paulo, Artur.** Preparation and rheological properties of starch-g-poly(butyl acrylate) catalyzed by horseradish peroxidase. *Process Biochemistry*, 2017, **59**, 104-110, doi: 10.1016/j.procbio.2017.01.014.
7. **Zhang, J., Feng, X., Zhao, Y., Ji, W., Au, C.T.** Modeling and simulation of a bio-inspired symmetrical jumping robot. *J. Ind. Eng. Chem.*, 2014, **20**, 1353, doi: 10.5772/60579.
8. **Giznevskiy, V. M., Nebesnyi, R. V., Ivasiv V. V., Shibanov, S. V.** Odergannya akrilatnih monomeriv gazofazno-katalitichnoyu condensacieyu karbonilnih spoluk v gazoviy fazi. *Dopovidy NANU*, 2010, **10**, 114–118.
9. **Mamoru, Ai.** Reaction of acetic acid with methanol over vanadium-titanium binary phosphate catalysts in the presence of oxygen. *Applied Catalysis*, 1990, **59**(1), 227-235, doi: 10.1016/S0166-9834(00)82200-9.
10. **Nebesnyi, R. V., Shpyrka, I. I., Ivasiv, V. V., Nebesna, Y. V., Fuch, U. V.** Acrylic acid obtaining from methanol and acetic acid in the presence of complex oxide catalysts. *Bulletin of NTU "KhPI". Series : System analysis, control and information technology*. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015, **62**(1171), 125–130.

Відомості про авторів (About Authors)

Шпирка Ірина Іванівна – аспірант кафедри технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка»; м. Львів, Україна; e-mail: iryna.i.shpyrka@lpnu.ua.

Ірина Шпирка – PhD student of Department of Technology of organic products, Lviv Polytechnic National University; Lviv, Ukraine; e-mail: iryna.i.shpyrka@lpnu.ua.

Небесний Роман Володимирович – кандидат технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», провідний науковий співробітник кафедри технології органічних продуктів; м. Львів, Україна; e-mail: nebesnyi@lp.edu.ua.

Roman Nebesnyi – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Lviv Polytechnic National University, Leading Researcher, Department of Technology of organic products; Lviv, Ukraine; e-mail: nebesnyi@lp.edu.ua.

Піх Зорян Григорович – доктор хімічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», завідувач кафедри технології органічних продуктів; м. Львів, Україна; e-mail: pikh@lp.edu.ua.

Zorian Pikh – Doctor of Chemical Sciences (D.Sc.), Professor, Lviv Polytechnic National University, Head of Department of Technology of organic products; Lviv, Ukraine; e-mail: pikh@lp.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Шпирка, І. І. Сумісне одержання акрилової кислоти та метилакрилату окиснювальною конденсацією метанолу з оцтовою кислотою / **І. І. Шпирка, Р. В. Небесний, З. Г. Піх** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». - 2018. – № 16 (1292). – С. 191-197. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.28.

Please cite this article as:

Shpyrka, I. I., Nebesnyi, R. V., Pikh, Z. G. Compatible obtaining acrylic acid and methyl acrylate oxidative condensation of methanol to acetic acid. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 191-197, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.28.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Шпирка, И. И. Совместное получение акриловой кислоты и метилакрилата окислительной конденсацией метанола с уксусной кислотой / **И. И. Шпирка, Р. В. Небесный, З. Г. Пих** // Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». - 2018. – № 16(1292). – С. 191-197. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.28.

АННОТАЦИЯ Исследован процесс окислительной конденсации метанола с уксусной кислотой в газовой фазе на катализаторе $\text{SiO}_2 / \text{V}_2\text{O}_5\text{-P}_2\text{O}_5\text{-WO}_3\text{-V}_2\text{O}_5$, модифицированном гидротермальным методом. Установлены главные различия между модифицированным и обычным катализатором (с аналогичным количественным и качественным составом), которые базируются на основных технологических параметрах - селективности и выхода за акрилатами, а также конверсии исходных веществ. Установлены оптимальные условия осуществления процесса окислительной конденсации уксусной кислоты с метанолом.

Ключевые слова: акриловая кислота; уксусная кислота; метанол; гетерогенный катализ; окислительная конденсация.

Поступила (received) 27.04.2018

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

<i>Акімов О. В., Пензев П. С., Салтиков Л. О., Горощенко О. М.</i> Проектування прогнозуємих структур перерізів виливка блок-картера циліндрів	3
<i>Бориченко О. В., Чернявський А. В., Остапчук Ю. Ю.</i> Застосування методу головних компонент для оцінювання рівня енергоефективності	9
<i>Бурдейна В. М., Артюх С. М.</i> Основні особливості оптимізації розмірів координованих отворів при різних видах обробки	16
<i>Довгополов А. Ю., Некрасов С. С.</i> Дослідження міцності роз'ємного різьбового з'єднання з великим кроком в деталях з армованих композиційних матеріалів	22
<i>Іорданов І. В., Чепіга Д. А., Коломісць В. А., Подкопасєв Є. С., Король А. В., Довгаль В. Ю.</i> Про вплив згибних деформацій на стан покрівлі вугільного пласта при різких обваленнях породної товщі	27
<i>Комір А. І., Одейчук М. П., Ткаченко В. І.</i> Трибологічні випробування та фізична модель стирання вуглецевих матеріалів в окислювальному середовищі при високих температурах та іонізуючих випромінюваннях	41
<i>Костенко В. Л., Кондратьєв С. Б., Ядрова М. В., Попов Д. О.</i> Енергоефективна система панорамного ультразвукового виявлення перешкод для сліпих	47
<i>Литвиненко В. П.</i> Оцінка швидкості потоку газів в системі поршень – циліндр	56
<i>Тарасенко М. О., Тарасенко О. М., Угольніков С. В.</i> Дослідження динаміки многоходових трубчатих повотропідігрівників	65
<i>Ткаченко В. І., Скоромна С. Ф., Казарінов Ю. Г.</i> Надкритична флюїдна CO ₂ екстракція торію з "чорних" пісків Азовського моря	70
<i>Хоменко І. В.</i> Про взаємодію електромагнітного поля і феромагнітного середовища	76
<i>Черняк О. М.</i> Метод обробки радіаційними технологіями спеціального одягу для забезпечення гігієни праці	84
<i>Шамрай А. І., Мариненко Д. В., Костик К. О., Кравцова Н. В.</i> Визначення зони дії відкритих додатків для масивних вузлів у виливках з нержавіючої сталі	90
<i>Юсубов І. С., Мариненко Д. В., Костик К. О., Кравцова Н. В.</i> Положення виливка у формі з різною товщиною стінок	96

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

<i>Вєрбицький Є. В.</i> Швидке перетворення Фур'є модульованих сигналів, представлених рядом Фур'є двох змінних	102
<i>Грудзинський Ю. Є., Лукомський Я. Ю.</i> Побудова сенсорної mesh-мережі промислового інтернету речей на основі технології Bluetooth 4.2	107
<i>Грудзинський Ю. Є., Харченко Д. Ю.</i> Деякі питання запобігання інцидентам при зовнішніх кібератаках на автоматизовану систему керування котлоагрегатом системи опалення	112
<i>Грудзинський Ю. Є., Шулепа А. М.</i> Особливості оцінки ризику в автоматизованих системах керування технологічними процесами	117
<i>Носова Я. В., Аврунїн О. Г., Фарук Х. И.</i> Визначення мікрохарактеристик повітряного потоку в носовій порожнині при диханні	122
<i>Тихонов Ю. Л., Лахно В. А.</i> Онтологічний підхід до контролю знань в e-освіті	128

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ

<i>Грубнік А. О.</i> Сучасні вимоги до тепломасообмінного обладнання. Конструктивна еволюція вихрових розпилювальних апаратів	134
<i>Дубовик Д. Д.</i> Методичні особливості оцінки процесів замулення штучних водосховищ на основі метода аналогії	145
<i>Калугіна І. М., Тележенко Л. М., Дзюба Н. А.</i> Дослідження структури заморожених солодких страв з фейхоа	151
<i>Кривільова С. П.</i> Оцінка можливості використання нанокристалічних порошків апатитового складу в якості неорганічних наповнювачів зубних паст	158
<i>Мойсєєв В. Ф., Манойло Є. В., Пономарьова Н. Г., Репко К. Ю., Давидов Д. В.</i> Методологія розрахунку режимно-конструктивних і гідродинамічних параметрів пінних апаратів для процесів масообміну	165
<i>Трубінікова А. А.</i> Контроль і управління безперервним процесом мембранного видалення лактози із маслянки	177
<i>Шведюк Д. А., Пасічний В. М.</i> Використання цільової ферментації у технології м'ясомістких продуктів подовженого терміну зберігання	184
<i>Шпірка І. І., Небесний Р. В., Піх З. Г.</i> Сумісне одержання акрилової кислоти та метилакрилату окиснювальною конденсацією метанолу з оцтовою кислотою	191

CONTENTS

ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

- Akimov O., Penzev P., Saltikov L., Goroschenko O.** Designing of predictable cross-sectional casting structures of block-crankcase cylinders 3
- Borychenko O., Cherniavskiy A., Ostapchuk Y.** Application of principal components method for evaluation of energy efficiency level 9
- Burdeina V., Artyuh S.** The main features of optimizing the sizes of coordinated holes for different types of processing 16
- Dovgopolov A., Nekrasov S.** Research into strength of the thread detached connection with a large pitch of thread in designs made of reinforced composite material 22
- Iordanov I., Chepiga D., Kolomiets V., Podkopaiev Y., Korol A., Dovhal V.** On the influence of bending deformations on the condition of the roof of a coal plast with extremely breaks of brown thickness 27
- Komir A., Odeychuk M., Tkachenko V.** Tribological tests and physical model of erasing of carbon materials in the oxidative medium at high temperatures and ionizing radiation 41
- Kostenko V., Kondratyev S., Yadrova M., Popov D.** Energy efficient system of panoramic ultrasonic obstruction obstacles for the blind 47
- Lytvynenko V.** Evaluation of the flow gaz rate in the piston cylinder system 56
- Tarasenko M., Tarasenko O., Ugolnikov S.** Research dynamics of multipass tubular air 65
- Tkachenko V., Skoromnaya S., Kazarinov Yu.** Supercritical fluid CO₂ extraction of thorium from "black" sands of the Azov sea 70
- Khomenko I.** About the interaction of the electromagnetic field and the permagnetic environment 76
- Cherniak O.** The method of processing the special clothes of radiation technology to provide occupational health 84
- Shamrai A., Marynenko D., Kostyk K., Kravtsova N.** Definition of range of open applications for massive nodes in the stainless steel castings 90
- Yusubov I., Marynenko D., Kostyk K., Kravtsova N.** Provisions of loading in form with different woodworking walls 96

INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

- Verbytskyi I.** A fast Fourier transform of modulated signals based on double Fourier series 102
- Grudzynskyy Yu., Lukomskiy Ya.** Building the sensory mesh network of IIoT based on Bluetooth 4.2 technology 107
- Grudzynskyy Yu., Kharchenko D.** Some incident prevention issues at external cyberattacks on heating boiler ICS 112
- Grudzynskyy Yu., Shulepa A.** Special considerations for doing risk assessment of industrial control systems 117
- Nosova Ya., Avrunin O., Farouk H.** Determination of microcharacteristics of air flow in the nasal cavity during breathing 122
- Tikhonov Y., Lakhno V.** Ontological approach to knowledge control in e-learning 128

CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

- Hrubnik A.** Modern requirements for heat-exchange equipment. Constructive evolution of vortex spraying devices 134
- Dubovyk D.** Methodological features of the assessment of silting processes of artificial reservoirs based on the analogy method 145
- Kalugina I., Telezhenko L., Dzyuba N.** The structure investigation of the frozen sweet dishes from feijoa 151
- Krivileva S.** Evaluation of the possibility of using nanocrystalline apatite powders as inorganic fillers of toothpastes 158
- Moiseev V., Manoilo E., Ponomaryova N., Repko K., Davydov D.** Methodology of calculation of construction and hydrodynamic parameters of a foam layer apparatus for mass-transfer processes 165
- Trubnikova A.** Control and management continuous membrane process removal lactose with buttermilk 177
- Shvedyuk D., Pasichniy V.** Application of the target fermentation in the technology of extended shelf-life meat-based products 184
- Shpyrka I., Nebesnyi R., Pikh Z.** Compatible obtaining acrylic acid and methyl acrylate oxidative condensation of methanol to acetic acid 191

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Збірник наукових праць
Серія:
Нові рішення в сучасних технологіях
№ 16 (1292) 2018

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.nsmi@gmail.com

Обл.-вид. № 6-18

Підп. до друку «31» травня 2018 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 19,0. Облік.вид.арк. 8,75.
Тираж 300 прим. Зам. № . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК №5478 від 21.08.2017
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
