

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**

№ 5 (1330) 2019

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків  
НТУ «ХПІ», 2019

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

No. 5 (1330) 2019

Collected Works

The edition was founded in 1961

Kharkiv  
NTU "KhPI", 2019

**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», 2019. — № 5 (1330) 2019. — 219 с. — ISSN 2079-5459.

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

The journal publishes scientific results and accomplishments of multidisciplinary researches 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, high voltage techniques and electrophysics, 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 Є. 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 Є. 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:*

Авдеева О. П., НТУ «ХПІ», Україна

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

Буряковський С. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Вехов С., Мерилендський університет, США

Гораш Є., проф., Університет Стратклайда, Великобританія

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

Заковоротний О. Ю., 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

Чжан К. Л., проф., Вроцлавський технологічний університет,

Польща

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 4 від 29 березня 2019 р.

**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:*

Avdieieva O. P., NTU "KhPI", Ukraine

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

Buriakovskui S. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

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

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

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

Zakovorotniy A. Yu., prof., NTU "KPI", 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

Melezhih 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

Chrzan K. L., prof., Wroclaw University of Technology, Poland

УДК 536.24:66.045.132

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.01

## МЕТОДИКА ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА С НЕПОДВИЖНЫМ ПЛОТНЫМ СЛОЕМ ГРАНУЛИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА

**И. Л. БОШКОВА<sup>1\*</sup>, Н. В. ВОЛГУШЕВА<sup>1</sup>, А.И. СОЛОДКА<sup>1</sup>, Л.З. БОШКОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> кафедра теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей, Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, УКРАИНА

<sup>2</sup> кафедра термодинамики и возобновляемой энергетики, Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, УКРАИНА

\*e-mail: boshkova.irina@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** Рассматривается возможность использования низкопотенциальных тепловых вторичных энергоресурсов в виде отходящих газов от промышленных предприятий незначительной энергетической мощности, в частности, пищевых. Анализируются теплоутилизаторы с неподвижным плотным слоем гранулированных материалов, обеспечивающие непосредственный теплообмен газа (воздуха) с частицами. Указывается на недостаточное количество эффективных разработок теплоутилизаторов низкопотенциальной теплоты и сведений по рациональным тепловым режимам их работы. Отмечается эффективность применения гранулированных материалов в теплоэнергетике с позиции интенсификации процессов переноса теплоты и массы. Описана методика теплового расчета контактного теплоутилизатора для определения его геометрических характеристик и основных параметров процесса. Предлагаемая методика учитывает изменение коэффициента межкомпонентного теплообмена во времени. Приведены результаты расчетов основных характеристик теплоутилизатора промышленного назначения с неподвижной насадкой. В теплоутилизаторе с неподвижной насадкой не возникает необходимости в организации движения слоя гранулированного материала, что существенно упрощает эксплуатацию и конструкцию теплообменника. Представлены результаты расчета теплоутилизатора с неподвижным слоем, предназначенного для обогрева помещения, расположенного непосредственно рядом с вентиляционными каналами предприятия. В предлагаемом теплоутилизаторе в периоде нагрева передача теплоты осуществляется при непосредственном контакте газового потока с частицами материала, а в периоде охлаждения теплота передается от наружной поверхности теплоутилизатора в окружающую среду. Для получения сглаженной характеристики нагрева помещения целесообразно дублировать наполненные гранулированным материалом рабочие каналы теплоутилизатора и включать их поочередно. Рассчитанный теплоутилизатор отличается сравнительно высоким значением коэффициента полезного действия и возможностью работы без прямого контакта частиц насадки с воздухом обогреваемого помещения. Рассчитанные на низкопотенциальную теплоту конструкции теплоутилизаторов предлагаются для использования на предприятиях пищевых производств.

**Ключевые слова:** утилизация; низкопотенциальная теплота; эффективность; коэффициент межкомпонентного теплообмена; неподвижный слой; керамзит

## METHOD OF THERMAL CALCULATION OF A HEAT EXCHANGER WITH A FIXED DENSE LAYER OF GRANULATED MATERIAL

**I. BOSHKOVA<sup>1\*</sup>, N. VOLGUSHEVA<sup>1</sup>, A. SOLODKA<sup>1</sup>, L. BOSHKOV<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Department of Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transportation, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Thermodynamics and Renewable Energy, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, UKRAINE

**ABSTRACT** The aim of the work is to develop a methodology for calculating the heat exchanger for the utilization of low-potential heat fluxes from industrial enterprises and its approbation. Methods of solution included the analysis of existing heat recovery devices, the identification of existing problems of creating efficient heat exchangers and the creation of an algorithm for calculating heat exchangers with a dense layer of granulated material. The possibility of using low-potential thermal secondary energy resources in the form of exhaust gases from industrial enterprises of low energy capacity, in particular, food, is considered. Heat exchangers with a fixed dense layer of granular materials are analyzed, providing direct heat exchange of gas (air) with particles. There is a shortage of developed efficient heat exchangers for low-potential heat fluxes and information on rational thermal modes of their operation. The effectiveness of the use of granular materials in heat and power engineering is noted from the standpoint of intensifying the processes of heat and mass transfer is shown. The method of thermal calculation of the contact heat exchanger to determine its geometric characteristics and the main process parameters is described. The proposed method takes into account the change in the coefficient of intercomponent heat transfer over time. The results of calculations of the main characteristics of an industrial heat exchanger with fixed filler are presented. In the regenerator with fixed filler there is no need to organize the movement of a layer of granular material, which greatly simplifies the operation and design of the heat exchanger. The results of the calculation of a fixed bed heat exchanger designed for space heating, located directly next to the ventilation channels of the enterprise, are presented. In the proposed heat exchanger in the heating period, the heat is transferred by direct contact of the gas flow with the material particles, and in the cooling period the heat is transferred from the outer surface of the heat exchanger to the environment. To obtain a smoothed heating characteristic of the room, it is advisable to duplicate the working channels of the heat

*utilizer filled with granular material and turn them on alternately. The calculated heat exchangers are characterized by a relatively high efficiency and the ability to work without direct contact of the particles with the air of the heated room. Designed for low-potential heat flux of regenerator designs are offered for use in food production plants.*

**Keywords:** utilization; low-potential heat; efficiency; inter-component heat transfer coefficient; fixed bed; expanded clay

## Введение

Актуальность работы определяется целесообразностью использования вторичных энергоресурсов (ВЭР) в виде теплоты отходящих газов. Энергетический потенциал ВЭР реализуется в утилизационных установках и системах, к которым относятся котлы-утилизаторы, теплообменники, печи, газотурбины, системы оборотного водоснабжения для снижения расхода технологической воды, тепловые насосы и т. д. [1-3]. В перечень мероприятий по энергосбережению, имеющих приоритетное значение, включено повышение уровня использования ВЭР [4]. Теплота промышленных выбросов даже в Европейских странах достигает 30%, что требует пристального внимания и анализа возможности ее утилизации [5]. Общегодовой выход ВЭР в Украине оценивается величиной 26,18 млн. т. у.т. по данным 2010 г. [6], однако для привлечения его в энергетический баланс необходимы значительные капитальные вложения, связанные с внедрением энергосберегающего оборудования и технологий [7].

Высокий энергетический потенциал имеют отходящие дымовые газы, при его использовании на 50% возможно получение дополнительной тепловой энергии в количестве около 0,7 млн. Гкал в год. В данной работе внимание сосредоточено на потенциале тепловых ВЭР, относящихся по имеющейся классификации к низкопотенциальным по степени концентрации энергии [8], которые также включают теплоту отходящих газов от промышленных предприятий незначительной энергетической мощности, в частности, пищевых. К способам использования низкопотенциальных ВЭР на предприятиях относят предварительный подогрев воздуха в системах вентиляции, воды для горячего водоснабжения и автономных систем отопления, подогрева воздуха в помещениях различного назначения. Для решения вопроса утилизации низкопотенциальной теплоты особый интерес представляют теплоутилизационные установки, обеспечивающие непосредственный теплообмен газа (воздуха) с частицами, о чем свидетельствуют работы [9-11] и ряда других авторов. Рекуперативные теплообменники с плотным слоем дисперсных (гранулированных) материалов характеризуются высокой тепловой эффективностью, компактностью, небольшой массой, простотой конструкции, надежностью [12-14]. Использование гранулированных материалов в теплоэнергетике позволяет интенсифицировать процессы тепло- и массообмена [15-17]. Однако целесообразность утилизации низкопотенциальной теплоты не всегда оправдана, что связано, в основном, с недостатком разработанных эффективных теплоутилизаторов и

сведений по рациональным тепловым режимам работы. Факторами, усложняющими использование ВЭР, также являются изменчивость их в качестве источника энергии и расхождение режимов работы установок, производящих ВЭР, с режимами спроса на тепловую энергию. В связи с этим в схемах использования ВЭР должны найти широкое применение аккумуляторы теплоты. В этом отношении применение теплоутилизаторов с неподвижным плотным слоем гранулированных материалов представляется перспективным, однако имеющиеся сложности проведения инженерных расчетов подобных аппаратов сдерживают предложения по их использованию в производствах, поскольку их тепловые мощности и рабочие параметры существенно отличаются. Разработка методики теплового конструкторского расчета способствует решению этого вопроса, ее использование позволит определить основные теплофизические параметры процесса и геометрические характеристики теплоутилизатора.

## Цель работы

Целью работы является разработка методики расчета теплообменника для утилизации низкопотенциальных тепловых потоков от промышленных предприятий.

## Изложение основного материала

Регенеративные теплообменники с неподвижной насадкой работают в периодическом нестационарном режиме. Теплообменная поверхность (насадка) попеременно продувается то греющей, то охлаждающей газовой средой. Время, на протяжении которого насадка омывается греющей средой, называется периодом нагрева ( $\tau_1$ ); время, на протяжении которого нагретая насадка охлаждается, называется периодом охлаждения ( $\tau_2$ ). В каждом периоде температуры теплоносителей и насадки изменяются во времени. В связи с тем, что в регенераторах температуры изменяются не только в пространстве, но и во времени, при создании методов расчетов таких аппаратов возникают определенные трудности. Для инженерных расчетов предлагаются приближенные методы. Расчеты ведут по средним за период характеристикам, а тепловой поток относят не к единице времени, а к периоду.

Целью расчетов теплоутилизатора, который представляет собой регенератор с неподвижной насадкой, является определение необходимой поверхности теплообмена, массы и габаритных размеров для выбранного типа насадки. Тепловой



конструкторский расчет регенератора основывается на общих уравнениях (теплового баланса и теплопередачи), при учете специфики нестационарной работы регенератора. Разработанная методика отличается тем, что учитывается изменение коэффициента межкомпонентного теплообмена во времени [18]. Это позволяет получить более точные данные по значению площади теплообменной поверхности, соответственно, объема теплообменного аппарата с гранулированной насадкой.

Рабочий участок регенератора представляет собой цилиндрический канал, заполненный гранулированным материалом, через который пропускается поток газа из вытяжных устройств. Проходя слой материала, частицы нагреваются. Окончание периода нагрева материала определяется согласно данным экспериментов [19], показавшим, что оптимальным условием работы теплоаккумулятора на основе аппаратов с плотным неподвижным слоем является ограничение продолжительности периода нагрева конечной температурой, которая должна составлять 80% от значения температуры газа на входе. Дальнейший нагрев материала в аппарате сопровождается существенным снижением его эффективности.

Расчет ведется методом последовательных приближений и включает следующие пункты.

I. Следует задать:

Коэффициент межкомпонентного теплообмена  $\alpha_M$ , Вт/м<sup>2</sup>К; расход газа  $G_T$ , кг/с; начальную температуру газа  $t_T^0$ , °C; температуру гранулированного материала на входе  $t_M'$ , °C; конечную температуру газа в конце периода нагрева,  $t_{T,max}''=0,85 t_T'$ , °C; конечную температуру материала в конце периода нагрева,  $t_{M,max}''=0,8 \cdot t_T'$ , °C.

II. Выбрать:

Гранулированный материал, характерный размер частиц  $d_e$ , м; форму канала – цилиндрический горизонтальный;

III. Выполнить расчет по следующему алгоритму:

1. Определить согласно п. I температуру газа на выходе и температуру материала в конце периода нагрева, рассчитать средние значения температур газового и твердого компонентов:

$$\bar{t}_T = \frac{t_T' + \bar{t}_T''}{2}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\bar{t}_M = \frac{t_M' + t_{M,max}''}{2}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

2. По значению  $\bar{t}_T$ , °C определить теплофизические свойства газовой среды:  $\nu_T$ ;  $c_p$ ;  $\lambda_T$ ;  $\rho_T$ ;  $Pr_T$

3. Скорость фильтрации газовой среды:

$$w_\phi = \frac{G_T}{\rho_T \cdot S}, \text{ м/с} \quad (3)$$

4. Число Рейнольдса:

$$Re_T = \frac{w_\phi \cdot d_e}{\nu_T} \quad (4)$$

5. Теплота, переданная от воздуха к материалу:

$$Q = G_T \cdot c_p \cdot \left( t_T' - \frac{t_M^0 + t_{T,max}''}{2} \right), \text{ Вт} \quad (5)$$

где  $t_M^0$  – температура материала в начале периода нагрева.

6. Из зависимости  $Q = \bar{\alpha}_M \cdot F_M \cdot \Delta \bar{t}_T$  определить площадь поверхности гранулированного материала  $F_M$ . В первом приближении  $\bar{\alpha}_M$  принимаем заданным соответственно п. I:

$$F_M = \frac{Q}{\bar{\alpha}_M \cdot (\bar{t}_T - \bar{t}_M'')} \text{ м}^2 \quad (6)$$

$$\Delta \bar{t}_T = \frac{\Delta t_\delta - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_\delta}{\Delta t_M}} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7)$$

7. Определить массу загрузки материала по следующему алгоритму ( $n$  – количество частиц в аппарате):

$$F_M = 4\pi \cdot \left( \frac{d_e}{2} \right)^2 \cdot n \Rightarrow n = \frac{F_M \cdot \phi_M}{4\pi \cdot \left( \frac{d_e}{2} \right)^2} \quad (8)$$

$$m_M = V \cdot \rho_M \cdot n = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{d_e}{2} \right)^3 \cdot \rho_M \cdot n \quad (9)$$

8. Продолжительность нагрева:

$$\tau = \frac{m_M \cdot c_p \cdot (\bar{t}_M'' - t_M')}{Q}, \text{ с} \quad (10)$$

9. Рассчитать конечное значение  $\bar{\alpha}_M^K$  по эмпирическому уравнению [19] в безразмерном виде с учетом сигмоидального характера изменения коэффициента межкомпонентного теплообмена по времени.

$$Nu = \left[ \frac{-5,04}{1+10} \frac{1}{-1,63 \left( \frac{0,23 - G_T \cdot c_p \cdot \tau}{m \cdot c_p} \right)} + \frac{5,14}{1+10} \frac{1}{-1,32 \left( \frac{1,47 - G_T \cdot c_p \cdot \tau}{m \cdot c_p} \right)} + 0,44 \right] \cdot Re^{0,8} Pr^{0,43} \quad (11)$$

Для рассчитанного времени нагрева  $\tau$  находим  $\alpha_M$ , а дальше –  $\bar{\alpha}_M$ , Вт/м<sup>2</sup>К (как средневзвешенную

величину). Определяем отклонение заданного в п. I значения  $\alpha_m$  от рассчитанного.

10. Если сопоставление  $\bar{\alpha}_m$  с заданным показывает большое расхождение, следует перезадавать значением  $\alpha_m$  и провести расчет во втором приближении, начиная с п. 6.

11. При удовлетворительном согласовании расчет считать законченным. Как результат, получено значения  $F_M$ , м<sup>2</sup>;  $Q$ , Вт;  $m_M$ , кг;  $\tau$ , с.

12. Объем аппарата:

$$V = \frac{F_M}{a_{уд}}, \text{ м}^3 \quad (12)$$

где  $\phi_m$  - поправка на форму частиц;

$$a_{уд} = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_e}, \text{ м}^2/\text{м}^3 - \text{удельная поверхность частиц.}$$

Задавая диаметр канала  $D$ , найти высоту теплоутилизатора  $H$ :

$$H = V/S, \text{ м.} \quad (13)$$

По рекомендованной методике в качестве примера рассчитаны основные характеристики теплоутилизатора промышленного назначения с неподвижной насадкой. Теплообменный участок представляет собой цилиндрический канал, заполненный слоем керамзита, через который продувается поток газа из вытяжных устройств. Расход газа составляет  $G_r=0,11$  м<sup>3</sup>/с, температура газа на выходе из вытяжных устройств  $t'_r=80$  °С, на выходе из регенератора для периода нагрева  $t''_r=68$  °С. Начальная температура керамзита:  $t'_m=20$  °С, конечная температура материала в конце периода нагрева  $t''_m=64$  °С. Гранулированная насадка состоит из плотного слоя керамзита, эквивалентный диаметр частиц  $d_e=0,019$  м. В результате получены следующие характеристики аппарата: площадь поверхности частиц в аппарате  $F_M=8$  м<sup>2</sup>, передаваемый тепловой поток  $Q=4068$  Вт; масса гранулированного материала  $m_M=24,2$  кг; длительность периода нагрева  $\tau=224$  с, высота теплоутилизатора  $H=1,5$  м, эффективность аппарата  $\varepsilon=0,6$ . Значение эффективности  $\varepsilon=0,6$  для существующих теплообменников является хорошим показателем. Достоинством теплоутилизатора с неподвижной насадкой является отсутствие необходимости в организации движения слоя гранулированного материала, что существенно упрощает эксплуатацию и конструкцию теплообменника.

По предлагаемой методике был проведен расчет теплоутилизатора с неподвижным слоем, предназначенный для обогрева помещения,

расположенного непосредственно рядом с вентиляционными каналами предприятия, при указанных выше исходных данных по температурам. Особенностью данного теплоутилизатора является то, что в периоде нагрева передача теплоты осуществляется при непосредственном контакте газового потока с частицами материала, а в периоде охлаждения теплота передается от поверхности теплоутилизатора в окружающую среду. Расход газа через вытяжной канал составляет 400 м<sup>3</sup>/ч. Теплообменный участок теплоутилизатора представляет собой трубу диаметром 0,2 м и длиной 1 м. В результате получены следующие характеристики теплоутилизатора. Масса керамзитовой насадки:  $m=15$  кг. Время нагрева в теплоутилизаторе составляет 3 мин., время охлаждения - 30 мин.

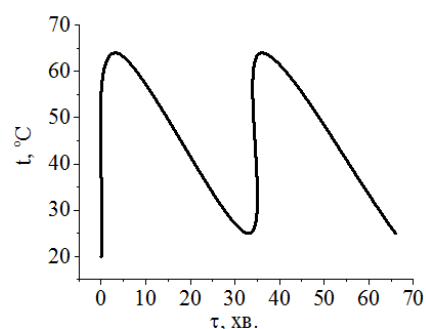


Рис. 1 – Циклограмма работы теплоутилизатора с плотным слоем керамзитовой насадки

Для обеспечения необходимого расхода воздуха 400 м<sup>3</sup>/ч при аэродинамическом сопротивлении слоя  $\Delta p=7,2 \cdot 10^3$  Па предлагается установить вентилятор высокого давления ВЦ 10-28, мощностью 0,12 кВт.

Для получения сглаженной характеристики нагрева помещения целесообразно теплоутилизатор выполнять из двух наполненных керамзитом труб и включать их поочередно.

### Обсуждение результатов

Существующие теплоутилизаторы регенеративного типа в основном разработаны для утилизации теплоты котельных и производств со средним уровнем тепловых выбросов. Их тепловой КПД изменяется от 79 % до 38 %, причем в среднем КПД составляет 55 %. Теплоутилизатор с движущимся плотным слоем керамзита, предназначенный для подогрева воздуха, характеризуется КПД на уровне 75 % [19]. Теплоутилизатор с неподвижным слоем гранулированного материала, рассчитанный для подогрева помещения, имеет КПД 60 %, тем не менее для его функционирования не существует необходимости в механизмах для организации движения насадки. Следует отметить, что повышение температурного уровня работы теплоутилизатора с

плотным слоем гранулированного материала значительно повышает КПД. Таким образом, рассчитанные теплоутилизаторы отличаются сравнительно высоким КПД для теплоутилизаторов с неподвижной насадкой и возможностью работы без прямого контакта частиц насадки с воздухом обогреваемого помещения. Рассчитанные на низкопотенциальную теплоту конструкции теплоутилизаторов предлагаются для использования на предприятиях пищевых производств.

### Выводы

Методика теплового расчета теплоутилизатора с неподвижной гранулированной насадкой, предназначенного для утилизации низкопотенциальной теплоты отходящих газов, позволяет оценить основные геометрические характеристики аппарата, его эффективность и продолжительность периода нагрева. Для теплоутилизаторов с неподвижной насадкой существует возможность работы без прямого контакта частиц насадки с окружающим воздухом в периоде охлаждения. Предлагаемые теплоутилизаторы рассчитаны на низкопотенциальную теплоту. Для получения сглаженной характеристики нагрева помещения целесообразно теплоутилизатор выполнять из двух наполненных керамзитом труб и включать их поочередно.

### Список литературы

1. **Ефимов, А. В.** Система глубокой утилизации теплоты газов, уходящих из котельных агрегатов / **А. В. Ефимов, А. Л. Гончаренко, Л. В. Гончаренко** // *Вісник НТУ «ХПІ». Енергетичні та теплотехнічні процеси та устаткування*. – 2013. – Т. 13, № 987. – С. 73-80.
2. **Долінський, А. А.** Основні положення концепції національної стратегії теплозабезпечення населених пунктів України / **А. А. Долінський, Б. І. Басок, Є. Т. Базеев, Г. П. Кучин** // *Промышленная теплотехника*. 2009. – Т. 31, №4. – С. 68-77.
3. **Фиалко, Н. М.** Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок различного типа / **Н. М. Фиалко, Ю. В. Шеренковский, А. И. Степанова, Р. А. Навродская, П. К. Голубинский, М. А. Новаковский** // *Промышленная теплотехника*. – 2008. – Т. 30, №3. – С. 68-76.
4. Закон України «Про енергозбереження» від 01.07.1994 р. № 74/94-ВР. Відомості Верховної Ради України. 1994 р. № 30. Ст. 283.
5. **Ammar, Y.** Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK / **Y. Ammar, S. Joyce, R. Norman, Y. Wang, A. P. Roskilly** // *Applied Energy*. – 2012. – Vol. 89, № 1. – P. 3-20. –doi: 10.1016/j.apenergy.2011.06.003.
6. **Долинский, А. А.** Состояние и перспективы использования вторичных энергоресурсов в энергетическом хозяйстве Украины / **А. А. Долинский, Н. М. Фиалко, Р. А. Навродская, Н. В. Гнедой** // *Промышленная теплотехника*. – 2012. – Т. 34, №4. – С.

- 94-103.
7. **Арнов, Р. И.** Состав и структура топливно-энергетических ресурсов промышленного предприятия / **Р. И. Арнов**. – Москва: Информ, 2007. – 215 с.
8. **Поспелова, Т. Г.** Основы энергосбережения / **Т. Г. Поспелова**. – Минск, 2000. – 350 с.
9. **Bohuslav, K.** Preliminary Design and Analysis of regenerative heat exchanger / **K. Bohuslav, Zdeněk J.** // *Chemical engineering transactions*. – 2016. – Vol. 52. – P. 655-660. – doi: 10.3303/cet1652110.
10. **Snider, D. M.** Three fundamental granular flow experiments and CPFD predictions / **D. M. Snider, M. S. Dale** // *Power Technology*. – 2007. – Vol. 176. – P. 36-46. – doi: 10.1016/j.powtec.2007.01.032.
11. **Chandratilleke, T. T.** Thermal performance and optimisation of a granular-bed heat recuperator / **T. T. Chandratilleke, N. Nadim, K. Batsioudis** // *Fluid Mechanics and Thermodynamics: Material of 12th International Conference on Heat Transfer. (Costa de Sol, Spain)*. Costa de Sol. – 2016. – P. 183-187. – doi: 10.1615/ichmt.2008.cht.930.
12. **Alizadeh, M.** Development of Free Cooling Based Ventilation Technology for Building: Energy Storage Unit, Performance Enhancement Techniques and Design Considerations-A review / **M. Alizadeh, S. M. Sadrameli** // *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 58. – P. 619-645. – doi: 10.1016/j.rser.2015.12.168.
13. **Горбис, З. Р.** Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями / **З. Р. Горбис, В. А. Календерьян**. Москва: Энергия, 1975. – 296 с.
14. **Sadrameli, S. M.** Mathematical modeling and simulation of thermal regenerators including solid radial conduction effects / **S. M. Sadrameli, H. R. V. Ajdari** // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Vol. 76. – P. 441-446. – doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.11.035.
15. **Ferreira, L. M.** An analytical and experimental study of heat transfer in fixed bed / **L. M. Ferreira, J. A. M. Castro, A. E. Rodrigues** // *International Journal of Heat and Mass transfer*. – 2002. – Vol. 45. – P. 95-196. – doi: 10.1016/S0017-9310(01)00209-5.
16. **Adeyanju, A. A.** Theoretical and Experimental Investigation of Heat Transfer in Packed Beds / **A. A. Adeyanju, K. Manohar** // *Research Journal of Applied Sciences*. – 2009. – Vol. 4., №5. – P. 166-177. – doi: 10.1016/j.enconman.2012.07.025.
17. **Nie, X. D.** Heat transfer between gas-solid phases within packed particle beds / **X. D. Nie, R. W. Besant, R. W. Eviitts** // *Particulate science and technology: an international journal*. – 2010. – Vol. 29, №2. – P. 151-162. – doi: 10.1080/02726351.2010.536302.
18. **Бошкова, И. Л.** Разработка теплообменника с неподвижной гранулированной насадкой для утилизации низкопотенциальной теплоты / **И. Л. Бошкова, А. В. Солодка, Н. В. Волгушева** // *Холодильна техніка і технологія*. – 2018. – Т. 54 (1). – С. 11-15.
19. **Солодка, А. В.** Інтенсифікація теплообміну в теплоутилизаторах з гранульованою насадкою. Автореф. дис. ...к.т.н. зі спеціальності 05.14.06 Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – ОНАХТ, Одеса. – 2017. – 24 с.

### References (transliterated)

1. **Efimov, A. V., Goncharenko, A. L., Goncharenko, L. V.** Sistema glibokoy utilizatsii teploty gazov, uhodyaschih iz

- kotelnyih agregatov [A system for the deep utilization of the heat of gases leaving boiler units]. *Visnyk NTU «KhPI». Energetychni ta teplotexnichni procesy ta ustatkuvannya [Bulletin of the NTU "KhPI". Energy and heat engineering processes and equipment]*, 2013, **13**(987), 73-80.
2. **Dolins'kyj, A. A., Basok B. I., Bazeev Ye. T., Kuchy`n G. P.** Osnovni polozhennya koncepciyi nacional'noyi strategiyi teplozabezpechennya naseleny`x punktiv Ukrainy` [Main provisions of the concept of the national heat supplying policy of settlements of Ukraine]. *Promyishlennaya teplotehnika. [Industrial heat engineering]*, 2009, **31**(4), 68-77.
  3. **Fialko, N. M., Sherenkovsky`j, Yu. V., Stepanova, A. Y., Navrods'kaya, R. A., Goluby`nsky`j, P. K., Novakovsky`j, M. A.** Effektivnost sistem utilizatsii teploty othodyaschih gazov energeticheskikh ustanovok razlichnogo tipa [Efficiency of systems for utilization of heat from waste gases of power plants of various types]. *Promyishlennaya teplotehnika. [Industrial heat engineering]*, 2008, **30**(3), 68-76.
  4. Zakon Ukrainy` «Pro energozberezheniya» vid 01.07.1994 r. № 74/94-VR. Vidomosti Verhovnoyi Rady` Ukrainy 1994, № 30. St. 283. [Law of Ukraine "On Energy Saving" of 07.07.1994 № 74/94-BP. Information from the Verkhovna Rada of Ukraine, 1994, No. 30, Art. 283].
  5. **Ammar, Y., Joyce, S., Norman, R., Wang, Y., Roskilly, A. P.** Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK. *Applied Energy*, 2012, **89**(1), 3-20, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.06.003.
  6. **Dolinskiy, A. A., Fy`alko, N. M., Navrods'kaya, R. A., Gnedoj, N. V.** Costoyanie i perspektivy ispolzovaniya vtorichnyih energoresursov v energeticheskom hozyaystve Ukrainy [State and prospects of using secondary energy resources in the energy sector of Ukraine]. *Promyishlennaya teplotehnika. [Industrial heat engineering]*, 2012, **34**(4), 94-103.
  7. **Arnov, R. I.** Sostav i struktura toplivno-energeticheskikh resursov promyishlennogo predpriyatiya. [The composition and structure of the fuel and energy resources of an industrial enterprise]. *Moskva: Inform. [Moscow: Inform]*, 2007, 215.
  8. **Pospelova, T. G.** Osnovy energosberezheniya. [Basics of energy saving]. Minsk, 2000, 350.
  9. **Bohuslav, K., Zdeněk, J.** Preliminary Design and Analysis of regenerative heat exchanger. *Chemical engineering transactions*, 2016, **52**, 655-660, doi: 10.3303/cet1652110.
  10. **Snider, D. M., Dale, M. S.** Three fundamental granular flow experiments and CPFD predictions. *Power Technology*, 2007, **176**, 36-46, doi: 10.1016/j.powtec.2007.01.032.
  11. **Chandratilleke, T. T., Nadim, N., Batsioudis, K.** Thermal performance and optimisation of a granular-bed heat recuperator. *Fluid Mechanics and Thermodynamics: Material of 12th International Conference on Heat Transfer. (Costa de Sol, Spain). Costa de Sol*, 2016, 183-187, doi: 10.1615/ichmt.2008.cht.930.
  12. **Alizadeh, M., Sadrameli, S. M.** Development of Free Cooling Based Ventilation Technology for Building: Energy Storage Unit, Performance Enhancement Techniques and Design Considerations-A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, **58**, 619-645, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.168.
  13. **Gorbis, Z. R., Kalenderyan, V. A.** Teploobmenniki s protochnymi dispersnyimi teplonositelyami [Heat exchangers with dispersed flow coolants]. Moskva: Energiya, 1975, 296 p.
  14. **Sadrameli, S. M., Ajdari, H. R. B.** Mathematical modeling and simulation of thermal regenerators including solid radial conduction effects. *Applied Thermal Engineering*, 2015, **76**, 441-446, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.11.035.
  15. **Ferreira, L. M., Castro, J. A. M., Rodrigues, A. E.** An analytical and experimental study of heat transfer in fixed bed. *International Journal of Heat and Mass transfer*, 2002, **45**, 95-196, doi: 10.1016/S0017-9310(01)00209-5.
  16. **Adeyanju, A. A., Manohar, K.** Theoretical and Experimental Investigation of Heat Transfer in Packed Beds. *Research Journal of Applied Sciences*, 2009, **4**(5), 166-177, doi: 10.1016/j.enconman.2012.07.025.
  17. **Nie, X. D., Besant, R. W., Evitts, R. W.** Heat transfer between gas-solid phases within packed particle beds. *Particulate science and technology: an international journal*. 2010, **29**(2), 151-162, doi: 10.1080/02726351.2010.536302.
  18. **Boshkova, I. L., Solodkaya, A. V., Volgusheva, N. V.** Razrabotka teploobmennika s nepodvizhnoy granulirovannoy nasadkoy dlya utilizatsii nizkopotentsialnoy teploty [Development of a heat exchanger with a fixed granular nozzle for the utilization of low-grade heat]. *Xolody`na texnika i texnologiya. [Refrigeration technology and technology]*. 2018, **54**(1), 11-15.
  19. **Solodka, A. V.** Intensy`fikatsiya teploobminu v teplouty`ly`zatorax z granul`ovanoju nasadkoyu. [Intensification of heat exchange in heat-recovery tanks with granular nozzle] Avtoref. dy`s. ... k.t.n. zi special`nosti 05.14.06 Texnichna teplofizy`ka ta promy`slova teploenergety`ka. [Thesis for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.14.06 Technical thermophysics and industrial thermal power engineering]. ONAChT, Odessa, 2017, 24.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Бошкова Ирина Леонидовна** – доктор технических наук, профессор, Одесская национальная академия пищевых технологий, профессор кафедры теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей, г. Одесса, Украина; e-mail: boshkova.irina@gmail.com.

**Irina Boshkova** – Doctor of technical sciences, Professor, Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transportation department, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine; e-mail: boshkova.irina@gmail.com.

**Волгушева Наталья Викторовна** – кандидат технических наук, Одесская национальная академия пищевых технологий, доцент кафедры теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей, г. Одесса, Украина; e-mail: natvolgusheva@gmail.com.

**Natalya Volgusheva** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transportation department, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine, e-mail: natvolgusheva@gmail.com.

**Солодка Антонина Васильевна** – кандидат технических наук, Одесская национальная академия пищевых технологий, ассистент кафедры теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей, г. Одесса, Украина; e-mail: solodkaya140619@gmail.com.

**Antonina Solodka** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Assistant, Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transportation department, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine; e-mail: solodkaya140619@gmail.com.

**Бошков Леонід Зиновьевич** – кандидат технічних наук, доцент, Одеська національна академія пищевих технологій, доцент кафедри термодинамики і возобновляємої енергетики, г. Одеса, Україна; e-mail: leonidboshkov@i.ua.

**Leonid Boshkov** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Thermodynamics and Renewable Energy department, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine; e-mail: leonidboshkov@i.ua.

*Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Бошкова, И. Л.** Методика теплового расчета теплоутилизатора с плотным слоем гранулированного материала / **И. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева, А. И. Солодкая, Л. З. Бошков** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 3-9. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.01.

*Please cite this article as:*

**Boshkova, I., Volgusheva, N., Solodka, A., Boshkov, L.** Method of thermal calculation of a heat exchanger with a dense layer of granulated material. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), 3-9, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.01

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Бошкова, І. Л.** Методика теплового розрахунку теплоутилизатора з щільним шаром гранульованого матеріалу / **І. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева, А. В. Солодка, Л. З. Бошков** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 3-9. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.01.

**АНОТАЦІЯ** Розглядається можливість використання низькопотенційних теплових вторинних енергоресурсів у вигляді газів, що відходять від промислових підприємств незначною енергетичної потужності, зокрема, харчових. Аналізуються теплоутилизатори з нерухомим щільним шаром гранульованих матеріалів, що забезпечують безпосередній теплообмін газу (повітря) з частками. Вказується на недостатню кількість ефективних розробок теплоутилизаторів низькопотенційної теплоти і відомостей по раціональним тепловим режимам їх роботи. Відзначається ефективність застосування гранульованих матеріалів у теплоенергетиці з позиції інтенсифікації процесів перенесення теплоти і маси. Описана методика теплового розрахунку контактного теплоутилизатора для визначення його геометричних характеристик і основних параметрів процесу. Запропонована методика враховує зміну коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну в часі. Наведено результати розрахунків основних характеристик теплоутилизатора промислового призначення з нерухомою насадкою. В теплоутилизаторі з нерухомою насадкою не виникає необхідності в організації руху шару гранульованого матеріалу, що істотно спрощує експлуатацію і конструкцію теплообмінника. Представлені результати розрахунку теплоутилизатора з нерухомим шаром, призначеного для обігріву приміщення, розташованого безпосередньо поруч з вентиляційними каналами підприємства. У запропонованому теплоутилизаторі в періоді нагріву передача теплоти здійснюється при безпосередньому контакті газового потоку з частинками матеріалу, а в періоді охолодження теплота передається від зовнішньої поверхні теплоутилизатора в навколишнє середовище. Для отримання згладженої характеристики нагріву приміщення доцільно дублювати наповнені гранульованим матеріалом робочі канали теплоутилизатора і включати їх по черзі. Розрахований теплоутилизатор відрізняється порівняно високим значенням коефіцієнта корисної дії і можливістю роботи без прямого контакту частинок насадки з повітрям, що обігривається. Розраховані на низькопотенційну теплоту конструкції теплоутилизаторів пропонуються для використання на підприємствах харчових виробництв.

**Ключові слова:** утилізація; низькопотенційна теплота; ефективність; коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну; нерухомий шар; керамзит

*Поступила (received) 10.02.2019*

УДК 621.763-233.3

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.02

## МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РОЗ'ЄМНОГО З'ЄДНАННЯ В ДЕТАЛЯХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ СЕА

А. Ю. ДОВГОПОЛОВ<sup>1\*</sup>, С. С. НЕКРАСОВ<sup>1</sup>, Д. О. ЖИГИЛІЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> кафедра технології машинобудування, верстатів та інструментів, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра загальної механіки та динаміки машин, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА

\*e-mail: d\_a\_y\_@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** З метою дослідження міцності запропонованого роз'ємного з'єднання з круглою різьбою для деталей, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, було проведено моделювання напружено-деформованого стану з використанням системи скінченно-елементного аналізу LS-DYNA. Моделювання напружено-деформованого стану відбувалося для різьбового з'єднання з круглою різьбою, основними параметрами, що впливають на працездатність, якого вважаються  $p$  – крок різьби ( $p = 4$  мм), і  $t$  – глибина профілю різьби ( $t = 1$  мм) (профіль зображено на рис. 2) згідно з ISO 10208 та DIN 20317. Основні параметри різьби, що брали для моделювання, були наближені до параметрів, які має метрична різьба М6 (ГОСТ 24705-81). Гайка з армованих композиційних матеріалів із круглою внутрішньою різьбою та металева вставка із зовнішньою різьбою для проведення моделювання були виконані у вигляді 3D-CAD-моделей у графічному редакторі SOLIDWORKS, для скорочення часу розрахунків із з'єднання був вирізаний окремих сегмент. Створення скінченно-елементної сітки також виконане засобами цього графічного редактора, до складу якого входить модуль COSMOSWORKS, що має вбудований генератор даної сітки. Розмір скінченних елементів гайки з армованого композита вибирали виходячи з того, щоб розрахунок займав прийнятний час. Розмір грані скінченного елемента становив від 0,05 до 0,15 мм. Механічні характеристики армованого композиційного матеріалу отримували експериментальним шляхом та вносили до командного файлу LS-DYNA за допомогою двох ключових слів: \*MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE – модель матеріалу тип 22 та \*MAT\_ORTHOTROPIC\_ELASTIC – модель матеріалу тип 10. Поєднання цих ключових слів при створенні моделі анізотропного тіла дозволило в повному обсязі задати всі механічні властивості армованого склопластикового матеріалу для моделювання. Одержані в результаті основні показники міцності виявилися на досить високому рівні – максимальна сила, яку витримало з'єднання, згідно з даними моделювання становила  $F_{max} = 13,76$  кН. Максимальні напруження та деформації згідно з опрацьованими в постпроцесорі LS-PrePost-2.4 даними моделювання варіюються в досить високих межах, що підверджує гіпотезу адекватної роботи роз'ємного різьбового з'єднання з круглою різьбою в деталях, виготовлених з армованих композитів, через відсутність гострих концентраторів напружень та дає підставу для подальшого проведення експериментального дослідження міцності.

**Ключові слова:** армовані композиційні матеріали; роз'ємне різьбове з'єднання; моделювання; міцність; кругла різьба; деформації.

## STRAIN-STRESS STATES SIMULATION OF DETACHABLE JOINT FOR REINFORCED COMPOSITES BY FEM

А. DOVGOPOLOV<sup>1\*</sup>, S. NEKRASOV<sup>1</sup>, D. ZHYHYLIY<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Technology of machine building, machine tools and tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of General mechanics and dynamics of machines, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

**ABSTRACT** The strain-stress state simulation has been made by FEM (finite element method) simulation software LS-DYNA for strength investigation of proposed rope thread detachable joint for reinforced composites. The stress-strain state simulation occurred for the rope thread detachable joint for reinforced composites. Main affecting working efficiency parameters are  $p$  – a screw thread pitch ( $p = 4$  mm), and  $t$  – a thread depth ( $t = 1$  mm, the profile is depicted in Figure 2) according to ISO 10208 and DIN 20317. The main thread parameters for modeling have been approximated to metric thread M6 (GOST 24705-81). The nut made of reinforced composites with inner rope thread and a metal threaded insert for simulation have been presented as the 3D computer-aided engineering models formed in computer program SOLIDWORKS. A separate segment is cut to the calculation time reduce. Also, a finite-element mesh is created by mentioned program: it includes a module of finite-element analysis COSMOSWORKS, which has a built-in finite element mesh generator. The finite element's size of a reinforced composite nut is chosen based on reasonability for calculation time. The edge finite element's size was from 0.05 up to 0.15 mm. The elastic properties of the reinforced composite material have been obtained experimentally and input into the LS-DYNA command file, using the two keywords \*MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE – material model type 22 and \*MAT\_ORTHOTROPIC\_ELASTIC – material model type 10. A combination of these key data in creating an anisotropic rigid body model has allowed to fully fulfill simulation of all fiber reinforced material's mechanical properties during modeling. The resulting main strength properties are appeared to be high enough - the maximum axial force that the compound withstands according to the simulation has been found equal to 13.76 kN. The maximal stresses and strains according to the postprocessor LS-PrePost-2.4 results vary in rather high limits, which underscore

*the hypothesis of rope thread detachable joint's performance adequacy in the reinforced composite parts due to the absence of sharp stress concentrators, and provide the basis for further experimental strength study.*

**Keywords:** reinforced composites; detachable thread joint; simulation; strength; rope thread; strain.

## Вступ

Сьогодні композиційні матеріали широко використовують у технологічно передових галузях виробництва, таких як авіаційна, морська й автомобільна промисловість, для яких знижена вага забезпечує високі динамічні характеристики і низьку витрату палива. Складність структур у зазначених сферах виробництва вимагає великої кількості з'єднань. Здебільшого приєднання деталей виготовлених з армованих композиційних матеріалів (АКМ), реалізують шляхом склеювання або зварювання їх одна з одною для створення нероз'ємного з'єднання. Саме тому більшість досліджень проводять для визначення напружено-деформованого стану класичних нероз'ємних з'єднань деталей з АКМ, таких як болтові, заклепкові, клейові, детально результати деяких із них описані в працях [1-3].

Що ж стосується роз'ємних з'єднань деталей, виготовлених з АКМ то найбільш застосовуваними є різьбові з'єднання, які мають свою специфіку виготовлення та застосування, але сама конструкція цього типу з'єднання являється роз'ємною [4].

Цей тип з'єднання деталей, виготовлених з армованих композитів, реалізується або за допомогою виготовлення різьби на поверхнях з'єднуваних деталей, або за допомогою розміщення в деталях з АКМ металевих кріпильних вставок (рис. 1 а, б), в яких уже виконана різьба, через яку й відбувається подальше з'єднання. Конструкція різьби, якщо вона формують на деталі з армованого композита (її діаметр і профіль), відрізняється від конструкції стандартних типів різьб [5], а це, у свою чергу викликає додаткові труднощі під час її виготовлення. Саме тому більшість конструкцій, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, що передбачають сполучення елементів за допомогою різьби, з'єднуються за допомогою металевих елементів з виконаною в них різьбою, які в подальшому заформовуються в цей матеріал.



Рис. 1 – Реалізація різьбового з'єднання в армованому композиті за допомогою вставки:

- а – металева вставка, розміщена в деталі з АКМ;
- б – фото металевих вставок

Останніми роками була опублікована велика кількість наукових праць присвячених дослідженню

різьбових вставок, заформованих в АКМ, на міцність. Серед яких у роботі L. Adam [6] проведено експериментально-числове дослідження міцності цих вставок, заформованих у різні типи армованих композиційних матеріалів. Із його дослідження одержана залежність між результатами моделювання та експериментальними даними з точки зору кривих навантажень і прогнозування руйнування.

У науковій праці [7] проведено експериментально-числове дослідження різних типів руйнування склопластику в місцях заформовування вставок залежно від типу використовуваної матриці (епоксидної смоли). Аналогічне дослідження було проведене в роботі [8], але в цьому разі використовували композиційний матеріал, армований вуглцевими волокнами.

Що ж стосується дослідження міцності різьбового з'єднання зі спеціальним профілем, в якому різьбова поверхня формують на деталях з АКМ, на сьогоднішні вони залишаються мало дослідженими. У свою чергу, згідно з роботою В. Г. Комарова [9] різьбове з'єднання з різьбою, що має круглий профіль, формований на поверхнях деталей з армованих композитів, повинне мати досить непогані показники міцності. Цей профіль за рахунок конструктивних особливостей, а саме відсутності гострих концентраторів напружень через відповідну форму, якнайкраще підходить для реалізації роз'ємного різьбового з'єднання в деталях із наведених матеріалів.

На основі вищезазначеного твердження було вирішено провести моделювання напружено-деформованого стану роз'ємного різьбового з'єднання з різьбою що має круглий профіль, методом скінченно-елементного аналізу для перевірки гіпотези високих показників міцності цього з'єднання.

## Мета роботи

Моделювання з використанням системи скінченно-елементного аналізу LS-DYNA напружено-деформованого стану роз'ємного різьбового з'єднання з різьбою круглого профілю в деталях виготовлених з армованих композиційних матеріалів.

## Викладення основного матеріалу

Моделювання напружено-деформованого стану методом скінченно-елементного аналізу (СЕА) відбувалося для різьбового з'єднання з круглою різьбою, основними параметрами, що впливають на працездатність, якого вважаються  $p$  – крок різьби, і  $t$  – глибина профілю, (профіль зображено на рис. 2) згідно з ISO 10208 [10] та DIN 20317 [11]. Також на



рисунку 2 показані зовнішній  $D$  і внутрішній  $D_1$  діаметри різьби та  $R_1$  і  $R_2$  – радіуси вершин і западин профілю відповідно.

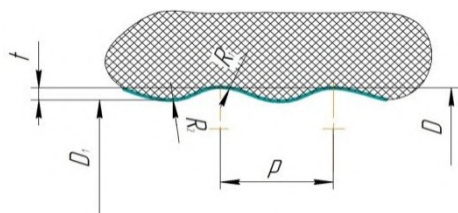


Рис. 2 – Основні параметри круглої внутрішньої різьби

Основні параметри різьби, які брали для моделювання були наближені до параметрів, що має метрична різьба М6 (ГОСТ 24705-81) [12]. Цей вибір зумовлений можливістю подальшого виготовлення зазначеної різьби, з використанням існуючого обладнання й технологічного оснащення, наявного на базі лабораторії кафедри Технології машинобудування верстатів та інструментів Сумського державного університету. Адже в результаті планується одержати практичні показники міцності з'єднання для підтвердження даних моделювання.

Моделювання напружено-деформованого стану в системі скінченно-елементного аналізу LS-DYNA буде наведене для варіанта круглої різьби з параметрами  $p = 4$  мм та  $t = 1$  мм. Гайка з АКМ з круглою внутрішньою різьбою та металева вставка із зовнішньою різьбою для проведення моделювання були виконані у вигляді 3D-CAD-моделей у графічному редакторі SOLIDWORKS, для скорочення часу розрахунків із з'єднання був вирізаний окремий сегмент, з яким і будуть проводитися всі подальші операції (рис. 3). Відповідно до рекомендацій, зазначених у роботі Д. В. Криворучка [13], для отримання достовірних даних моделювання методом скінченно-елементного аналізу між зовнішньою та внутрішньою різьбовими поверхнями з'єднання був заданий гарантований зазор 0,05 мм (рис. 3).

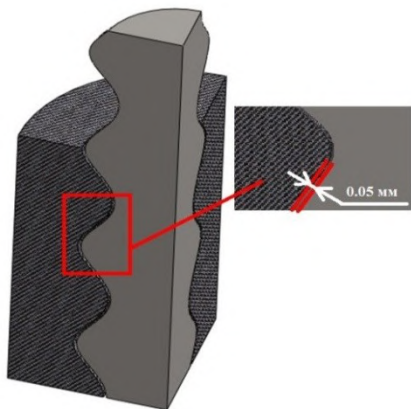


Рис. 3 – 3D-CAD-модель з'єднання в графічному редакторі SOLIDWORKS

Створення скінченно-елементної сітки виконане засобами SOLIDWORKS, до складу якого входить модуль скінченно-елементного аналізу COSMOSWORKS, що має вбудований генератор представленої сітки. У нашому випадку використовували тетраедричні скінченні елементи (СЕ) з 10 вузлами. Розмір скінчених елементів гайки з АКМ вибирали виходячи з того, щоб розрахунок займав прийнятний час. Розмір грані СЕ становив від 0,05 до 0,15 мм. У місцях контакту двох різьбових поверхонь розміри СЕ були зроблені меншими для отримання більш достовірних результатів. Скінченно-елементна сітка металевої вставки була зроблена зі значно більших елементів, оскільки це впливає на час розрахунків, а напруження та деформації в ній будуть значно меншими ніж у деталі з АКМ. На рисунку 4 подана СЕ сітка елементів запропонованого з'єднання.

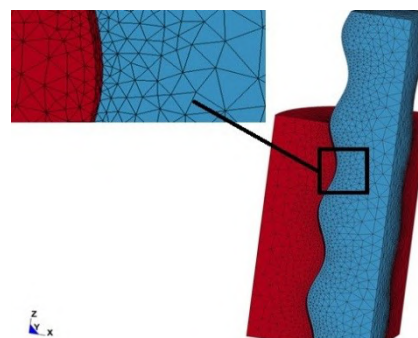


Рис. 4 – Скінченно-елементна сітка складових системи моделювання

У процесі створення скінченно-елементної сітки за допомогою модулю COSMOSWORKS було виявлено, що цей модуль не створює списку елементів моделі для командного файлу LS-DYNA. Було вирішено поставлену проблему таким чином: мовою програмування Python була написана керуюча програма для отримання списку елементів моделі з файлу середовища COSMOSWORKS.

Механічні граничні умови задавали жорстким закріпленням декількох границь гайки з АКМ. У цьому разі гайку жорстко закріплювали по зовнішній діаметральній поверхні (рис. 5). Для вставки задавали обмеження переміщення вздовж осей  $X$  та  $Y$ . Початкові умови для вставки задавали поступальним переміщенням її вздовж осі  $Z$ , механічні навантаження – переміщенням вставки згідно зі схемою закріплення вздовж її осі з відповідною швидкістю.

Під час моделювання всі механічні характеристики армованого композиційного матеріалу (тобто створення моделі матеріалу) задавали як для лінійного пружного ортотропного тіла, отримання всіх фізико-механічних характеристик та їх математичне формулювання описано в роботі С. М. Верещаки [14]. Ці механічні характеристики були отримані шляхом дослідження



зразків з армованого склопластикового матеріалу на розтягування та стискання. Що ж стосується внесення механічних характеристик запропонованої моделі матеріалу до командного файлу LS-DYNA, було використано два ключових слова для опису моделі матеріалу. Це \*MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE – модель матеріалу тип 22, та \*MAT\_ORTHOTROPIC\_ELASTIC – модель матеріалу тип 10. Поєднання цих ключових слів при створенні моделі анізотропного тіла дозволило в повному обсязі задати всі механічні властивості армованого склопластикового матеріалу, для моделювання. У табл. 1 наведено опис моделей матеріалу в командному файлі LS-DYNA.

Таблиця 1 – Опис моделей матеріалу в командному файлі LS-DYNA

*MAT_COMPOSITE_DAMAGE									
MID	RO	E <sub>A</sub>	E <sub>B</sub>	E <sub>C</sub>	PRBA	PRCA	PRCB	G <sub>AB</sub>	-
22	20*E <sup>6</sup>	26,9	26,9	11,4	0,10	0,18	0,18	4,34	-
G <sub>BC</sub>	G <sub>CA</sub>	K <sub>del</sub>	AOPT	MACF	-	-	-	-	-
2,7	2,7	0	2,0	1,0	-	-	-	-	-
X <sub>P</sub>	Y <sub>P</sub>	Z <sub>P</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	-	-	-	-
0	0	0	1,0	0	0	-	-	-	-
V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	BETA	-	-	-
0	0	0	0	1,0	0	0	-	-	-
S <sub>C</sub>	X <sub>T</sub>	Y <sub>T</sub>	Y <sub>C</sub>	ALPH	S <sub>N</sub>	S <sub>VZ</sub>	S <sub>ZX</sub>	-	-
50	200	200	180	0	16	30	30	-	-
*MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC									
MID	RO	E <sub>A</sub>	E <sub>B</sub>	E <sub>C</sub>	PRBA	PRCA	PRCB	G <sub>AB</sub>	-
10	2,0*E <sup>-6</sup>	26,9	26,9	11,4	0,10	0,18	0,18	4,34	-
-	G <sub>BC</sub>	G <sub>CA</sub>	AOPT	G	SIGF	-	-	-	-
-	2,7	2,7	2,0	300	1,0	-	-	-	-
-	X <sub>P</sub>	Y <sub>P</sub>	Z <sub>P</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	MACF	-	-
-	0	0	0	1,0	0	0	1	-	-
-	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	BETA	REF	-
-	0	0	0	0	1,0	0	0	0	-

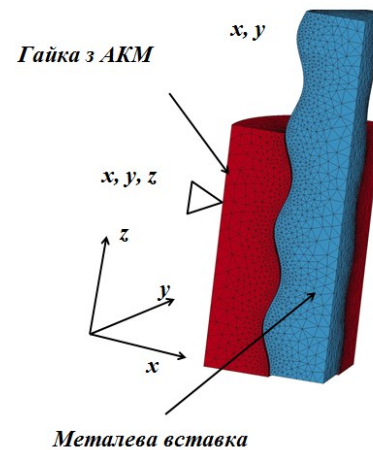


Рис. 5 – Розрахункова схема та граничні умови моделі НДС з'єднання з армованих композиційних матеріалів

Функцію \*HOURLASS використовували для процедури пригнічення безенергетичних форм деформацій елементів, з метою перевизначення значень за замовчуванням.

Що ж до моделі матеріалу вставки із зовнішньою круглою різьбою, то для неї було використано ключове слово \*MAT\_RIGID – модель матеріалу тип 20. Деталі, описані цим матеріалом, вважаються абсолютно твердими тілами.

Форму контакту під час виконання моделювання задавали такою: початковий зсув (тобто зазор та початкове зміщення не враховуються), контакт без поділу (ковзання допускається). Контакт задавали між двома формоутвореними різьбовими поверхнями за допомогою ключового слова \*CONTROL\_CONTACT, тип контакту визначався модулем \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_ID. За допомогою цього алгоритму можна одержати стійке розв'язання контактної задачі, перевагою якого є можливість створення узагальненої залежності  $\mu_a = \mu_a(v, p)$ , де  $p$  – контактний тиск шляхом створення таблиці відповідної функції у карті \*DEFINE\_TABLE і посилання на неї в параметрі FD при FS = 2. Що в нашому випадку й було зроблено.

Модель тертя вважали для моделювання такою: було зазначено, що тертя, яке відбувається між елементами з'єднання, – це кулонівське тертя. Основний параметр, потрібний для моделювання – це коефіцієнт тертя, який визначали експериментально за рахунок визначення кута тертя, в даному разі не враховували різницю між тертям ковзанням і тертям спокою, також немає залежності від швидкості ковзання.

Для кожного з елементів системи моделювання був створений окремий командний файл з описом усіх ключових слів, які задають необхідні параметри. Далі складали об'єкти в цілісну систему. За допомогою ключового слова \*INCLUDE файли об'єктів підключали до єдиного командного файлу. В

наведеному файлі «2.k» є файлом з інформацією про металеву вставку із зовнішньою різьбою, «3.k» є файлом з інформацією про гайку з АКМ із внутрішньою різьбою. В результаті розрахунку ми повинні отримати тензори напружень у гаусових точках скінчених елементів. Достовірні результати можемо одержати лише шляхом знаходження середніх полів напружень за відповідний проміжок часу. Для цього був створений мовою програмування Intel FORTRAN 10.1 спеціальний модуль пост обробки результатів.

Для проведення розрахунків файл із моделями, збережений у форматі «.k», переноситься в систему скінченно-елементного аналізу LS-DYNA. Для цього вибирають відповідний каталог і відповідно сам файл у ньому. Після чого для запуску розрахунку необхідно натиснути кнопку «Run», і система автоматично проводить розрахунки. По їх закінченню, системою в обраній раніше папці автоматично зберігаються файли з результатами, які налаштовані на роботу в постпроцесорі LS-PrePost-2.4.

Для зазначеного на початку розрахунків варіанта з основними параметрами різьби  $p = 4$  мм  $t = 1$  мм маємо такі показники максимальних напружень та деформацій, показані на рисунку 6.

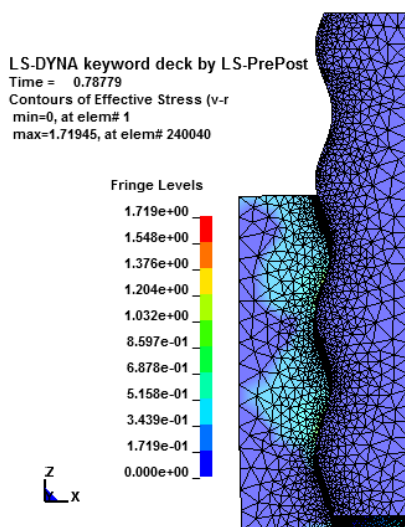


Рис. 6 – Показники максимальних напружень та деформацій у середовищі LS-DYNA

Графічні модулі постпроцесора LS-PrePost-2.4 дозволяють нам побудувати графік залежності результуючої сили від часу, але в цьому разі графік, одержаний за допомогою даних модулів, не є повністю правильним. Оскільки на початковому етапі моделювання була взята для роботи четверта частина з'єднання, для прискорення часу розрахунків, а отже, для повних показників сили потрібно одержати значення збільшити в 4 рази. На рисунку 7 показаний графік залежності результуючої сили від часу, виконаний у табличному процесорі MS-Excel для роботи з електронними таблицями.

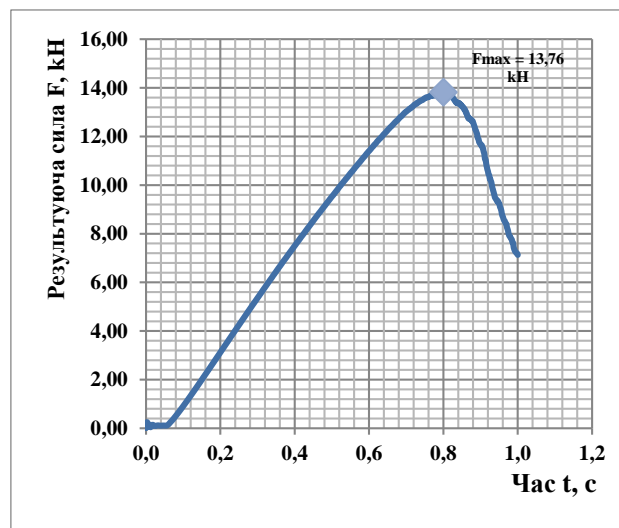


Рис. 7 – Графік залежності результуючої сили від часу

Відповідно до цього графіка ми бачимо, що максимальне значення сили для даного випадку становить  $F_{max} = 13,76$  кН, що підтверджує запропоновану на початку гіпотезу, згідно з якою різьбове з'єднання з різьбою круглого профілю повинно мати високі показники міцності при формоутворенні її на деталях з армованих композиційних матеріалів.

## Висновки

Унаслідок проведеного моделювання напружено-деформованого стану методом скінченно-елементного аналізу в системі LS-DYNA, роз'ємного різьбового з'єднання з круглою різьбою, в деталях, виготовлених з армованих композиційних матеріалів, було отримано основні показники міцності даного з'єднання, що виявилися на досить високому рівні. Згідно з результатами моделювання показник максимальної сили, яку витримує з'єднання становив  $F_{max} = 13,76$  кН. Значення максимальних напружень та деформацій згідно з опрацьованими в постпроцесорі LS-PrePost-2.4 даними варіюються в досить високих межах, що підтверджує зазначену на початку гіпотезу та дає підставу для подальшого проведення експериментального дослідження міцності.

## Список літератури

1. Schürmann, H. Konstruieren mit Faser-Kunststoff Verbunden / H. Schürmann // Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. Ausgabe. – 2007. – № 2. – 672 p. – doi:10.1007/978-3-540-72190-1.
2. Marannano, G. Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints / G. Marannano, B. Zuccarello // Compos. B. Eng. – 2015 – № 71. – P. 28-39. – doi:10.1016/j.compositesb.2014.11.025.

- Rhee, K. Y.** A study on the peel and shear strength of aluminum / CFRP composites surface-treated by plasma and ion assisted reaction method / **K. Y. Rhee, H. A. Yang** // *Compos. Sci. Technol.* – 2003. – № 63 (1). – P. 33-40. –doi: 10.1177/0021998316636458.
- Sen, F.** Effects of Using Different Metal Materials on Stresses in Metal-Composite Hybrid Joints / **F. Sen, A. Kemal** // *Cankaya University Journal of Science and Engineering (CUJSE)*. – 2011. – Vol. 8. – № 1. – P. 1-13.
- Воробей, В. В.** Соединения конструкций из композиционных материалов / **В. В. Воробей, О. С. Сироткин**. – Л.: Машиностроение, 1985. – 168 с.
- Adam, L.** Discrete ply model of circular pull-through test of fasteners in laminates. / **L. Adam, C. Buvet, B. Castanié, A. Daidié, E. Bonhomme** // *Compos. Struct.* – 2012. – № 94(10). – P. 18-32. – doi: 10.1016/j.compstruct.2012.05.008.
- Catalanotti, G.** Experimental and numerical study of fastener pull-through failure in GFRP laminates / **G. Catalanotti, P. P. Camanho, P. Ghys, A. T. Marquez** // *Compos. Struct.* – 2011. – № 94(1). – P. 28-38. –doi: 10.1016/j.compstruct.2011.06.021.
- Elder, D. J.** Fastener pull-through in a carbon fibre epoxy composite joint / **D. J. Elder, A. H. Verdaasdonk, R. S. Thomson** // *Compos. Struct.* – 2008. – № 86. – P. 1-3. –doi: 10.1016/j.compstruct.2008.03.041.
- Комаров Г. В.** Соединения деталей из полимерных материалов / **Г. В. Комаров**. – Санкт-Петербург : Изд-во Профессия, 2006. – 592 с.
- ISO 10208. Rock drilling equipment left-hand rope threads (1991).
- DIN 20317. Rock drilling – Round thread connections for percussive drilling equipment – Dimensions, design (2014).
- ГОСТ 24705–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры.
- Криворучко, Д. В.** Основи 3D-модельювання процесів механічної обробки методом скінчених елементів : навчальний посібник / **Д. В. Криворучко, В. О. Залого, В. Г. Корбач**. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 208 с.
- Верещака, С. М.** Упругие постоянные и обобщенные характеристики жесткости материала слоистой структуры / **С. М. Верещака** // *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып. : Динамика и прочность машин*. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – № 36. – С. 29-40.
- Marannano, G., Zuccarello, B.** Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints. *Compos. B Eng.*, 2015, **71**, 28-39, doi:10.1016/j.compositesb.2014.11.025.
- Rhee, K. Y., Yang, H. A.** A study on the peel and shear strength of aluminum/CFRP composites surface-treated by plasma and ion assisted reaction method. *Compos. Sci Technol.*, 2003, **63**(1), 33-40, doi:10.1177/0021998316636458.
- Sen, F., Kemal A.** Effects of Using Different Metal Materials on Stresses in Metal-Composite Hybrid Joints. *Cankaya University Journal of Science and Engineering (CUJSE)*, 2011, **1**, 1-13.
- Vorobey, V. V. Sirotkin, O. S.** Construction joints in composite materials Mashebuilding, 1985, 168.
- Adam, L., Buvet, C., Castanié, B., Daidié, A., Bonhomme, E.** Discrete ply model of circular pull-through test of fasteners in laminates. *Compos. Struct.*, 2012, **94** (10), 18-32, doi:10.1016/j.compstruct.2012.05.008.
- Catalanotti, G., Camanho, P. P., Ghys, P., Marquez, A. T.** Experimental and numerical study of fastener pull-through failure in GFRP laminates. *Compos. Struct.*, 2011, **94**(1), 28-38, doi:10.1016/j.compstruct.2011.06.021.
- Elder, D. J., Verdaasdonk, A. H., Thomson R. S.** Fastener pull-through in a carbon fibre epoxy composite joint. *Compos. Struct.*, 2008, **86**, 1-3, doi: 10.1016/j.compstruct.2008.03.041.
- Komarov, G. V.** Soyedineniya detaley iz polimernykh materialov. St. Petersburg, 2006, 592.
- ISO 10208. Rock drilling equipment, left-hand rope threads (1991).
- DIN 20317. Rock drilling – Round thread connections for percussive drilling equipment – Dimensions, design (2014).
- GOST 24705–81 Osnovnyie normyi vzaimozamenyaemosti. Rezba metriceskaya. Osnovnyie razmeryi [Basic standards of interchangeability. Metric thread. Main dimensions].
- Krivoruchko, D. V., Zaloga, V. A., Korbach, V. G.** Osnovi 3D-modelyuvannya protsesiv mehanichnoyi obrobki metodom skinchenih elementiv : navchalnyi posibnik [Fundamentals of 3D modeling of machining processes by the finite element method: tutorial], Sumi, Vid-vo SumDU, 2010, 208.
- Vereschaka, S. M.** Uprugie postoyannye i obobshchennye harakteristiki zhestkosti materiala sloistoy strukturyi, *Vestnik Nats. tehn. un-ta "KhPI" : sb. nauch. tr. Temat. vyip. : Dinamika i prochnost mashin [Bulletin of the National tech un "KhPI": Dynamics and strength of machines]*, 2008, **36**, 29-40.

#### Bibliography (transliterated)

- Schürmann, H.** Konstruieren mit Faser-Kunststoff Verbunden. *Springer-Verlag*, **2**, 2007, 672, doi:10.1007/978-3-540-72190-1.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Довгополов Андрій Юрійович** – аспірант, Сумський державний університет, кафедра технології машинобудування, верстатів та інструментів (ТМВІ), м. Суми, Україна; e-mail: d\_a\_y\_@ukr.net

**Andriy Dovgopolo** – postgraduate, Sumy State University, Department of Technology of machine building, machine tools and tools, Sumy, Ukraine; e-mail: d\_a\_y\_@ukr.net.

**Некрасов Сергій Сергійович** – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, доцент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів (ТМВІ), м. Суми, Україна; e-mail: nekrasovss@gmail.com.

**Sergiy Nekrasov** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Department of Technology of machine building, machine tools and tools, Sumy, Ukraine; e-mail: nekrasovss@gmail.com.

**Жигилій Дмитро Олексійович** – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, старший викладач кафедри загальної механіки та динаміки машин (ЗМ і ДМ), м. Суми, Україна; e-mail: zhigiliy.d@gmail.com.

**Dmytro Zhyhlyii** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Department of General Mechanics and Dynamics of Machines, Sumy, Ukraine; e-mail: zhigiliy.d@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

**Довгополов, А. Ю.** Моделирование напряженно-деформированного stanu роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів методом СЕА / **А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов, Д. О. Жигилій** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків : НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 10-16. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.02.

Please cite this article as:

**Dovgoplov, A., Nekrasov, S., Zhyhylii, D.** Strain-stress states simulation of detachable joint for reinforced composites by FEM / *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 10-16, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.02.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Довгополов, А. Ю.** Моделирование напряженно-деформированного состояния разъемного соединения в деталях из армированных композиционных материалов методом КЭА / **А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов, Д. О. Жигилій** // *Вестник НТУ «ХПІ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков : НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 10-16. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.02.

**АННОТАЦІЯ** С целью исследования прочности предложенного разъемного соединения с круглой резьбой для деталей, изготовленных из армированных композиционных материалов, было проведено моделирование напряженно-деформированного состояния с использованием системы конечно-элементного анализа LS-DYNA. Моделирование напряженно-деформированного состояния происходило для резьбового соединения с круглой резьбой, основными параметрами, влияющими на работоспособность которого, считаются  $p$  – шаг резьбы ( $p = 4$  мм) и  $t$  – глубина профиля резьбы ( $t = 1$  мм), (профиль изображен на рис. 2) согласно ISO 10208 и DIN 20317. Основные параметры резьбы, использованные для моделирования, были приближены к параметрам, которые имеет метрическая резьба М6 (ГОСТ 24705-80). Гайка из армированных композиционных материалов с круглой внутренней резьбой и металлическая вставка с наружной резьбой для проведения моделирования были выполнены в виде 3D-CAD-моделей в графическом редакторе SOLIDWORKS, для сокращения времени расчетов с соединения был вырезан отдельный сегмент. Создание конечно-элементной сетки также выполнено средствами данного графического редактора: в состав которого входит модуль COSMOSWORKS, имеющий встроенный генератор данной сетки. Размер конечных элементов гайки с армированного композита выбирали исходя из того, чтобы расчет занимал приемлемое время. Размер грани конечного элемента составил от 0,05 до 0,15 мм. Механические характеристики армированного композиционного материала были получены экспериментальным путем и вносили их в командный файл LS-DYNA с помощью двух ключевых слов: \*MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE – модель материала, тип 22, и \*MAT\_ORTHOTROPIC\_ELASTIC – модель материала, тип 10. Сочетание данных ключевых слов при создании модели анизотропного тела позволило в полном объеме задать все механические свойства армированного стеклопластикового материала для моделирования. Полученные в результате основные показатели прочности оказались на достаточно высоком уровне – максимальная сила, которую выдержало соединение по данным моделирования составила  $F_{max} = 13,76$  кН. Максимальные напряжения и деформации согласно обработанных в постпроцессоре LS-PrePost-2.4 данных моделирования варьируют в достаточно высоких рамках, что подтверждает гипотезу адекватной работы резьбового соединения с круглой резьбой в деталях, изготовленных из армированных композитов за отсутствия острых концентраторов напряжений, и дает основание для дальнейшего проведения экспериментального исследования прочности.

**Ключевые слова:** армированные композиционные материалы; разъемное резьбовое соединение; моделирование; прочность; круглая резьба; деформации.

Надійшла (received) 04.02.2019

УДК 622.834:622.862.3

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.03

## ИССЛЕДОВАНИЕ НА МОДЕЛЯХ УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОД КРОВЛИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

**И. В. ИОРДАНОВ<sup>1</sup>, Ю. И. СИМОНОВА<sup>1\*</sup>, А. В. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, А. В. ПОЛОЖИЙ<sup>1</sup>,  
С. В. ПОДКОПАЕВ<sup>1</sup>, В. Ю. ДОВГАЛЬ<sup>2</sup>, А. В. КОРОЛЬ<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, УКРАИНА

<sup>2</sup>Государственное предприятие «Мирноградуголь», г. Мирноград, УКРАИНА

<sup>3</sup>ПСР «Шахтоуправление «Добропольское» ООО «ДТЭК Добропольеуголь»», г. Доброполье, УКРАИНА

\*e-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua

**АННОТАЦИЯ** Целью работы является изучение устойчивости пород кровли угольного пласта при действии динамических нагрузок. Для достижения поставленной цели были выполнены лабораторные исследования на моделях из эквивалентных материалов, когда кровля угольного пласта была представлена в виде балки с податливой опорой – пружиной постоянной жесткости. В результате выполненных исследований установлено, что при действии динамических нагрузок, т.е. при силовом воздействии падающего груза на балку, ее прогиб достигает максимальных значений не одновременно с окончанием действия внешней силы, а одно после другого, через некоторый промежуток времени. При таком взаимодействии балки с податливой опорой постоянной жесткости, количество энергии, затрачиваемой на сжатие пружины, зависит от продолжительности удара и промежутка времени, между окончанием действия внешней силы и перемещением балки, когда эта величина достигает максимальных значений. Геометрический параметр, отражающий перемещения балки при проявлении динамических нагрузок, когда установлен закон ее движения и определены моменты времени, при которых перемещение достигает максимальных значений, определяет напряженно-деформированное состояние моделируемой системы. При наличии в моделируемой деформируемой системе жестких опорных связей, сама система становится более чувствительной к проявлению ударных нагрузок. Наличие податливых связей в системе, смягчает действие динамических нагрузок, за счет уменьшения жесткости моделируемой системы. Изменение жесткости моделируемой системы зависит не только от изменения изгибной жесткости балки, но и от величины податливости опор. При наличии в моделируемой системе податливых опор, динамическая составляющая в общем прогибе балки, отражает мгновенное сжатие опоры, по отношению к статическому действию нагрузки. Для сохранения целостности пород кровли угольного пласта при действии динамических нагрузок, целесообразно применение податливых опор или закладки выработанного пространства, что позволит уменьшить величину ударной силы падающей породы и свести к минимуму вероятность разрушения боковых пород.

**Ключевые слова:** горное давление; обрушения; очистной забой; динамические нагрузки; податливая опора; закладка выработанного пространства

## RESEARCH ON MODELS OF STABILITY OF ROCKS OF THE ROOF OF COAL STRAY DURING DYNAMIC LOADS

**I. JORDANOV<sup>1</sup>, Y. SIMONOVA<sup>1</sup>, A. PETRENKO<sup>1</sup>, A. POLOZHIIY<sup>1</sup>,  
S. PODKOPAIEV<sup>1</sup>, V. DOVGAL<sup>2</sup>, A. KOROL<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Donetsk National Technical University, Pokrovsk, UKRAINE

<sup>2</sup>State enterprise "Mirnogradugol", Mirnograd, UKRAINE

<sup>3</sup>PSP "Dobropolskoye Mine Administration" DTEK Dobropolyeugol LLC", Dobropolye, UKRAINE

**ABSTRACT** The aim of the work is to study the stability of the roof rocks of the coal seam under the action of dynamic loads. To achieve this goal, laboratory tests were performed on models of equivalent materials, when the roof of the coal seam was presented in the form of a beam with a flexible support-spring of constant rigidity. As a result of the research, conclusions were made. Under the action of dynamic loads, that is, under the force of a falling load on the beam, its deflection reaches maximum values not simultaneously with the termination of the action of an external force after a certain period of time. With this interaction of the beam with a malleable support of constant stiffness, the amount of energy spent on the compression of the spring depends on the duration of the impact and the period of time between the end of the external force and the movement of the beam when this value reaches its maximum values. The geometrical parameter determines the stress-strain state of the simulated system. It reflects the movement of the beam during the manifestation of dynamic loads, when the law of its movement is established and the moments of time at which the movement reaches its maximum values are determined. If there are rigid support links in the simulated deformable system, the system itself becomes more sensitive to the manifestation of shock loads. The presence of malleable bonds in the system mitigates the effect of dynamic loads. This is due to the reduction of its rigidity of the simulated system. The change in the rigidity of the simulated system depends not only on the change in the bending stiffness of the beam, but also on the magnitude of the compliance of the supports. If there are pliable supports in the simulated system, the dynamic component in the total deflection of the beam reflects the instantaneous compression of the support, in relation to the static action of the load. To preserve the integrity of the roof rocks of the

*coal seam under the action of dynamic loads, it is advisable to use malleable supports or bookmarks the goaf. This will reduce the magnitude of the impact force of the falling rock and minimize the likelihood of blockage of lateral rock destruction.*

**Key words:** rock pressure; collapse; highwall mining; dynamic loads; ductile support; laying out the space developed.

### Введение

Опыт работы угольных шахт Донбасса показывает, что с ростом глубины горных работ, в анизотропном углепородном массиве вмещающем выработки, начинает проявляться такой негативный фактор, как расслоение боковых пород, оказывающий существенное влияние на устойчивость боковых пород и приводящий к возможному их обрушению, а так же травматизму горнорабочих. По мере отработки угольного пласта, подработанные и расслоившиеся породы кровли, позади очистного забоя, представляют собой блочный массив, состоящий из балок различной длины, которые одновременно изгибаются, разрушаются и неконтролируемо обрушаются, создавая неблагоприятную геомеханическую обстановку в окрестности поддерживаемых горных выработок. Поэтому, в реальных условиях разработки угольных пластов, при отсутствии для расслоившихся пород кровли эффективного подпора со стороны выработанного пространства, опасность возникновения аварийных ситуаций от обвалов и обрушений возрастает.

Традиционно считается, что проявления горного давления в выработках зависят от совокупного влияния многих горно-геологических факторов, к которым первоначально следует относить напряженное состояние осадочных горных пород и их физико-механические свойства. Наряду с этим, изучение особенностей проявления горного давления в выработках на большой глубине позволило установить, что характер его опасных проявлений определяется не только напряженным состоянием массива осадочных горных пород и их физико-механическими свойствами, но и спецификой формирования последнего, обусловившей неупругое деформирование при объемном сжатии, а также способность деформироваться и разрушаться при разгрузке [1]. Внезапность обрушений расслоившейся толщи, приводящих к завалам горных выработок, является одной из особенностей разработки угольных пластов в условиях больших глубин. Вместе с тем, это обуславливается не только горно-геологическими, но и горно-техническими факторами. К последним следует относить несоответствие применяемых способов управления кровлей в очистном забое и охраны участков подготовительных выработок, конкретным условиям их эксплуатации.

Известно [2,3], что наиболее благоприятно на состоянии боковых пород в углепородном массиве вмещающем выработки, влияет закладка выработанного пространства, когда породы кровли позади очистного забоя поддерживаются закладочным массивом. При применении этого способа, исключаются обрушения пород непосредственной кровли и внезапные посадки

основной кровли, а значит, сводятся к минимуму проявления динамических нагрузок. Согласно [4,5], динамические нагрузки могут частично нейтрализоваться за счет применения именно податливых опор, а так же при наличии упругого основания для рассматриваемого эксплуатируемого сооружения.

Изучение природы и особенностей обрушений, как разновидности негативных проявлений горного давления в угольных шахтах, их влияние на состояние боковых пород и, на основе этого разработка мероприятий, направленных на повышение устойчивости пород кровли, будет способствовать повышению безопасности труда горнорабочих и сохранению горных выработок в эксплуатационном состоянии.

### Цель работы

Целью работы является изучение устойчивости пород кровли угольного пласта при действии динамических нагрузок.

Для достижения поставленной цели были выполнены лабораторные исследования на моделях из эквивалентных материалов, когда кровля угольного пласта была представлена в виде балки с податливой опорой – пружины постоянной жесткости.

Согласно исследованию [6], считается что закладочный массив обладает коэффициентом жесткости – модулем упругости, равным образом, как и пружины, у которых этот коэффициент характеризует величину дополнительной нагрузки, когда при ее действии статическая и динамическая жесткость одинакова. В данной модели, пружина является элементом рассматриваемой деформируемой системы.

### Изложение основного материала

В реальных условиях разработки угольных пластов, при различных способах управления кровлей в лаве и охраны штреков, сохранность горных выработок обеспечивается за счет устойчивости пород непосредственной кровли угольного пласта, как основного грузонесущего элемента подземного сооружения.

Согласно гипотезе балок [7-9], можно предположить, что в очистном забое, кровля угольного пласта деформируется и разрушается подобно балкам. Устойчивость породного обнажения в призабойном пространстве лавы, существенно зависит от степени предварительной трещиноватости пород кровли и величины их прогиба, когда отдельные блоки расслоившейся породной толщи работают как шарниры [8,9].

На рис. 1 породы непосредственной кровли угольного пласта, представлены в виде балки длиной  $L$ , (м), высотой  $h$ , (м), и шириной  $b$  (м), имеющей неподвижные шарнирные опоры (т.А и т.В), расстояние между которыми  $2a$ , (м). Участок балки ВС представляет собой консоль, длина которой  $a$ , (м). На край консоли, в т.С, с некоторой высоты  $H$ , (м), падает груз массой  $m$ , (кг) (рис. 1а).

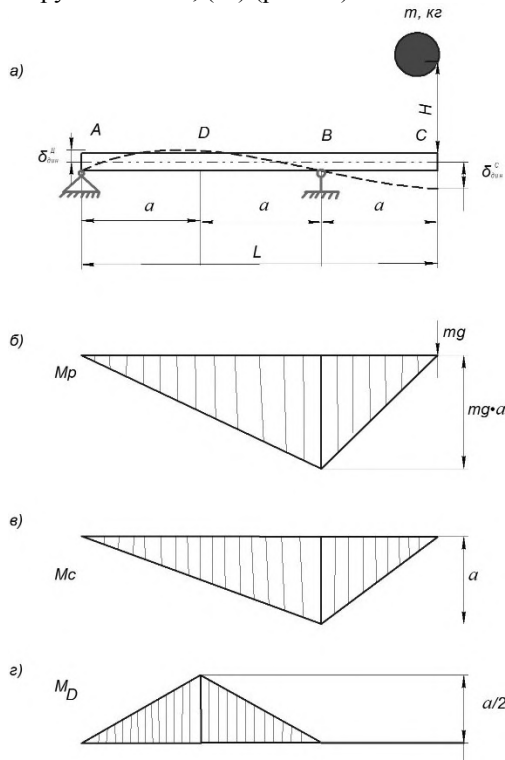


Рис. 1 – Схема к определению динамического прогиба балки в точках D и C с эпюрами изгибающих моментов б, в, г: а) расчетная схема; б) эпюра изгибающих моментов от статически приложенного груза массой  $m$ , (кг); в) эпюра изгибающихся моментов от единичной силы, приложенной в точке удара; г) эпюра изгибающихся моментов от единичной силы, приложенной в точке D

Рассмотрим статическую задачу поперечного изгиба балки. На рис.1 б,в, г изображены эпюры изгибающих моментов от статически приложенного груза массой  $m$ , (кг)-  $M_p$ , (Н·м) (б); единичной силы, приложенной в точке удара-  $M_c$ , (Н·м) (в); единичной силы, приложенной в точке D-  $M_D$ , (Н·м) (г), построенные в соответствии с [10-12].

Для определения статического прогиба балки от действия веса падающего груза, воспользуемся построенными эпюрами (рис. 1 б, в, г), правилом Верещагина [4,10] и определим статический прогиб в т. С

$$\delta_{ст}^C = \frac{M_p \cdot M_c}{E \cdot I} = \frac{mga^3}{EI}, \quad (1)$$

а так же, в середине пролета балки, в т. D

$$\delta_{ст}^D = \frac{M_p \cdot M_D}{E \cdot I} = -\frac{mga^3}{4EI}, \quad (2)$$

где  $I$  - момент инерции поперечного сечения,  $m^4$

$E$  - модуль упругости, МПа;

Из выражения (2) видно, что точка D перемещаются вверх (рис. 1а).

Динамический прогиб в этих точках, соответственно равен

$$\delta_{дин}^{C,D} = \delta_{ст}^{C,D} \cdot k_{дин} \quad (3)$$

где  $k_{дин}$  – динамический коэффициент.

Значение динамического коэффициента определим по выражению, как в [9]

$$k_{дин} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{ст}}}, \quad (4)$$

с учетом изменения высоты падения груза  $H$ , (м).

Из работ [10,13-15], известно что при  $H=0$ , моделируемая система подвержена мгновенному приложению нагрузки. В этом случае, значение динамического коэффициента равно  $k_{дин} = 2$ , а величина деформаций и напряжений в деформируемой системе вдвое больше, чем при статическом нагружении. При  $H>0$ , в результате падения груза на балку, рассматриваемая система может совершать движение. В этом случае значения динамического коэффициента изменяются.

На рис. 2 представлены зависимости, отражающие изменение величины динамического прогиба,  $\delta_{дин}^C$  (м) балки в т. С и динамического коэффициента  $k_{дин}$ , с учетом изменения высоты  $H$ , (м) падения груза. При выполнении расчетов учитывались линейные размеры моделируемой балки : длина  $L=0.6$  м;  $a=0.2$  м,  $h=0.02$  м,  $b=0.04$  м. Модуль упругости  $E=8800$  МПа, масса падающего груза  $m=0.2$  кг.

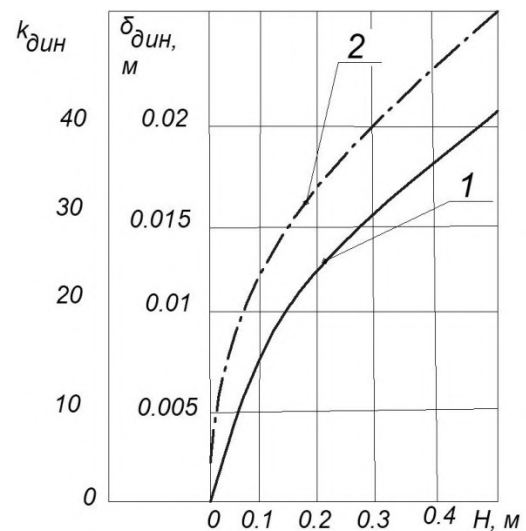


Рис. 2 – Графики изменения величины динамического прогиба  $\delta_{дин}^C$ , (м) балки в т.С и динамического коэффициента  $k_{дин}$ , с учетом высоты  $H$ , (м) падения груза массой  $m$ , (кг): 1-  $\delta_{дин}^C$ , (м), 2-  $k_{дин}$ ;  $m= 0.2$  кг

В результате выполненных расчетов было выполнено сравнение теоретически установленных значений статического и динамического прогиба в



т. С, когда балка имела жесткие опорные связи. Установлено, что при жестких опорных связях, в рассматриваемой моделируемой системе, значение статического прогиба балки, значительно меньше ее динамического прогиба. Из приведенных зависимостей видно, что с увеличением высоты падения груза с  $H=0.1$  м до  $H=0.5$  м, значения динамического прогиба увеличиваются с  $\delta_{\text{дин}}^C=0.009$  м до  $\delta_{\text{дин}}^C=0.02$ , т.е. в 2.2 раза, при статическом прогибе балки, равном  $\delta_{\text{ст}}^C=0.0004$ м. Значения динамического коэффициента, при этом, увеличиваются с  $k_{\text{дин}}=23$  до  $k_{\text{дин}}=50$ , т.е. в 2.1 раза (рис. 2). При  $H=0.3$  м общий прогиб балки после удара, равен  $\delta_{\text{уд}}^C=0.016$ м, а доля статического прогиба, в общем прогибе балки, составляет около 3%.

Из публикаций [16-18], известно что любая динамическая нагрузка, вынуждает деформируемую систему колебаться. Поэтому, задача исследования устойчивости изучаемого объекта, состоит в определении усилий и перемещений, порождаемых инерционными силами и статической компонентой внешнего воздействия, когда система совершает движение. Для смягчения действия динамических нагрузок и ограничения амплитуды колебаний балки в моделируемой системе, рекомендуется применение податливых опор [4,5,10].

Для того чтобы оценить влияние податливой опоры на величину изгибных деформаций пород кровли, при действии динамических нагрузок, были выполнены исследования на моделях из эквивалентных материалов. Эксперименты были проведены на специальном стенде, в лаборатории горного давления ДонНТУ, когда породы кровли угольного пласта были представлены в виде породной балки длиной  $L_b=0,6$  м, толщиной  $h=0,02$ м и шириной  $B=0,04$ м. Масса балки соответствовала  $m_b=1.4$  кг, модуль упругости  $E=8800$  МПа, плотность  $\rho=2100$  кг/м<sup>3</sup>. Балка была изготовлена из песчано-цементной смеси, согласно рекомендаций [19-21] и нагружалась внешней силой  $P$ , (Н). С одной стороны балка имела жесткое закрепление в т. А, на расстоянии  $AB=2a$  балка опиралась на податливую опору- пружину постоянной жесткости  $C_n$ , (Н/м). Масштаб моделирования 1:100. Фото стенда, на котором проводились эксперименты, представлено на рис.3.

Величина изгибных деформации пород кровли угольного пласта определяет устойчивость балки, а безразмерная величина  $y$ , является прочностной характеристикой и зависит от основных параметров рассматриваемой системы, т.е.

$$y = f(h, B, L_b, \rho, F, E) \quad (5)$$

Используя  $\pi$ -теорему [22] и значимость каждого из перечисленных в (5) параметров, когда в качестве независимых размерностей выбраны (н) и (м), параметрическое уравнение в безразмерном виде можно представить как

$$y = f\left(\frac{B}{L_b}; \frac{h}{L_b}; \frac{E}{\rho g L_b}; \frac{F}{EL^2}\right), \quad (6)$$

из чего следует, что в рассматриваемой модели, определяющим является линейный масштаб. Остальные масштабы вычислялись через линейный масштаб, на основе известных физических закономерностей [10].

Число наблюдений  $n$ , которые необходимо выполнить для получения достаточно надежных и достоверных результатов моделирования, с показателем точности  $\varepsilon=5\%$ , было установлено в соответствии с [10], по выражению

$$n = \frac{V_c^2 t_{ct}^2}{\varepsilon^2}, \quad (7)$$

где  $V_c$  – коэффициент вариации, принимаем равным  $V_c=8\%$ ;  $t_{ct}$  – критерий Стьюдента,  $t=1,96$ . и соответствовало  $n \approx 10$ .

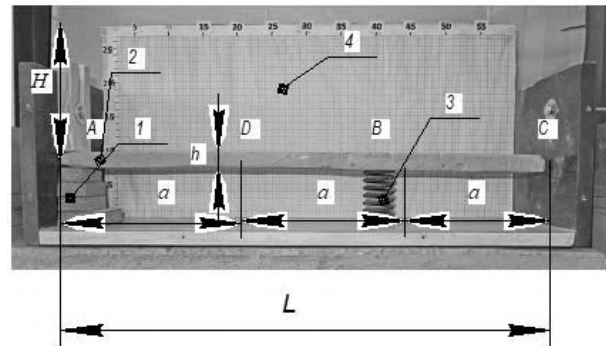


Рис. 3 – Фото стенда для изучения влияния динамических нагрузок на состояние пород кровли угольного пласта с податливой опорой постоянной жесткости, С, (Н/м) : 1- жесткая опора А; 2- балка-непосредственная кровля; 3- податливая опора- пружина, постоянной жесткости,  $C_n$ , (Н/м); 4- стенд с координатной сеткой; L-длина балки,(м) D, B, C- точки, в которых происходило соударение падающего груза массой  $m$ , (кг) с балкой; H- высота падения груза, м; a- расстояние между точками, (м),  $a=0.2$  м

При проведении экспериментов было отработано 30 моделей.

Известно [23,24], что пружины имеют свои собственные константы, которые определяют их жесткость. Существует зависимость, которая подчиняется закону Гука и связывает силу и жесткость, т.е. смещение пружины от своего первоначального положения. Для определения жесткости пружины используемой в моделях, был рассмотрен пружинный маятник [16,24], состоящий из металлической пружины и груза массой  $m$ , (кг). При проведении исследований, пружину рассматривали как тело начальной длины  $l$ , (м), подвергающееся сжатию. В состоянии равновесия вес груза, находящегося на пружине, уравновешивался силой ее упругости, т.е. выполнялось соотношение



$$mg = C_n \Delta l_n, \quad (8)$$

где  $C_n$  - жесткость пружины, Н/м;  $\Delta l_n$  - величина сжатия пружины под действием груза, м.

При определении жесткости пружины  $C_n$ , (Н/м), в лабораторных условиях были отобраны три груза, имеющие различные массы  $m$ , (кг). Для каждого груза соответствующей массы, было выполнено по 10 измерений определения величины сжатия пружины. Экспериментальные данные по определению жесткости пружины представлены в табл. 1.

При испытании моделей, перемещения и деформации балки, регистрировались цифровой фотокамерой. По фотографическим изображениям, с помощью пиксельных координат точек, с использованием основных принципов фотограмметрии [25], определялось положение исследуемой модели в пространстве до и после действия внешней силы.

Таблица 1 – Определение жесткости пружины  $C_n$ , (Н/м) в лабораторных условиях

Масса груза, m, кг	Вес груза, mg, Н	Величина сжатия, $\Delta l$ , м	Жесткость, $C_n$ Н/м	Среднее значение жесткости, $C_n$ , Н/м
1,22	12,04	0,09	1215	1210
1,12	11,05	0,08	1210	
1,1	10,95	0,08	1206	

В результате действия внешней силы, экспериментально была установлена величина прогиба балки  $X$ , (м), которая опиралась на пружину, жесткость которой равна  $C_n=1210$  Н/м. Для определения прогиба балки, породный блок массой  $m= 0.2$  кг, с высоты  $H=0.3$  м, одноразово и поочередно сбрасывали на балку в точки  $D$ ,  $B$  и  $C$ , находящиеся на различном расстоянии от опоры  $A$ , с учетом того, что  $AD=0.2$  м;  $AB=0.4$  м;  $AC=0.6$  м (рис.3). Коэффициент восстановления при ударе соответствовал  $k_b=1$ , т.е. рассматривался упругий удар.

Особенностью динамических нагрузок является то, что при действии внешней силы на балку, рассматриваемая система начинает совершать колебания. Их амплитуду  $A$ , (м), можно определить по выражению [13, 16]

$$A = \sqrt{x^2 + \frac{V_0^2}{k}}, \quad (9)$$

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

Величина  $A$ , (м) зависит от перемещения балки  $x$ , (м), скорости падения породного блока  $V_0 = \sqrt{2gH}$  и  $k = \sqrt{\frac{g}{x}}$ .

На рис. 4 приведены зависимости, отражающие изменение величины прогиба  $X$ , (м), амплитуды  $A$ , (м) и частоты  $k$ , (1/с) колебаний балки длиной  $L$ , (м).

Из приведенных зависимостей видно, что при падении в т.С груза массой  $m=0.2$  кг, балка будет иметь наибольший прогиб, который равен  $X=0.022$  (м) (рис. 4). При этом, доля статического прогиба, который равен  $\delta_{ст}=0.012$  м, в общем прогибе балки после удара, когда груз падает с высоты  $H=0.3$  м, составляет около 50%. При таком взаимодействии балки с податливой опорой- пружинной, при действии динамических нагрузок, когда породный блок падает на свободный конец поддерживаемой конструкции, амплитуда колебаний увеличивается, а частота наоборот, уменьшается (рис.4).

С учетом затухания колебаний, при коэффициенте затухания равном  $\beta < k$ , их период можно определить как в [16,26,27] по выражению

$$T = \frac{2\pi}{k} \quad (10)$$

Физический процесс собственных колебаний моделируемой системы характеризуется ее добротностью  $D$ , величина которой зависит от логарифмического декремента затухания  $\delta$  и определяется как в [18], т.е.

$$D = \frac{2\pi}{\delta}. \quad (11)$$

Логарифмический декремент  $\delta$  представляет качественную характеристику затухания колебаний [4,16]. Этот показатель описывает уменьшение амплитуды колебательного процесса в моделируемой системе.

Физической величиной, определяющей характер колебаний в системе, является коэффициент демпфирования, определяемый как в [28,29] по выражению

$$\xi = \frac{r}{2mk}, \quad (12)$$

где  $r$  - коэффициент силы сопротивления движения,  $r = 0.3 - 0.5$  кг/с;  $m$  - масса моделируемой системы, кг.

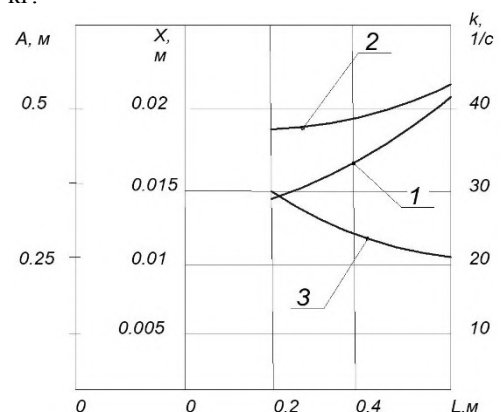


Рис. 4 – Графики изменения величины прогиба  $X$ , (м), амплитуды  $A$ , (м) и частоты колебаний  $k$ , (1/с) балки в моделируемой системе, при падении груза массой  $m=0,2$  кг с высоты  $H=0.3$  м, с учетом длины  $L$ , (м): 1-  $x$ , (м); 2-  $A$ , (м); 3-  $k$ , (1/с)

Модальный коэффициент демпфирования  $\xi$  характеризует роль демпфирования в моделируемой системе, которая подвержена колебаниям с первоначальным перемещением. Считается [28], чем меньше значения этого коэффициента, тем дольше будут длиться колебания, а при  $\xi \geq 1$ , никаких колебаний система не совершает.

На рис.5 приведены графики, отражающие изменение периода колебаний  $T$ , (с), добротности  $D$  рассматриваемой деформируемой системы и коэффициента демпфирования  $\xi$ , при падении на балку длиной  $L$ , (м) груза массой  $m=0.2$  кг.

Из приведенных зависимостей видно, что при падении груза на свободный конец балки, период колебаний  $T$ , (с) балки в рассматриваемой системе и коэффициент демпфирования увеличиваются, а добротность  $D$  наоборот, уменьшается. Установленные закономерности свидетельствуют о затухании колебаний в системе. Этот процесс подтверждает рост коэффициента демпфирования, с учетом места падения груза на балку (от т.Д до т.С), который увеличивается с  $\xi=0.0065$  до  $\xi=0.0083$ , т.е. на 25% (рис.5).

В качестве количественного показателя демпфирующей способности колебательной системы с податливой опорой, используется коэффициент диссипации  $\psi$ , который определяется как в [4, 27]

$$\psi = 2\delta, \quad (13)$$

Так же, с учетом логарифмического декремента затухания, можно определить полное число колебаний  $Ne$  балки в рассматриваемой системе, за период их релаксации [16].

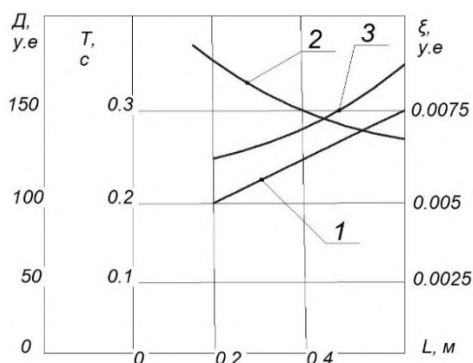


Рис. 5 –Графики изменения периода  $T$ , (с) колебаний, добротности  $D$  рассматриваемой системы и коэффициента демпфирования  $\xi$  при падении груза массой  $m$ , (кг) на балку длиной  $L$ , (м); 1-  $T$ , (с); 2- $D$ ; 3-  $\xi$ ;  $m=0.2$  кг

На рис. 6 представлены зависимости, определяющие изменение логарифмического декремента затухания колебаний  $\delta$ , коэффициента диссипации  $\psi$  и полного числа колебаний  $Ne$ , при падении груза на балку, длиной  $L$ , (м), с учетом места соударения.

Установлено, чем больше прогиб балки, тем больше значение  $\delta$  и коэффициента диссипации, при уменьшении числа  $Ne$  колебаний в системе (рис.6).

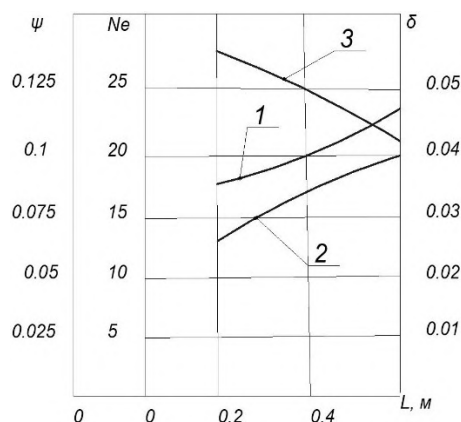


Рис. 6 – Графики изменения логарифмического декремента  $\delta$  затухания колебаний, коэффициента диссипации  $\psi$  и полного числа колебаний  $Ne$  балки в рассматриваемой системе, с учетом места падения груза по длине  $L$ , (м): 1-  $\delta$ , 2-  $\psi$ , 3-  $Ne$

В теории колебаний, при анализе собственных колебаний изучаемого объекта, часто применяют спектральные методы, сущность которых заключается в замене исследуемых физических величин, таких как внешняя сила и жесткость, их спектрами. Знание динамической жесткости упругого основания, в моделируемом случае, пружины, позволяет определить плотность амплитудного спектра движений, возникающих в системе после удара. Однако, от момента удара, зависит не плотность амплитудного спектра, а фазовый спектр [13, 16, 26].

При исследовании фазовых соотношений между действием внешней силы и откликом осциллятора, ранее было установлено, что отклик последнего всегда отстает от воздействия [16, 17]. Поэтому, в случае воздействия на балку внешней силы, при исследовании затухающих колебаний моделируемой системы, когда тело одновременно совершает одинаковые по направлению движения, сравниваемые спектры должны отличаться друг от друга только сдвигом [16].

Согласно [29-31], между существующими характеристиками, описывающими колебательные свойства рассматриваемой деформируемой системы, существует взаимосвязь, которая позволяет определить величину сдвига фазы  $tg\varphi$  по выражению

$$tg\varphi = \frac{x \cdot k}{v_0} \quad (14)$$

Действительно, из-за неоднородности материала балки, с учетом величины внешней силы, при наличии податливой опоры, деформация будет отставать от перемещения во времени на величину сдвига фазы  $tg\varphi$ , которая зависит от физико-

механических свойств балки, ее массы и жесткости податливой опоры. Исходя из этого, деформации, вызванные соответствующими перемещениями, достигают своего наибольшего значения не одновременно с окончанием действия внешней силы, а через некоторую величину  $tg\varphi$ , одно после другого.

Промежуток времени  $t_n$ , (с) между окончанием действия внешней силы и перемещением балки, когда последние достигают наибольшего значения, определяется по выражению [26]

$$t_n = \frac{tg\varphi T}{2\pi} \quad (15)$$

Считаем, что за время удара  $t_{уд}$ , (с), внешняя сила  $P=mg$ , (Н) совершает работу  $A$ , (Дж), в результате которой балка перемещается и деформируется. Мощность,  $N$ , (Вт), затрачиваемая на перемещение и деформирование балки, с учетом времени, определяется по выражению [4, 12]

$$N = \frac{A_N}{t_{уд} + t_n} \quad (16)$$

где  $t_{уд}$  - продолжительность удара, (с).

Продолжительность удара  $t_{уд}$ , (с) определяется по выражению [31]

$$t_{уд} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{x}{g}} \quad (17)$$

Работа  $A_N$ , (Дж), затрачиваемая на сжатие пружины, накапливается в сжимаемом теле в виде потенциальной энергии, а выражение для определения этой величины имеет вид [12]

$$A_N = \frac{cx^2}{2} \quad (18)$$

На рис. 7 представлены графики, отражающие изменение величины сдвига фазы во времени  $tg\varphi$ , продолжительности удара  $t_{уд}$ (с) и мгновенной мощности  $N$ , (Вт), затрачиваемой на сжатие пружины при падении на балку длиной  $L$ , (м) груза массой  $m=0.2$  кг.

Из приведенных зависимостей (рис. 7) видно, что с увеличением времени удара  $t_{уд}$ , (с), когда перемещения балки  $X$ , (м) так же увеличивается, увеличивается сдвиг фазы во времени  $tg\varphi$  и значение мгновенной мощности  $N$ , (Вт), затрачиваемой на перемещение и деформирование балки. В результате выполнения такой работы, за определенный промежуток времени, равный  $\Delta t=t_{уд} + t_n$ , (с), происходит сжатие пружины. Очевидно, чем продолжительнее удар  $t_{уд}$ , (с) и больше значение сдвига фазы во времени  $tg\varphi$ , с учетом места соударения породного блока с балкой относительно податливой опоры, тем больше величина мгновенной мощности, которая необходима для сжатия пружины (рис. 7).

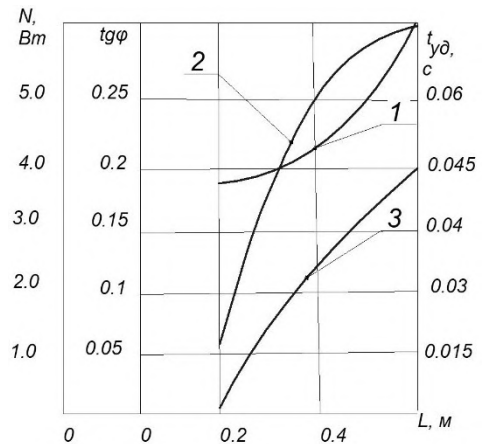


Рис. 7 – Графики изменения величины сдвига фазы во времени  $tg\varphi$ , продолжительности удара  $t_{уд}$ (с) и мгновенной мощности  $N$ , (Вт), затрачиваемой на перемещение и деформирование балки, при падении груза массой  $m=0.2$  кг: 1-  $tg\varphi$ ; 2-  $t_{уд}$ (с); 3-  $N$ , (Вт)

Определим теперь величину ударной силы  $P_{уд}$ , (Н) при падении груза массой  $m$ , (кг) на балку с различной высотой  $H$ , (м), но с учетом того, что балка имеет различные опорные связи. Так, согласно второго закона Ньютона [24]

$$m\bar{d}V = \bar{P}dt \quad (19)$$

С использованием теоремы о среднем [12], считаем что величина ударной силы определяется как

$$P_{уд} = \frac{mV}{t_{уд}} \quad (20)$$

На рис. 8, представлены графики, отражающие изменение величины ударной силы  $P_{уд}$ , (Н) при падении груза массой  $m$ , (кг) на балку длиной  $L$ , (м) с жесткой или податливой опорой.

Установлено, что с увеличением высоты падения груза на балку, величина ударной силы  $P_{уд}$ , (Н) при наличии в рассматриваемой деформируемой системе податливой опоры постоянной жесткости, уменьшается в 2,8 раза, в сравнении с вариантом, в котором моделируемая балка имеет жесткие опорные связи (рис. 8).

В результате выполненных лабораторных исследований устойчивости пород кровли угольного пласта, представленной в виде балки с податливой опорой постоянной жесткости, установлено, что при динамических нагрузках, динамическая составляющая в общем прогибе балки, отражает мгновенное сжатие податливой опоры, по отношению к статическому действию. Из этого следует, что динамические перемещения в рассматриваемой деформируемой системе, сводятся к минимуму, когда статические смещения принимают максимальные значения. При определении перемещений деформируемой системы, которая содержит податливые опорные связи, при действии динамических нагрузок, кроме деформаций изгиба балки, необходимо учитывать податливость опор и место соударения падающего груза с балкой, относительно податливой опоры.

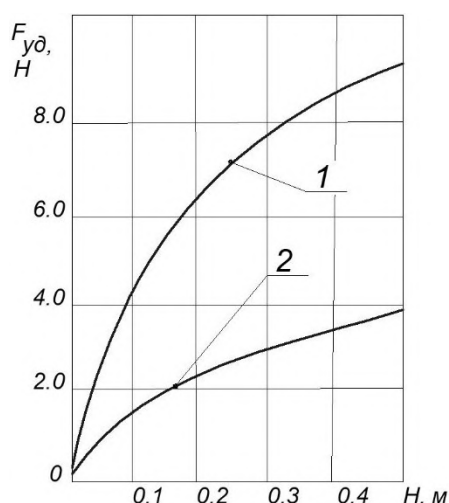


Рис. 8 – Графіки зміни величини ударної сили  $F_{уд}(H)$  при падінні груза масою  $m$ , (кг) на балку довжиною  $L$ , (м) існуючої різних опорних зв'язей, з урахуванням висоти падіння  $H$ , (м): 1- з жорсткими опорними зв'язями; 2- з податливою опорою;  $m = 0.2$  кг;  $L = 0.6$  м

Таким чином, при діянні динамічних навантажень на балку з різними варіантами опорних зв'язей, геометричний параметр  $X$ , (м), що характеризує переміщення балки, визначає напружено-деформоване стан системи.

### Висновки

Експериментальна задача про вплив динамічних навантажень на стійкість кровлі в вуглеводородному масиві, що містить виробку, в якій бокові породи вугільного пласта вважаються балкою, з різними видами опорних зв'язей, може бути розв'язана методами теорії еластичності, з урахуванням того, що встановлено закон руху розглянутої деформованої системи і, визначено моменти часу, при яких переміщення балки-сміщення бокових порід, досягають максимальних значень. При наявності жорстких опорних зв'язей в розглянутої деформованої системі, остання є більш чутливою до прояву ударних навантажень. При наявності в системі податливих опорних зв'язей, кількість енергії, витраченої для деформування балки, залежить від місця соударення падаючої породи з балкою, відносно податливої опори.

### Список літератури

1. **Николин, В. И.** Снижение травматизма от проявлений горного давления / **Николин В. И., Подкопаев С. В., Агафонов А. В., Малеев Н. В.** – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 332 с.

2. **Жуков, В. Е.** Малоотходная технология добычи угля **В. Е. Жуков, В. В. Выстороп, А. М. Колчин и [др.]**. – К.: Техника, 1984. – 144 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. **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.
5. **Liashok, Ya.** Experimental studies of the seam openings competence in different methods of protection under pitch and steep coal seams development / **Ya. Liashok, I. Jordanov, D. Chepiga, S. Podkopaiev** // *Mining of Mineral Deposits*. – 2018. – Vol. 12, Issue 4. – P. 9-19. – doi: 10.1547/mining12.04.009.
6. **Якоби, О.** Практика управления горным давлением / **О. Якоби**. – М.: Недра, 1987. – 566 с.
7. **Викторов, С. Д.** Сдвигание и разрушение горных пород / **С. Д. Викторов, М. А. Иофис, С. А. Гончаров**. – М.: Наука, 2005. – 277 с.
8. **Шашенко, А. Н.** Геомеханика / **А. Н. Шашенко, В. П. Пустовойтенко, Е. А. Сдвижкова**. – К.: Новый друк, 2016. – 528 с.
9. **Борисов, А. А.** Механика горных пород и массивов / **А. А. Борисов**. – М.: Недра, 1980. – 360 с.
10. **Беляев, Н. М.** Сопротивление материалов / **Н. М. Беляев**. – М.: Наука, 1965. – 856 с.
11. **Циглер, Ф.** Механика твердых тел и жидкостей / **Ф. Циглер**. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая механика», 2002. – 912 с.
12. **Акимов, В. А.** и др. Теоретическая механика. Динамика. В 2 ч. Ч 2: Динамика материальной точки / Под общ. ред. проф. **А.В. Чигарева**. – Минск: Новое знание, 2010. – 863 с.
13. **Baruh, H.** Applied Dynamics / **H. Baruh**. – Taylor Francis Group. LLS, 2015. – 872 p.
14. **Ginsberg, I.** Engineering Dynamics / **I. Ginsberg**. – Cambridge University Press, 2008. – 726 p.
15. **Kleppner, D.** An introduction to Mechanics / **D. Kleppner, R. Kolenkow**. – Cambridge University Press, 2014. – 542 p.
16. **Стрелков, С. П.** Введение в теорию колебаний / **С. П. Стрелков**. – СПб.: Изд-во «Лань», 2005. – 440 с.
17. **Ebrahimi, F.** Advances in Vibration. Annalistic Research. In Tech. / ed. **F. Ebrahimi**. – 2011. – 456 p.
18. **Гусев, А. Ф.** Прикладная теория колебаний / **А. Ф. Гусев, М. В. Навоселова**. – Тверской госуд. ун-т, 2017. – 160 с.
19. 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.
20. **Борщ-Компониц, В. И.** Практическая механика горных пород / **В. И. Борщ-Компониц**. – М.: Из-во «Горная Книга», 2013. – 322 с.
21. **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.
22. **Бриджмен, П. В.** Анализ размерностей / **П. В. Бриджмен**. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 148 с.

23. Яблонский, С. А. Курс теории колебаний / С. А. Яблонский, С. С. Норейко. – М.: Изд-во ВВВ, 2007. – 336 с.
24. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 560 с.
25. Обиралов, А. И. Фотограмметрия / А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Н. А. Гаврилова. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
26. Bottega, W. J. Engineering Vibrations / W. J. Bottega. – CRC Press, Taylor&Francis Group, 2006. – 727 p.
27. Baddour, N. Recent Advances in Vibration Analysis / N. Baddour // In Tech., Rijeka, Croatia, 2011. – 236 p. – doi: 10.5772/861.
28. 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. – doi 10.5862/MCE.40.12.
29. Водопьянов, В. И. Исследование демпфирующих свойств материалов / В. И. Водопьянов, А. А. Белов. – Волгоград, ВолГГУ, 2001. – 12 с.
30. Meirovitch, L. Fundamentals of Vibrations / L. Meirovitch. – Mc Graw- Hill, 2001. – 806 p.
31. Кильчевский, Н. А. Теория соударений твердых тел / Н. А. Кильчевский. – Киев: Наук. думка, 1969. – 246 с.
10. Belyaev, N. Soprotivleniye materialov [Strength of materials]. M., Nauka, 1965, 856.
11. Ziegler, F. Mekhanika tverdykh tel i zhidkostey [Mechanics of solids and liquids]. Izhevsk: SIC "Regular and chaotic mechanics", 2002, 912.
12. Akimov, V. Teoreticheskaya mekhanika. Dinamika. [Theoretical mechanics. Dynamics]. Dinamika material'noy tochki. Under. ed. of prof. A. V. Chigarev. Minsk: New knowledge, 2010, 863.
13. Baruh, H. Applied Dynamics. Taylor Francis Group, LLS, 2015, 872.
14. Ginsberg, I. Engineering Dynamics. Cambridge University Press, 2008, 726.
15. Kleppner, D., Kolenkow, R. An introduction to Mechanics. Cambridge University Press, 2014, 542.
16. Strelkov, S. Vvedeniye v teoriyu kolebaniy [Introduction to the theory of oscillations]. SPb.: Publishing house "Lan", 2005, 440.
17. Ebrahimi, F. Advances in Vibration Analysis Reserch. In Tech. 2011, 456.
18. Gusev, A., Navoselova, M. Prikladnaya teoriya kolebaniy [Applied vibration theory] Tver State. Univ, 2017, 160.
19. Natsional'nyy standart Ukrayiny. Metody vyprovuvannya tsementu. Chastyna 1. Vyznachennya mitsnosti (EN 196-1: 2005, IDT) DSTU EN196-1: 2007. Kiev, Minsk Ukrini, 2007, 30.
20. Borscht-Komponiyets, V. Prakticheskaya mekhanika gornykh porod [Practical mechanics of mountain rocks]. M., From-in "Mountain Book", 2013, 322.
21. Dvorkin, L. Gotz, V., Dvorkin, O. Ispytaniya betonov i rastvorov. Proyektirovaniye ikh sostavov. M.: Infra-Engineering, 2015, 418.
22. Bridgman, P. Analiz razmernostey. Izhevsk, Scientific and Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", 2001. 148.
23. Yablonsky, S., Noreiko, S. Kurs teorii kolebaniy [Oscillation course]. M, Izd-vo BHV, 2007, 336.
24. Trofimova, T. Kurs fiziki [Physics course]. M., Publishing Center "Academy", 2006, 560.
25. Obiralov, A., Limonov, A. Gavrilova, N. Fotogrammetriya [Photogrammetry]. M., Nedra, 1969, 392.
26. Bottega, W. J. Engineering Vibrations. CRC Press, Taylor&Francis Group, 2006, 727p.
27. Baddour, N. Recent Advances in Vibration Analysis. In Tech., Rijeka, Croatia, 2011, 236, doi: 10.5772/861.
28. Kovaleva, N., Rutman, Yu., Davydova, G. Opre-deleniye optimal'nykh parametrov dempfirovaniya v sistemakh seysmoizolyatsii. *Construction Engineering Journal. Magazine of Civil Engineering*, 2013, 5, 107-115, doi 10.5862/MCE.40.12.
29. Vodopyanov, V., Belov, A. Issledovaniye dempfiruyushchikh svoystv materialov [Investigation of the damping properties of materials]. Volgograd, VolgGTU, 2001, 12.
30. Meirovitch, L. Fundamentals of Vibrations. Mc Graw. Hill, 2001, 806.
31. Kilychevsky, N. A. Teoriya soudareniy tverdykh tel [Theory of solid collision. Kiev. Naukova Dumka, 1969, 246.

#### References (transliterated)

1. Nikolin, V, Podkopaev, S., Agafonov, A., Maleev, N. Snizheniye travmatizma ot proyavleniy gornogo davleniya [Reduction of injury from the manifestations of rock pressure]. Donetsk, Nord-Press, 2005, 332.
2. Zhukov, V., Vistorop, V., Kolchin, A. and others Malootkhodnaya tekhnologiya dobychi uglya [Low waste coal mining technology]. K., Technics, 1984, 144.
3. Zborshchik, M., Podkopaev, S. Mekhanizm povysheniya ustoychivosti krovliv v lavakh pri primenenii zakladki vyrabotannogo. Coal of Ukraine, 1992, 5, 20-23.
4. Shakirzyanov, R., Shakirzyanov, F. Dinamika i ustoychivost' sooruzheniy [The mechanism of increasing the stability of the roof in the pits when using the laying of a goaf]. Kazan, Publishing House Kazans. state arch-pp. University, 2005. 120.
5. Liashok, Ya., Iordanov, I., Chepiga, D., Podkopaiev, S. Experimental studies of the seam openings competence in different methods of protection under pitch and steep coal seams development. *Mining of Mineral Deposits*, 2018, 12, 4, 9-19, doi: 10.1547/mining12.04.009.
6. Jacobi, O. Praktika upravleniya gornym davleniyem [Practice of controlling rock pressure]. M., Nedra, 1987, 566.
7. Viktorov, S., Iofis, M., Goncharov, S. Sdvizheniye i razrusheniye gornykh porod [Movement and destruction of rocks]. M., Science, 2005, 277.
8. Shashenko, A., Pustovoitenko, V., Sdvizhikova, E. Geomekhanika [Geomechanics]. K., New druk, 2016, 528.
9. Borisov, A. Mekhanika gornykh porod i massivov. M., Nedra, 1980, 360.

#### Сведения об авторах (About the Authors)

**Иорданов Игорь Вячеславович** – кандидат технических наук, соискатель кафедры «Охрана труда», Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, Украина; e-mail:gendir@eme.kiev.ua.

**Igor Iordanov** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Applicant, State Higher Education Establishment "Donetsk National Technical University", Pokrovsk, Ukraine; e-mail: gendir@eme.kiev.ua.

**Симонова Юлія Ігорівна** – аспірант кафедри «Разработка месторождений полезных ископаемых», Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, Украина; e-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua.

**Yuliia Simonova** – graduate student, State Higher Education Establishment “Donetsk National Technical University”, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua.

**Петренко Андрей Витальевич** – ассистент кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, Украина; e-mail: andrii.petrenko@donntu.edu.ua.

**Andriy Petrenko** – assistant of the Department of Mining of Mineral Deposits, State Higher Education Establishment “Donetsk National Technical University”, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: andrii.petrenko@donntu.edu.ua.

**Положий Антон Витальевич** – аспірант кафедри «Разработка месторождений полезных ископаемых», Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, Украина; e-mail: anpolozhii@gmail.ru.

**Anton Polozhii** – graduate student, State Higher Education Establishment “Donetsk National Technical University”, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: anpolozhii@gmail.ru.

**Подкопаев Сергей Викторович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Охрана труда», Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, Украина; e-mail: spodkopaiev@aol.com.

**Serhii Podkopaiev** – Doctor of Technical Sciences, State Higher Education Establishment “Donetsk National Technical University”, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: spodkopaiev@aol.com.

**Довгаль Виталий Юрьевич** – генеральный директор Государственное предприятие «Мирноградуголь» Мирноград, Украина, г. Киев; e-mail: vud007007@gmail.com.

**Vitaliy Dovgal** – General Director of the State Enterprise “Mironogradugol”, Mironograd, Ukraine; e-mail: vud007007@gmail.com.

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

**Anton Korol** – engineer, PSP “Dobropolskoe Mine Administration” LLC “DTEK Dobropolyeugol”, Dobropolye, Ukraine; e-mail: akorolv2017@gmail.com.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Иорданов, И. В.** Исследование на моделях устойчивости пород кровли угольного пласта при действии динамических нагрузок / **И. В. Иорданов, Ю. И. Симонова, А. В. Петренко, А. В. Положий, С. В. Подкопаев, В. Ю. Довгаль, А. В. Король** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 17-26. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.03.

*Please cite this article as:*

**Iordanov, I., Simonova, Y., Petrenko, A., Polozhii, A., Podkopaiev, S., Dovgal, V., Korol, A.** Research on models of stability of rocks of the roof of coal strays during dynamic loads. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2019, 5 (1330), 17-26, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.03.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Иорданов, И. В.** Дослідження на моделях стійкості порід покрівлі вугільного пласта при дії динамічних навантажень / **И. В. Иорданов, Ю. И. Симонова, А. В. Петренко, А. В. Положий, С. В. Подкопаев, В. Ю. Довгаль, А. В. Король** // *Вісник НТУ «ХПИ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 17-26. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.03.

**АННОТАЦІЯ** Метою роботи є вивчення стійкості порід покрівлі вугільного пласта при дії динамічних навантажень. Для досягнення поставленої мети були виконані лабораторні дослідження на моделях з еквівалентних матеріалів, коли покрівля вугільного пласта була представлена у вигляді балки з податливою опорою - пружиною постійної жорсткості. В результаті виконаних досліджень встановлено, що при дії динамічних навантажень, тобто при силовому впливі падаючого вантажу на балку, її прогин досягає максимальних значень не одночасно із закінченням дії зовнішньої сили, а одне після іншого, через деякий проміжок часу. При такій взаємодії балки з податливою опорою постійної жорсткості, кількість енергії, що витрачається на стиснення пружини, залежить від тривалості удару і проміжку часу, між закінченням дії зовнішньої сили і переміщенням балки, коли ця величина досягає максимальних значень. Геометричний параметр, що відображає переміщення балки при прояві динамічних навантажень, коли встановлений закон її руху і визначено моменти часу, при яких переміщення досягає максимальних значень, визначає напружено деформований стан модельованої системи. При наявності в модельованій системі, жорстких опорних зв'язків, сама система стає більш чутливою до прояву ударних навантажень. Наявність піддатливих зв'язків в системі, пом'якшує дію динамічних навантажень, за рахунок зменшення жорсткості системи, що моделюється. Зміна жорсткості модельованої системи залежить не тільки від зміни згинальної жорсткості балки, але і від величини податливості опор. При наявності в модельованій системі піддатливих опор, динамічна складова в загальному прогині балки, відображає миттєве стиснення опори, по відношенню до статичної дії навантаження. Для збереження цілісності порід покрівлі вугільного пласта при дії динамічних навантажень, доцільно застосування піддатливих опор або закладки виробленого простору, що дозволить зменшити величину ударної сили падаючої породи і звести до мінімуму ймовірність руйнування бічних порід.

**Ключові слова:** гірський тиск; обвалення; очисний вибій; динамічні навантаження; податлива опора; закладка виробленого простору.

*Поступила (received) 14.02.2019*

УДК 681.513

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.04

## АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

**В. Н. КНЯЗЕВА, Г. И. КАНЮК, А. Ю. МЕЗЕРЯ\*, А. В. АНДРЕЕВ**

кафедра теплоэнергетики и энергосберегающих технологий, Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков, УКРАИНА

\*e-mail: mezzler@mail.ru

**АННОТАЦИЯ** В статье приведена история развития магистральных нефтепроводов Украины, являющейся крупнейшим транзитером газа и нефти в Европе. Проведен анализ установленных мощностей магистральных нефтепроводов Украины и мощностей, потребляемых насосными установками нефтеперекачивающих станций. Приведенные сведения показывают масштабность и актуальность задачи энергосбережения на объектах магистральной транспортировки нефти Украины. Определено, что снижение затрат энергии возможно путем разработки и внедрения систем автоматического энергосберегающего регулирования нефтеперекачивающих насосных установок и обеспечения максимальных значений коэффициентов полезного действия за счет оптимального регулирования частоты их вращения. Проведен анализ нормативной литературы, направленной на обеспечение эффективной работы систем транспортировки нефти по магистральным нефтепроводам, а именно: эксплуатация, управление, ремонт систем транспортировки нефти и насосных установок, установленных на нефтеперекачивающих станциях. Показано, что в существующей нормативной документации недостаточно освещены вопросы обеспечения максимальной эффективности работы насосных установок магистральных нефтепроводов в различных режимах эксплуатации. Из всех существующих нормативных документов фактически лишь один направлен на определение эффективности работы насосных установок нефтеперекачивающих станций, при этом в нем отсутствуют рекомендации по повышению эффективности и поддержанию его на требуемом уровне. Без внимания остаются такие важные научно-технические аспекты проблемы, как оптимизация процессов управления насосными установками магистральных нефтепроводов по прямым критериям минимизации энергетических потерь. Сделан вывод, что для создания нормативной документации, позволяющей обеспечивать максимальную энергоэффективность работы насосных установок нефтеперекачивающих станций необходимо выполнение цикла теоретических и экспериментальных научных исследований, включающих математическое моделирование физических явлений в магистральных нефтепроводах, создание алгоритмов определения эффективной работы насосных агрегатов в режиме реального времени и алгоритмов поддержки этого режима при заданных условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** насосная установка; нормативное обеспечение; энергоэффективность; нефтеперекачивающая станция; магистральный нефтепровод.

## ANALYSIS OF NORMATIVE DOCUMENTS FOR ENSURING EFFICIENT WORK OF PUMPED INSTALLATIONS OF MAIN OIL PIPELINES

**V. KNIAZIEVA, G. KANYUK, A. MEZERYA\*, A. ANDREEV**

Department of Heat Power Engineering and Energy Saving Technologies, Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Kharkov, UKRAINE

**ABSTRACT** The article presents the history of the development of main oil pipelines in Ukraine, which is the largest transit country for gas and oil in Europe. The analysis of the installed capacities of the main oil pipelines of Ukraine and the capacities consumed by pumping stations of oil pumping stations is carried out. The above information shows the scale and relevance of the task of energy saving at the facilities of the main oil transportation in Ukraine. It has been determined that the reduction of energy costs is possible through the development and implementation of energy-saving systems for automatic control of oil pumping stations and ensuring maximum values of efficiency factors due to the optimal control of the frequency of their rotation. The analysis of regulatory literature aimed at ensuring the effective operation of oil transportation systems through main oil pipelines, namely: operation, management, repair of oil transportation systems and pumping installations installed at oil pumping stations. It is shown that the existing regulatory documentation does not cover the issues of ensuring maximum efficiency of pumping installations of main oil pipelines in various operating modes. Of all the existing regulatory documents, in fact, only one is aimed at determining the efficiency of pumping stations at oil pumping stations, while there are no recommendations for improving efficiency and maintaining it at the required level. Such important scientific and technical aspects of the problem, like the optimization of control processes for pumping installations of oil trunk pipelines according to direct criteria for minimizing energy losses, wasn't explored. It was concluded that there is a necessity to create regulatory documentation for maximum energy efficiency of oil pumping stations, there is a necessity to perform a cycle of theoretical and experimental research, including mathematical modeling of physical phenomena in main oil pipelines, creating real-time algorithms for determining of pumping units under specified operating conditions.

**Keywords:** pumping unit; regulatory support; energy efficiency; oil pumping station; main oil pipeline.

### Введение

Доля нефти и газа в энергетическом балансе промышленно развитых стран составляет 75-80 %. Несмотря на большие усилия по использованию

нетрадиционных, возобновляемых источников, такое положение сохранится в ближайшие десятилетия.

Необходимость транспорта огромных количеств нефти и газа привело к интенсивному развитию трубопроводного транспорта как наиболее



экономически эффективного. Это, в первую очередь, касается Украины, которая является крупным транзитером газа и нефти (рис. 1).



Рис. 1 – Система магистральных нефтепроводов Украины

Система магистральных нефтепроводов Украины включает 19 нефтепроводов диаметром до 1220 мм общей длиной около 4800 км, 51 нефтеперекачивающую станцию (НПС), работу которых обеспечивают 176 насосных агрегатов, единичной производительностью до 12500 м<sup>3</sup>/час. Суммарная электрическая мощность электроприводов составляет около 360 тыс. кВт. Пропускная способность системы равна 114 млн. т/год на входе и более 56 млн. т/год на выходе [1].

Транспортировка нефти требует значительных энергозатрат на привод нефтеперекачивающих станций. Снижение затрат энергии возможно путем разработки и внедрения энергосберегающих систем автоматического регулирования нефтеперекачивающих насосных установок, которые обеспечивают максимальное значение КПД установок за счет оптимального регулирования частоты их вращения. С этой целью необходимо провести анализ и последующие дополнения к существующей нормативной документации, направленной на решение данного вопроса.

Проблемам повышения энергоэффективности нефтегазового комплекса и обеспечения энерго- и ресурсосбережения в нефтегазовой области

посвящено большое количество научных работ известных отечественных и иностранных ученых. Среди них – М.Д. Айзенштейн, Л.Г. Колпаков, П.И. Тугунов, А.А. Коршун, А.М. Нечваль, К. Пфлейдерер, Л.И. Степанов, L.Vachus и другие. В этом направлении получен ряд эффективных научно-технических результатов, но все они, как правило, касаются отдельных объектов и технологических процессов, тогда как в настоящее время основные реальные резервы энерго- и ресурсосбережения могут быть выявлены и реализованы только на основе системной интеграции и унификации энергоэффективных решений, которые могли бы стать основой разработки соответствующих отраслевых стандартов и других нормативных документов.

Кроме того, без внимания остаются такие важные научно-технические аспекты проблемы, как оптимизация процессов управления насосными установками магистральных нефтепроводов по прямым критериям минимизации энергетических потерь.

#### Цель работы



Целью работы является анализ состояния отрасли транспортировки нефти Украины, определение мощностей основных потребителей нефтеперекачивающих станций, а также анализ существующей нормативной базы по обеспечению эффективной работы насосных установок нефтеперекачивающих станций Украины.

### Изложение основного материала

#### История развития нефтепроводов Украины.

Строительство нефтепроводов в Украине началось в 60-х годах двадцатого века. Первый в Украине нефтепровод «Долина-Дрогобыч» длиной 58,4 км был построен в 1962 году для транспортировки нефти на Дрогобычский нефтеперерабатывающий завод. Он связан с введением в эксплуатацию Северо-Долинского нефтяного месторождения. Характерной особенностью этого нефтепровода является то, что им транспортируется нефть украинского происхождения.

Второй нефтепровод – первая нитка нефтепровода «Дружба» на участке «Мозырь-Броды-Ужгород» – был введен в эксплуатацию поэтапно в 1962-1963 годах. На территории Украины его протяженность составляла 684 км. Транспортировку нефти обеспечивали семь нефтеперекачивающих станций, а в г. Броды была размещена станция налива нефти на железнодорожный транспорт.

Проектная мощность нефтепровода в Украине на входе достигала 17,5 млн. т/год, на выходе – 8,5 млн. т/год. Нефтепровод предназначался для транспортировки смеси татарской, башкирской и западносибирской нефти на экспорт в Венгрию, бывшую Чехословакию и налива нефти в г. Броды на железнодорожный транспорт для экспорта через нефтеперевалочные комплексы в городах Одесса и Рени.

Вторая нитка нефтепровода «Дружба» протяженностью 686,5 км, диаметром 720 мм по всей территории Украины и семь совмещенных с первой ниткой нефтеперекачивающих станций были построены в период с 1970 по 1974 г.. С введением второй нитки общая проектная мощность нефтепровода «Дружба» на территории Украины на входе составляла 55,0 млн. т/год, на выходе – 26,5 т/год.

В 1985 году введена в эксплуатацию вторая нитка нефтепровода «Тихорецк-Лисичанск» диаметром 720 мм, протяженностью 185 км по территории Украины. Общая мощность этих нефтепроводов от Лисичанска до Тихорецка с четырьмя нефтеперекачивающими станциями (из них – две на территории Украины) составила 34 млн. т/год.

С целью диверсификации поставок нефти на украинские нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) и расширения транзитных возможностей Украины в 1993 году было разработано технико-экономическое обоснование строительства морского

нефтеперевалочного комплекса (НПК) – терминала мощностью 40 млн. т/год в районе города Одесса (порт «Южный»), а в 1994 году завершена разработка проекта строительства первой очереди терминала мощностью 12 млн. т/год, строительство которой началось в 1995 году. Одновременно было начато строительство нефтепровода «Одесса-Броды». Строительство нефтяного терминала «Южный» завершено в декабре 2001 года, нефтепровода «Одесса-Броды» – в мае 2002 года.

В сентябре 2005 года введена в действие первая очередь нефтепровода «Жулын-Надвирна» на отрезке «Долина-Надвирна». Этот нефтепровод, соединил шестой – Надвирнянский НПЗ к трубопроводной системе Украины. Общая протяженность нефтепровода – 110 км, мощность – 4,3 млн. т/год. Работа нефтепровода позволяет уменьшить экологические риски путем исключения перевозок нефти железнодорожным транспортом.

На сегодняшний день система магистральных нефтепроводов Украины включает 19 нефтепроводов диаметром до 1220 мм общей длиной около 4800 км, 51 нефтеперекачивающую станцию (НПС), работу которых обеспечивают 176 насосных агрегатов, единичной производительностью до 12500 м<sup>3</sup>/час. Суммарная электрическая мощность электроприводов составляет около 360 тыс. кВт. Пропускная способность системы равна 114 млн. т/год (на входе) и более 56 млн. т/год на выходе.

Общая номинальная емкость одиннадцати резервуарных парков системы магистральных нефтепроводов более 1000 тыс. кубометров.

В состав системы входит также морской нефтяной терминал Южный, предназначенный для приема, отгрузки и транспортировки нефти магистральными трубопроводами Украины. Мощность терминала 14,5 млн., с возможностью расширения до 45 млн. Девейт танкеров до 150 тыс. т. Емкость резервуарного парка терминала 200 тыс. кубометров.

**Анализ нормативной документации.** Магистральные трубопроводы проектируются таким образом, что заданное проектом значение их производительности обеспечивается насосными (для нефти и нефтепродуктов) или компрессорными (для газа) станциями. При этом предусматривается работа перекачивающих агрегатов станций на номинальных режимах, соответствующих номинальной частоте вращения их роторов и максимальному КПД.

Существует ряд нормативно-технической документации, направленной на обеспечение эффективной работы насосных установок магистральных нефтепроводов. Они определяют порядок проведения испытаний, необходимые условия эксплуатации, условия регулирования, ремонт и технику безопасности.

Стандарт [2] устанавливает сроки и определение основных понятий, которые касаются основных объектов магистральных трубопроводов, а

именно: магистральных газопроводов, магистральных нефтепроводов и магистральных нефтепродуктопроводов.

В стандарте [3,4] указаны нормы проектирования новых и реконструкции магистральных трубопроводов и ответвлений от них с условным диаметром до 1400 мм включительно с избыточным давлением среды свыше 1,2 МПа (12 кгс/см<sup>2</sup>) до 10 МПа (100 кгс/см<sup>2</sup>) (при одиночной прокладке и прокладке в технических коридорах) для транспортирования: нефти, нефтепродуктов (в том числе стабильного конденсата и стабильного бензина), природного, нефтяного и искусственного углеводородных газов из районов их добычи (от промыслов), производства или хранения до мест потребления (нефтебаз, перевалочных баз, пунктов налива, газораспределительных станций, отдельных промышленных и сельскохозяйственных предприятий и портов).

Нормы содержат указания, регламентирующие разработку технологических решений при проектировании магистральных нефтепроводов, имеют целью внедрение передовой технологии на базе реализации достижений науки, техники и передового отечественного и зарубежного опыта.

В нормах [5] определяется расчетное количество нефти, которое может пропустить нефтепровод в единицу времени при заданных параметрах нефти и режиме перекачки, а также давление, при котором обеспечивается расчетная производительность нефтепровода с учетом перераспределения потоков и на которое осуществляется раскладка труб.

Вопросы эксплуатации магистральных нефтепроводов подробно изложены в стандартах [6, 7, 8, 9]. Устанавливаются и регламентируются порядок управления и организации эксплуатации магистральных нефтепроводов. Приведены общие положения о магистральных нефтепроводах; изложены требования, предъявляемые к эксплуатации линейной части нефтепроводов, нефтеперекачивающих станций, баз приема и отгрузки нефти, пунктов подогрева и станций смешения нефти, систем защиты от статического электричества и молниезащиты.

Технология ведения ремонтных работ, основные показатели технологического регламента эксплуатации и ремонта оборудования сооружений нефтеперекачивающих станций, который позволяет планировать периодичность текущих, средних и капитальных ремонтов, трудозатраты на их проведение нормируются стандартами [10,11].

Правила пожарной безопасности при эксплуатации магистральных нефтепроводов Украины [12,13] устанавливают основные требования пожарной безопасности при эксплуатации магистральных нефтепроводов Украины для действующих предприятий.

Унифицированные технологические расчеты объектов магистральных нефтепроводов регламентируются стандартом [14], защита труб от коррозии – стандартом [15].

Качество и характеристики нефти определяются соответствующими стандартами. Так, требования к лабораториям, производящим анализы нефти при приемосдаточных операциях регламентируются стандартом [16], а порядок метрологического и технического обеспечения промышленной эксплуатации систем измерений количества и показателей качества нефти изложен в [17]. Калибровка средств измерений, алгоритмы обработки результатов и оценка неопределенности осуществляется согласно [18].

Методика выполнения измерений массы нефти в горизонтальных резервуарах в системе магистрального нефтепроводного транспорта определяется согласно [19]. Измерение плотности и относительной плотности производится согласно [20]. Определяются кинематическая и динамическая вязкость [21], температура потери текучести [22].

Насосным установкам нефтеперекачивающих станций также уделяется немалое внимание [23]. Нормируются уровни эксплуатационной вибрации центробежных насосов магистральных нефтепроводов [24]. Рассмотрены вопросы объемных [25] и динамических насосов [26], а также горизонтальные одноступенчатые центробежные насосы с полуспиральным подводом двустороннего входа с подачей от 65 до 13500 м<sup>3</sup>/ч и напором от 10 до 130 м [27].

Наибольший интерес представляет стандарт РД 39-3-477-80. Временная методика определения КПД насосных агрегатов магистральных нефтепроводов [28]. Настоящая методика предназначена для определения КПД магистральных насосов в условиях эксплуатации на участке нефтепровода с законченным технологическим циклом, где происходит перекачка нефти из насоса в насос.

Исходными величинами для определения КПД насосных агрегатов являются диспетчерские данные:

- давление на входе и выходе каждого насоса рассматриваемого участка;
- суточная производительность нефтепровода;
- перепад давления на дросселирующем органе всех НПС участка нефтепровода.

Кроме диспетчерских данных необходимо иметь мгновенные значения мощности электродвигателей насосов, замеряемые через каждые два часа. Замер мощности при этом может производиться как с помощью переносного комплекта К-51, так и по показаниям вольтметра, амперметра.

Данный стандарт определяет КПД насосных агрегатов, однако не устанавливает нормативных параметров обеспечения их эффективной работы.

Метрологическое обеспечение систем автоматического регулирования технологическими

процессами описано в [29], а вопросы создания и эксплуатации таких систем в [30].

Анализ существующих стандартов показал, что подавляющее большинство из них направлены на проектирование, эксплуатацию и ремонт магистральных нефтепроводов. Если отбросить все сопутствующие стандарты, включая стандарты, по определению физико-химических свойств нефти, то единственным стандартом, определяющим эффективность работы магистральных нефтепроводов является Стандарт РД 39-3-477-80. Временная методика определения КПД насосных агрегатов магистральных нефтепроводов [29]. Однако он лишь регламентирует методику определения эффективности и не позволяет ею управлять.

### Обсуждение результатов

Приведенные сведения показывают масштабность и актуальность задачи энергосбережения на объектах магистральной транспортировки нефти Украины.

Анализ существующей нормативно-технической документации показал, что на сегодняшний день в нормативно-технической и нормативно-методической документации недостаточно полно сформулированы требования относительно создания и эксплуатации систем управления магистральных нефтепроводов, которые позволяют обеспечивать максимальную эффективность работы насосных установок и поддерживать их работу на уровне максимальных КПД.

Для создания нормативной документации, позволяющей обеспечивать максимальную энергоэффективность работы насосных установок нефтеперекачивающих станций необходимо выполнение цикла теоретических и экспериментальных научных исследований, включающих математическое моделирование физических явлений в магистральных нефтепроводах, создание алгоритмов определения эффективной работы насосных агрегатов в режиме реального времени и алгоритмов поддержки этого режима при заданных условиях эксплуатации.

### Выводы

Задача энергосбережения при автоматическом регулировании магистральных нефтепроводов Украины своевременна и актуальна.

Существующее нормативное обеспечение, направленное на обеспечение эффективной работы насосных установок магистральных нефтепроводов Украины нуждается в усовершенствовании. Из существующих на сегодняшний день документов лишь один затрагивает вопрос эффективности работы насосных установок, однако в нем отсутствуют методики определения этого эффективного режима работы насосов и его поддержания при изменении

параметров технологического процесса нефтеперекачивающих станций.

### Список литературы

1. **Канюк, Г. И.** Анализ резервов энергосбережения при управлении насосными агрегатами нефтеперекачивающих станций Украины / **Г. И. Канюк, О. В. Андреев, А. Ю. Мезеря, В. М. Князева** // *Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 4. – С. 3-14.
2. **ДСТУ 4611:2006.** Магистральные трубопроводы. Термины и определения основных понятий.
3. **СНП 2.05.06-85.** Магистральные трубопроводы.
4. **ВНТП 2-86.** Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов.
5. **ВНТП 2-86.** Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов.
6. **РД-153-39.4-056-00.** Правила технической эксплуатации магистральных нефтепроводов.
7. **РД 39-0147103-344-86.** Правила технической эксплуатации систем сбора и внутрипромыслового транспорта нефти и газа.
8. **РД 39-30-114-78.** Правила технической эксплуатации магистральных нефтепроводов.
9. **СТП 320.001587864.034-2002.** Правила технической эксплуатации промышленных трубопроводов газовых, газоконденсатных и нефтяных месторождений.
10. **РД 39-30-1209-84.** Руководство по организации эксплуатации и технологии технического обслуживания и ремонта оборудования и сооружений нефтеперекачивающих станций.
11. **ДСТУ 8753:2017.** Магистральные нефтепроводы. Линейная часть. Ремонт участков нефтепроводов диаметром до 1220 мм. Основные положения.
12. **НАПБ В.01.021-97/510.** Правила пожарной безопасности при эксплуатации магистральных нефтепроводов Украины.
13. **ДНАОП 1.1.21-1.** Правила безопасности в нефтегазодобывающей промышленности Украины.
14. **РД-75.180.00-КТН-198-09.** Унифицированные технологические расчеты объектов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов
15. **ДСТУ 4219-2003.** Трубопроводы сталеві магистральні загальні вимоги до захисту від корозії.
16. **РД 39-0147103-354-89.** Типовое положение о лаборатории, проводящей анализы нефти при приемосдаточных операциях.
17. **РМГ 98-2010. ГСИ.** Порядок метрологического и технического обеспечения промышленной эксплуатации систем измерений количества и показателей качества нефти, трубопоршневых установок и средств в их составе.
18. **РМГ 115-2011. ГСИ.** Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределенности.
19. **РМГ 87-2009. ГСИ.** Масса нефти. Методика выполнения измерений в горизонтальных резервуарах в системе магистрального нефтепроводного транспорта. Основные положения.
20. **ДСТУ ГОСТ 31072:2006.** Нафта і нафтопродукти. Метод визначення густини, відносної густини та густини в градусах АРІ ареометром.
21. **ДСТУ (ГОСТ 33-2003) (ИСО 3104-94).** Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости.

- Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости.
22. **ДСТУ ISO 3016:2017 (ISO 3016:1994, IDT).** Нефтепродукты. Определение температуры потери текучести.
  23. **ДСТУ 3063-95.** Насосы. Классификация. Термины та визначення.
  24. **РД39-30-1339-85.** Агрегаты электронасосные, центробежные нефтяные магистральные. Нормы вибрации (эксплуатационные).
  25. **ДСТУ 2192-93.** Гидроприводы об'ємні. Насосы об'ємні та гідромоторы. Загальні технічні вимоги.
  26. **ГОСТ 6134-87.** Насосы динамические. Методы испытаний.
  27. **ГОСТ 10272-87.** Насосы центробежные двустороннего входа. Основные параметры.
  28. **РД 39-3-477-80.** Временная методика определения КПД насосных агрегатов магистральных нефтепроводов.
  29. **ДСТУ 2709-94.** Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Метрологічне забезпечення. Основні положення.
  30. **ОРММ-2 АСУ ТП.** Общепромышленные руководящие методические материалы по созданию и применению автоматизированных систем управления технологическими процессами в отраслях промышленности. ГКНТ.1981.

#### References (transliterated)

1. **Kanyuk, G. I., Andreev, O. V., Mezerya, A. Yu., Knyazeva, V. M.** Analiz rezervov energosberezheniya pri upravlenii nasosnymi agregatami nefteperekachivayushchikh stantsiy Ukrainy. *Integrovani tekhnologii ta energozberezheniya. Shchokvartalniy naukovo-praktichniy zhurnal.* – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015, 4, 3-14.
2. **DSTU 4611:2006.** Magistralnyye truboprovody. Terminy i opredeleniya osnovnykh ponyatiy.
3. **SNiP 2.05.06-85.** Magistralnyye truboprovody.
4. **VNTP 2-86.** Normy tekhnologicheskogo proyektirovaniya magistralnykh nefteprovodov.
5. **VNTP 2-86.** Normy tekhnologicheskogo proyektirovaniya magistralnykh nefteprovodov
6. **RD-153-39.4-056-00.** Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii magistralnykh nefteprovodov.
7. **RD 39-0147103-344-86.** Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii sistem sbora i vnutripromyslovogo transporta nefiti i gaza.
8. **RD 39-30-114-78.** Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii magistralnykh nefteprovodov.
9. **STP 320.001587864.034-2002.** Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii promyslovykh truboprovodov gazovykh, gazokondensatnykh i nefityanykh mestorozhdeniy.
10. **RD 39-30-1209-84.** Rukovodstvo po organizatsii ekspluatatsii i tekhnologii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya i sooruzheniy nefteperekachivayushchikh stantsiy.
11. **DSTU 8753:2017.** Magistralnyye nefteprovody. Lineynaya chast. Remont uchastkov nefteprovodov diametrom do 1220 mm. Osnovnyye polozheniya.
12. **NAPB V.01.021-97/510.** Pravila pozharnoy bezopasnosti pri ekspluatatsii magistralnykh nefteprovodov Ukrainy.
13. **DNAOP 1.1.21-1.** Pravila bezopasnosti v neftegazodobyvayushchey promyshlennosti Ukrainy.
14. **RD-75.180.00-KTN-198-09.** Unifitsirovannyye tekhnologicheskyye raschety obyektov magistralnykh nefteprovodov i nefteproduktoprovodov
15. **DSTU 4219-2003.** Truboprovodi stalevi magistralni zagalni vimogi do zakhistu vid korozii.
16. **RD 39-0147103-354-89.** Tipovoye polozheniye o laboratorii. provodyashchey analizu nefiti pri priyemodatochnykh operatsiyakh.
17. **RMG 98-2010. GSI.** Poryadok metrologicheskogo i tekhnicheskogo obespecheniya promyshlennoy ekspluatatsii sistem izmereniy kolichestva i pokazateley kachestva nefiti. truboporshnevnykh ustanovok i sredstv v ikh sostave.
18. **RMG 115-2011. GSI.** Kalibrovka sredstv izmereniy. Algoritmy obrabotki rezultatov izmereniy i otsenivaniya neopredelennosti.
19. **RMG 87-2009. GSI.** Massa nefiti. Metodika vypolneniya izmereniy v gorizontalnykh rezervuarakh v sisteme magistralnogo nefteprovodnogo transporta. Osnovnyye polozheniya.
20. **DSTU GOST 31072:2006.** Nafta i naftoprodukti. Metod viznachennya gustini. vidnosnoi gustini ta gustini v gradusakh ARI areometrom.
21. **DSTU (GOST 33-2003) (ISO 3104-94).** Nefteprodukty. Prozhachnyye i neprozrachnyye zhidkosti. Opredeleniye kinemacheskoy vyazkosti i raschet dinamicheskoy vyazkosti.
22. **DSTU ISO 3016:2017 (ISO 3016:1994, IDT).** Nefteprodukty. Opredeleniye temperatury poteri tekuchesti.
23. **DSTU 3063-95.** Nasosi. Klasifikatsiya. Termini ta viznachennya.
24. **RD39-30-1339-85.** Agregaty elektronasosnyye. tsentrobezhnyye neftyanyye magistralnyye. Normy vibratsii (ekspluatatsionnyye).
25. **DSTU 2192-93.** Hidroprivodi ob'emni. Nasosi ob'emni ta gidromotori. Zagalni tekhnichni vimogi.
26. **ГОСТ 6134-87.** Насосы динамические. Методы испытаний.
27. **ГОСТ 10272-87.** Насосы tsentrobezhnyye dvustoronnego vkhoda. Osnovnyye parametry.
28. **RD 39-3-477-80.** Vremennaya metodika opredeleniya KPD nasosnykh agregatov magistralnykh nefteprovodov.
29. **DSTU 2709-94.** Avtomatizovani sistemi keruvannya tekhnologichnimi protsesami. Metrologichne zabezpechennya. Osnovni polozhennya.
30. **ОРММ-2 АСУ ТП.** Obshcheotraslevyye rukovodyashchiye metodicheskyye materialy po sozdaniyu i primeneniyu avtomatizirovannykh sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v otraslyakh promyshlennosti. GKNT.1981.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Князева Виктория Николаевна** – ассистент, Украинская инженерно-педагогическая академия, ассистент кафедры Теплоэнергетики и энергосберегающих технологий, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3106-4897>; e-mail: vitok911@ukr.net.

**Viktoria Kniazieva** – Assistant, Ukrainian Engineering Pedagogical Academy, Assistant of the Department of Power Engineering and Energy Saving Technologies, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3106-4897>; e-mail: vitok911@ukr.net.

**Канюк Геннадій Іванович** – доктор технічних наук, професор, Українська інженерно-педагогічна академія, професор кафедри Теплоенергетики і енергозберігаючих технологій, г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1399-9039>; e-mail: [art-studio\\_diana\\_@ukr.net](mailto:art-studio_diana_@ukr.net).

**Gennady Kanyuk** – Doctor of Technical Sciences, professor, Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Professor of the Department of Power Engineering and Energy Saving Technologies, Kharkov, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1399-9039>; e-mail: [art-studio\\_diana\\_@ukr.net](mailto:art-studio_diana_@ukr.net).

**Мезеря Андрій Юрьевич** – кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія доцент кафедри Теплоенергетики і енергозберігаючих технологій, г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2946-9593>; e-mail: [mezzer@mail.ru](mailto:mezzer@mail.ru).

**Andrey Mezerya** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy Associate Professor of the Department of Power Engineering and Energy Saving Technologies, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2946-9593>; e-mail: [mezzer@mail.ru](mailto:mezzer@mail.ru).

**Андреев Александр Витальевич** – кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія доцент кафедри Теплоенергетики і енергозберігаючих технологій, г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2601-1491>; e-mail: [vitok911@ukr.net](mailto:vitok911@ukr.net).

**Alexander Andreev** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy Associate Professor of the Department of Power Engineering and Energy Saving Technologies, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2601-1491>; e-mail: [vitok911@ukr.net](mailto:vitok911@ukr.net).

*Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Князева, В. Н.** Анализ нормативных документов по обеспечению эффективной работы насосных установок магистральных нефтепроводов / **В. Н. Князева, Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, А. В. Андреев** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 27-33. – doi: 10.20998/2413-4295.2019.05.04.

*Please cite this article as:*

**Kniazieva, V., Kanyuk, G., Mezerya, A., Andreev A.** Analysis of normative documents for ensuring efficient work of pumped installations of main oil pipelines. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), 27-33, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.04.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Князева, В. М.** Аналіз нормативних документів щодо забезпечення ефективної роботи насосних установок магистральних нафтопроводів / **В. М. Князева, Г. І. Канюк, А. Ю. Мезеря, О. В. Андреев** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 27-33. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.04.

**АНОТАЦІЯ** У статті наведена історія розвитку магистральних нафтопроводів України, яка є найбільшим транзитером газу і нафти в Європі. Проведено аналіз встановлених потужностей магистральних нафтопроводів України і потужностей, споживаних насосними установками нафтоперекачувальних станцій. Наведені відомості показують масштабність і актуальність задачі енергозбереження на об'єктах магистрального транспортування нафти України. Визначено, що зниження витрат енергії можливо шляхом розробки і впровадження систем автоматичного енергозберігаючого регулювання нафтоперекачувальних насосних установок і забезпечення максимальних значень коефіцієнтів корисної дії за рахунок оптимального регулювання частоти їх обертання. Проведено аналіз нормативної літератури, спрямованої на забезпечення ефективної роботи систем транспортування нафти магистральними нафтопроводами, а саме: експлуатація, управління, ремонт систем транспортування нафти і насосних установок, встановлених на нафтоперекачувальних станціях. Показано, що в існуючій нормативній документації недостатньо висвітлені питання забезпечення максимальної ефективності роботи насосних установок магистральних нафтопроводів в різних режимах експлуатації. З усіх існуючих нормативних документів фактично лише один спрямований на визначення ефективності роботи насосних установок нафтоперекачувальних станцій, при цьому в ньому відсутні рекомендації щодо підвищення ефективності та підтримці її на необхідному рівні. Поза увагою залишаються такі важливі науково-технічні аспекти проблеми, як оптимізація процесів керування насосними установками магистральних нафтопроводів за прямими критеріями мінімізації енергетичних втрат. Без уваги залишаються такі важливі науково-технічні аспекти проблеми, як оптимізація процесів керування насосними установками магистральних нафтопроводів за прямими критеріями мінімізації енергетичних втрат. Зроблено висновок, що для створення нормативної документації, яка б дозволила забезпечувати максимальну енергоефективність роботи насосних установок нафтоперекачувальних станцій необхідно виконання циклу теоретичних і експериментальних наукових досліджень, що включають математичне моделювання фізичних явищ в магистральних нафтопроводах, створення алгоритмів визначення ефективної роботи насосних агрегатів в режимі реального часу і алгоритмів підтримки цього режиму за заданих умов експлуатації.

**Ключові слова:** насосна установка; нормативне забезпечення; енергоефективність; нафтоперекачувальна станція; магистральний нафтопровід.

*Поступила (received) 28.02.2019*

УДК 629.1.02

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.05

## АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРИЧІПНИХ ТА НАПІВПРИЧІПНИХ ЦИСТЕРН У СКЛАДІ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ

А. П. КОЖУШКО\*

кафедра автомобіле- та тракторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

\*e-mail: Andreykozhusko7@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Мета роботи полягає в обґрунтуванні вибору машинно-тракторного агрегату з причеп- та напівпричеп-цистерною при формуванні динамічної моделі прямолінійного руху по складному рельєфу за рахунок комплексного підходу при аналізі сучасної сільськогосподарської техніки. В результаті обчислення коефіцієнту енергонасиченості колісних тракторів за критеріями однакового типорозміру передніх та задніх шин, а також діапазону зміни потужності двигуна  $200 \div 500$  к.с., наведено світові марки колісних тракторів: Claas, Case, New Holland, John Deere, ХТЗ та інші. На основі даного аналізу встановлено приналежність колісних тракторів з однаковим типорозміром шин до тягової або тягово-енергетичної концепції. Встановлено, що до тягово-енергетичної концепції відноситься значна більшість тракторів, тобто сучасні тракторовиробники не виключають умов експлуатації з паралельно працюючими приводами відбору потужності, наприклад, при виконанні транспортних або транспортно-технологічних операцій. Виконано аналіз світових виробників тракторних цистерн, які використовуються при транспортуванні рідини в сільськогосподарські угіддя. Встановлено можливий діапазон кількості рідини в цистерні залежно від конструктивних особливостей платформи (основи). В роботі відмічено, що більш популярним є платформа напівпричип-цистерна, проте для комплексного аналізу перерозподілу центру мас рідини в ємності необхідно розглянути як напівпричип, так і причип-цистерни. Окреслена конструкція ходової системи напівпричип-цистерни і причип-цистерни. Наведено спрощені динамічні моделі напівпричип- та причип-цистерни з встановленням керуючого впливу на загальну систему машинно-тракторного агрегату, зовнішнього збурення, реакції трактора та цистерни, а також вплив перерозподілу маси рідини в цистерні на колісний трактор. Висвітлено основні підходи щодо формування динамічної (нелінійної) моделі прямолінійного руху машинно-тракторного агрегату з напівпричип- і причип-цистернами. Описані компоненти динамічної моделі, які змінюються у вертикальній і поздовжній площинах, а також при кутових переміщеннях.

**Ключові слова:** машинно-тракторний агрегат; цистерна; колісний трактор; коливання; сталий рух; математична модель

## ANALYSIS OF DESIGN FEATURES TRAILED AND SEMITRAILER TANKS AS PART OF THE MACHINE-TRACTOR UNIT

А. КОЖУШКО

Department of Car and Tractor Industry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The aim of the work is to substantiate the choice of a machine-tractor unit with a landing gear and semi-trailer tanks when forming a dynamic model of rectilinear movement over complex terrain due to an integrated approach in the analysis of modern agricultural machinery. As a result of calculating the coefficient of energy saturation of wheeled tractors according to the criteria of the same size of the front and rear tires, as well as the range of engine power change  $200 \div 500$  hp, the world brands of tractors are given: Claas, Case, New Holland, John Deere, KhTZ and others. On the basis of this analysis, the belonging of wheeled tractors with the same tire size to the traction or traction energy concept was established. It was established that the overwhelming majority of tractors belong to the traction and energy concept, that is, modern tractor manufacturers do not exclude operating conditions with parallel operating power take-offs, for example, when performing transport or transport-technological operations. The analysis of global manufacturers of tractor tanks used in the transportation of fluids in agricultural lands was carried out. A possible range of the amount of fluid in the tank depending on the design features of the platform (wreck) has been established. It was noted that the semi-trailer tank platform is more popular; however, for a comprehensive analysis of the redistribution of the center of mass of the liquid in the tank, it is necessary to consider both the semi-trailer and the trailer tank. Suspension system semi-trailer tank and tank trailer is designated. Simplified dynamic models of semi-trailer and tank trailers with the establishment of the control action on the overall system of the machine-tractor unit, external disturbance, the reaction of the tractor and the tank, as well as the effect of the redistribution of fluid mass on the wheel tractor are given. The main approaches to the formation of a dynamic (non-linear) model of a straight-line movement of a machine-tractor unit with semi-trailers and tank trailers are highlighted. The components of the dynamic model, which vary in the vertical and longitudinal planes, as well as during angular displacements, are described.

**Keywords:** machine-tractor unit; tank; wheeled tractor; vibrations; constant movement; mathematical model

### Вступ

Сільське господарство сьогодні є однією з важливіших та перспективних платформ для

інвестицій, які надають стрімкий ріст економіки, як фермерського угіддя, так і в цілому держави. Розвиток агропромислового сектору направлено на створення нової техніки, модернізацію старої або



впровадження нових технологій. Ці інновації повинні підвищити технічний рівень агротехніки.

Сьогодні в фермерських господарствах машинно-тракторний агрегат виконує транспортні, транспортно-технологічні та технологічні операції (рис. 1). Особливий інтерес викликає дослідження при виконанні транспортних робіт, адже їх кількість може досягати позначки в 50%, залежно від загального обсягу робіт у фермерському господарстві.



Рис. 1 – Частковий вид робіт, який виконує машинно-тракторний агрегат

Як сказано вище, розподіл між технологічними та транспортними роботами може досягати 50%, тому доцільно виконати огляд операцій, які виконуються в сільському господарстві (рис.1). При транспортуванні виділяються такі типи вантажу: тверді та рідкі. Особливий інтерес викликає перевезення рідких вантажів, адже при такому транспортуванні спостерігається перерозподіл мас (коливання рідини в ємності), який призводить до поздовжньої та поперечної нестабільності, що, в свою чергу, веде до створення аварійних ситуацій – як наслідок, відбувається вплив на плавність руху, керованість, стійкість, маневреність, тощо [8]. Таким чином, дослідження впливу перерозподілу мас при перевезенні рідких вантажів в складі машинно-тракторного агрегату є актуальним.

У роботі [8] автори виділяють основні коливальні рухи оболонки, які впливають на перерозподіл мас в ємності, де на основі рівняння Стокса для ізотермічного руху ньютонівської в'язкої нестисливої рідини, а також формули Лапласа для сили поверхневого натягу, складають математичну модель низькочастотних коливань рідини і аналітичні вирази для власних частот. Для подальшого

### Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Існує ціла низка робіт [1–13], присвячених безпосередньо дослідженню машинно-тракторних агрегатів або фізіологічних потреб водія, як при виконанні тягових (технологічних), так і транспортних робіт. Дані наукові праці направлені на вирішення локальних або глобальних проблем в сільському господарстві.

дослідження динаміки прямолінійного руху машинно-тракторного агрегату з цистерною необхідно проаналізувати конструкцію причіпних пристроїв.

### Мета роботи

Метою дослідження є обґрунтування вибору машинно-тракторного агрегату з цистерною при формуванні динамічної моделі прямолінійного руху по складному рельєфу за рахунок комплексного підходу при аналізі сучасної техніки.

Для досягання окресленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- на основі дослідження сучасної колісної тракторної техніки виконати аналіз колісних тракторів за коефіцієнтом енергонасиченості;
- виконати аналіз конструктивних особливостей причіп- та напівпричип-цистерн, які використовуються при транспортуванні рідини;
- окреслити етапи формування динамічної моделі машинно-тракторного агрегату з цистерною.

### Виклад основного матеріалу

Сучасний темп розвитку тракторної техніки призвів до збільшення енергонасиченості, як колісної,

так і гусеничної техніки, що, в свою чергу, надав змогу аграріям підвищити масу агрегатної частини машинно-тракторного агрегату (в деяких випадках дана маса значно перевищує масу самого трактора).

Енергонасиченість прийнято визначати за коефіцієнтом енергонасиченості, який дає змогу встановлювати технічну концепцію та відповідність своєму призначенню за критерієм тягово-швидкісних властивостей

$$\Theta_{\text{тр}} = \frac{N_{\text{ном}}}{G}, \quad (1)$$

де  $N_{\text{ном}}$  – номінальна потужність двигуна внутрішнього згоряння;  $G$  – вага трактора.

При збільшенні потужності силової установки машинно-тракторного агрегату її реалізація може здійснюватися за рахунок збільшення швидкості руху або тягових характеристик, виникають збуджувальні перешкоди, які впливають на техніко-економічні та технічні показники, безпеку руху, тощо. Зважаючи на це, доцільно дослідити енергонасиченість сучасних колісних тракторів. Оскільки під таке формулювання аналізу припадає достатня кількість техніки, тоді дослідження буде відбуватися за критеріями однакового типорозміру передніх та задніх шин і діапазону зміни потужності 200 ÷ 500 к.с. Результати аналізу наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати дослідження енергонасиченості сучасних колісних тракторів

Модель трактора	Зображення трактора	Держава виробник	Номінальна потужність двигуна, к.с.	Показник енергонасиченості, кВт/кН	Тяговий клас	Типорозмір шин
ХТЗ-242К		Україна	240	2,02	4 – 6	23,1 R26
Versatile 2375		Канада	380	2,44	5 – 8	520/85 R42
Claas Xerion 4000		Німеччина	401	1,75	5 – 8	900/60 R42
Кіровоць К-744Р		РФ	350	1,94	5 – 8	28,1 R26
Case IH Steiger 335		Транснац. корпорація (Швейцарія)	340	1,89	8	20,8 R42
New Holland T 9020		Транснац. корпорація (США)	371	1,57	8	710/70 R42
John Deere 9330		Транснац. корпорація (США)	375	1,84	8	620/70 R42
Challenger MT900B		США	430	1,85	8	710/70 R42



Відома [9,10] наступна класифікація тракторів за величиною коефіцієнта енергонасиченості:

- 1,4 ... 1,7 – тягова концепція тракторів;

- 1,7 ... 2,3 – тягово-енергетична концепція (можливість обладнання техніки додатковими приводами відбору потужності).






Таким чином, дані з табл. 1 свідчать про те, що при аналізі колісних тракторів за критеріями однакового типорозміру передніх та задніх шин і діапазону зміни потужності 200 ÷ 500 к.с. до тягової концепції належить лише New Holland T 9020 (1,57 кВт/кН), а інші – до тягово-енергетичної. Такий розподіл показує, що сучасні тракторовиробники не виключають умов експлуатації з паралельно працюючими приводами відбору потужності.

Особливо доцільно використовувати такі трактори при виконанні транспортних та транспортно-технологічних операцій, зокрема, при перемішуванні рідкої рідини (суспензії або інших органічних добрив) в цистерні при виконанні транспортної операції, або при розкиданні твердих добрив при транспортно-технологічній операції.

Оскільки великого інтересу викликає перерозподіл мас в ємності необхідно дослідити конструктивні особливості причіп- та напівпричіп-цистерн, які використовуються спільно з машинно-тракторним агрегатом.

Аналіз тракторних цистерн виконано на основі конструкції ходової системи та об'єму, результати наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Різновид конструкцій тракторних цистерн

Виробник	Мінімальний та максимальний об'єм, м <sup>3</sup>				
					
Мерпрозет (Польща)	2,3 – 9	9 – 20	18 – 30	–	–
Joskin (Бельгія)	5 – 11	11 – 20,5	22,5 – 26	–	23,5
Garant Kotte (Німеччина)	5 – 12	12 – 20	22 – 25	–	20 – 28
Сопог (Ірландія)	5 – 11,7	14 – 17,5	–	–	–
Fliegl (Німеччина)	3 – 10,6	6,2 – 18	18 – 25	–	–
Stapel (Німеччина)	3 – 11,5	10 – 19,5	18,5 – 30	10	20
Wienhoff (Німеччина)	7 – 11,7	12 – 20,2	20 – 30	–	26,5 – 30
Samson (Данія)	–	16 – 20	21 – 35	–	20 – 25
Fuchs (Австрія)	6 – 10	10 – 18	24	–	–
Реесон (Німеччина)	3 – 13	7,5 – 20	21 – 24,5	–	–
BSA (Німеччина)	5 – 14	6 – 18,5	20 – 27	16	18 – 24
Thyregod (Данія)	12	15 – 20	20 – 24	–	–
NUHN (Канада)	1,1 – 5,68	7,2 – 34	24 – 35,96	–	–
Агронік (Фінляндія)	10 – 12	14 – 20	17 – 30	–	–
NC Engineering (Ірландія)	5 – 13,5	10 – 20	18,2 – 25	–	–
Mauguin Citagri (Франція)	4,3 – 11	12 – 16,7	21 – 32	–	–
Veenhuis (Голландія)	8 – 16	13,5 – 22	19,9 – 29,1	–	–
ЛУМРА (РФ)	3,1 – 10,9	8,3 – 18,2	20,4 – 26	–	–
МЖТ (Білорусь)	–	6 – 11	–	10	16
МЖУ (Білорусь)	–	16 – 20	–	–	–
РЗС (Україна)	6	11 – 16	30	–	–
ВНЦ (Україна)	6 – 10	10 – 20	20 – 30	–	–

На сьогоднішній день, відомо декілька типів конструктивних особливостей тракторних цистерн (ємностей), які використовуються компаніями при

проектванні. Це, насамперед, цистерни, які будуються на базі напівпричепа: одновісні, двовісні (Tandem axle), трьохвісні (Tridem), чотирьохвісні

(моделі: Jamesway Maxx-Trac Dura-Tech (15 – 38,6 м<sup>3</sup>), Garant Kotte Quadro (30 – 32 м<sup>3</sup>), «Завод Кобзаренка» ВНЦ-36 (36 м<sup>3</sup>) і т.д.), а також причепа: двовісні, тривісні. Ходова система напівпричіп- та причіп-цистерни схожа з тракторними напівпричепами (балансирна) та причепами (ресорна).

На основі проведеного аналізу встановлено, що більш популярними є напівпричіп-цистерни, проте задля комплексного аналізу перерозподілу центру мас в смності необхідно розглядати, як напівпричіп-, так і причіп-цистерни.

При описі етапів формування динамічної (нелінійної) моделі машинно-тракторного агрегату

обрано, як агрегатну частину, двовісний напівпричіп-цистерну та двовісний причіп-цистерну. Даний вибір обґрунтовується тим, що при подальшому додаванні осей в динамічну модель змінюється лише опис підресореної та непідресореної мас і незмінним залишається принцип дії збурювальних сил при перерозподілі центру мас.

На рис. 2 наведено спрощені схеми машинно-тракторного агрегату з причіп- та напівпричіп-цистерн задля формування динамічної моделі в площині поздовжніх коливань.

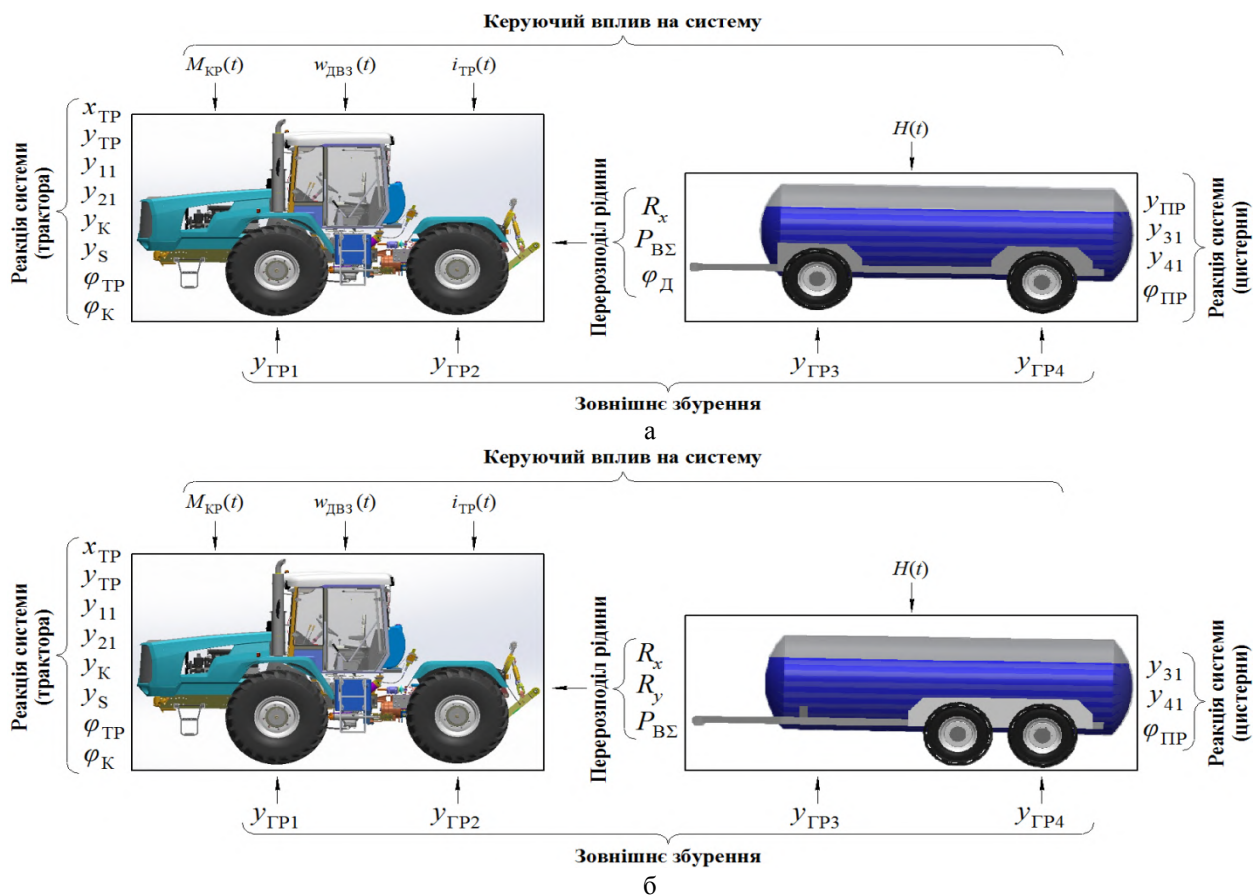


Рис. 2 – Динамічні моделі в поздовжній площині: а – причіп-цистерна; б – напівпричіп-цистерна

Формування динамічної моделі робиться на основі вирішення диференціальних рівнянь:  
– вертикальні переміщення

$$d^2 y_{ТР} / dt^2 = f(y_{11}, y_{21}, y_{К}, y_{S}, \varphi_{ТР}, \varphi_{К}, x_{ТР}); \quad (2)$$

– поздовжні переміщення

$$d^2 x_{ТР} / dt^2 = f(M_{кр}, i_{тр}, y_{ГРi}, P_{ВΣ}); \quad (3)$$

– кутові переміщення

$$d^2 \varphi_{ТР} / dt^2 = f(x_{ТР}, R_x, R_y), \quad (4)$$

де  $y_{11}, y_{21}, y_{К}, y_{S}$  – вертикальне переміщення мостів трактора, кабіни та сидіння водія;  $\varphi_{ТР}, \varphi_{К}$  – кут нахилу остову трактора та кабіни;  $x_{ТР}$  – поздовжнє переміщення трактора;  $M_{кр}$  – крутний момент двигуна внутрішнього згоряння;  $i_{тр}$  – передавальне число трансмісії трактора;  $y_{ГРi}$  – функція, яка описує зміну мікропрофілю та макропрофілю дороги;  $P_{ВΣ}$  – нелінійна характеристика сили, що створюється коливанням рідини в цистерні;  $R_x, R_y$  – поздовжня та вертикальна складова сили, яка прикладена до диска з боку гаку трактора.

### Обговорення результатів

Дана стаття є, в більшій мірі, оглядовою та аналітичною. На основі визначення конструктивних особливостей цистерн, що використовуються в фермерських угіддях, а також формування етапів побудови динамічної (нелінійної) моделі машинно-тракторного агрегату, автор планує розробити рекомендації щодо забезпечення функціональної стабільності машинно-тракторних агрегатів.

### Висновки

У роботі окреслено основні конструктивні особливості світових виробників цистерн, які використовуються при транспортуванні рідини в сільськогосподарському угідді. Наведено діапазон зміни об'ємів цистерн в залежності від конструкції платформи цистерни.

За рахунок обчислення коефіцієнту енергонасиченості за критеріями однакового типорозміру передніх та задніх шин, а також діапазону зміни потужності двигуна 200 ÷ 500 к.с. висвітлено світові марки колісних тракторів.

Наведено основні підходи формування динамічної (нелінійної) моделі прямолінійного руху машинно-тракторного агрегату з напівпричіп- та причіп-цистерною.

### Список літератури

1. **Mehta, C. R.** Biomechanical model to predict loads on lumbar vertebra of a tractor operator / **C. R. Mehta, V. K. Tewari** // *International Journal of Industrial Ergonomics*. – 2015. – № 47. – P. 104-116. – doi: 10.1016/j.ergon.2015.02.006.
2. **Juostas, A.** Investigation of tractor engine power and economical working conditions utilization during transport operation / **A. Juostas, A. Janulevičius** // *Transport*. – 2008. – № 23 (1). – P. 37-43. – doi: 10.3846/1648-4142.2008.23.37-43.
3. **Кальченко, Б. І.** Методологічні засади створення сімейства тракторів загального призначення / **Б. І. Кальченко, А. П. Кожушко** // *Автомобильный транспорт*. – 2018. – № 42. – С. 53-60. – doi: 10.30977/AT.2219-8342.2018.42.0.53.
4. **Кальченко, Б. І.** Дослідження динамічної стійкості та плавності руху колісних тракторів / **Б. І. Кальченко, А. П. Кожушко** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 44 (1266). – С. 110-115.
5. **Bettle, J.** A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle on a bridge in cross-wind / **J. Bettle, A. G. L. Holloway, J. E. S. Venart** // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2003. – № 91 (5). – P. 573-592. – doi: 10.1016/S0167-6105(02)00461-0.
6. **Scarlett, A. J.** Whole-body vibration: evaluation of emission and exposure levels arising from agricultural tractors / **A. J. Scarlett, J. S. Price, R. M. Stayner** // *Journal of terramechanics*. – 2007. – № 44 (1). – P. 65-73. – doi: 10.1016/j.jterra.2006.01.006.
7. **Servadio, P.** Analysis of driving seat vibrations in high forward speed tractors / **P. Servadio, A. Marsili, N. P.**

- Belfiore** // *Biosystems engineering*. – 2007. – № 97 (2). – P. 171-180. – doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.03.004.
8. **Кожушко, А. П.** Математичне моделювання вільних і вимушених коливань рідини в горизонтальній ємності з вільною поверхнею / **А. П. Кожушко, О. Л. Григор'єв** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – №3(1279). – С.41-51.
9. **Ребров, А. Ю.** Определение рациональной энергонасыщенности пахотного мта на базе колесного сельскохозяйственного трактора / **А. Ю. Ребров, В. Б. Самородов, В. В. Кучков** // *Механика та машинобудування*. – 2011. – № 1. – С. 136-140.
10. **Лебедев, А. Т.** Некоторые проблемы теории трактора тяговоэнергетической концепции / **А. Т. Лебедев** // *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ*. – Х.: ХНТУСГ. – 2012. – С. 5-13.
11. **Janulevicius, A.** Engine working modes during tractors operational period / **Variklio darbo rezimai traktoriu eksploatacijos metu** / **A. Janulevicius, A. Juostas, G. Pupinis** // *Mechanika*. – 2010. – № 3 (83). – P. 58-64.
12. **Marsili, A.** PM—Power and Machinery: Innovative Systems to reduce Vibrations on Agricultural Tractors: Comparative Analysis of Acceleration transmitted through the Driving Seat / **A. Marsili, L. Ragni, G. Santoro, P. Servadio, G. Vassalini** // *Biosystems engineering*. – 2002. – № 81(1). – P. 35-47. – doi: 10.1006/bioe.2001.0003.
13. **Miao, M.** Hydromechatronically-integrated simulation on tractor suspension systems / **M. Miao, Z. H. Wang, S.D. Gao, H. F. Liu, J. J. Mou** // *Chinese Journal of Construction Machinery*. – 2012. – № 10 (3). – P. 286-290.

### Bibliography (transliterated)

1. **Mehta, C. R., Tewari, V. K.** Biomechanical model to predict loads on lumbar vertebra of a tractor operator. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2015, **47**, 104-116, doi: 10.1016/j.ergon.2015.02.006.
2. **Juostas, A., Janulevičius, A.** Investigation of tractor engine power and economical working conditions utilization during transport operation. *Transport*, 2008, **23**(1), 37-43, doi: 10.3846/1648-4142.2008.23.37-43.
3. **Kalchenko, B. I., Kozhushko, A. P.** Metodolohichni zasady stvorennia simeistva traktoriv zahalnoho pryznachennia [Methodological foundations for the creation of a family of general purpose tractors]. *Avtomobilnyy transport [Automobile transport]*, 2018, **42**, 56-60, doi: 10.30977/AT.2219-8342.2018.42.0.53.
4. **Kalchenko, B. I., Kozhushko, A. P.** Doslidzhennia dynamichnoi stiičnosti ta plavnosti rukhu kolisnykh traktoriv [Research dynamic stability and vibration while driving wheeled tractor]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI» [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]*, 2017, **44**(1266), 110-115.
5. **Bettle, J., Holloway, A. G. L., Venart, J. E. S.** A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle on a bridge in cross-wind. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, **91**(5), 573-592, doi: 10.1016/S0167-6105(02)00461-0.
6. **Scarlett, A. J., Price, J. S., Stayner, R. M.** Whole-body vibration: evaluation of emission and exposure levels arising from agricultural tractors, *Journal of terramechanics*, 2007, **44**(1), 65-73, doi: 10.1016/j.jterra.2006.01.006.
7. **Servadio, P., Marsili, A., Belfiore, N. P.** Analysis of driving seat vibrations in high forward speed tractors, *Biosystems engineering*, 2007, **97**(2), 171-180, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.03.004.

8. **Kozhushko, A. P., Hryhoriev, A. L.** Matematychno modelivannia vilnykh i vymushenykh kolyvan ridyny v horyzontalній yemnosti z vilnoiū poverkhneiū [Modeling of coupled oscillations of a wheeled tractor and cistern during operation]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI» [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]*, 2018, 3(1279), 41-51.
9. **Rebrov, A. Yu., Samorodov, V. B., Kuchkov, V. V.** Opredelenie ratsionalnoy energonasyishennosti pahotnogo mta na baze kolesnogo selskohozyaystvennogo traktora [Determination of rational energy saturation of arable mta on the basis of a wheeled agricultural tractor]. *Mekhanika ta mashynobuduvannia [Mechanics and machine building]*, 2011, 1, 136-140.
10. **Lebedev, A. T.** Nekotorye problemy teorii traktora tyagovoenergeticheskoy kontseptsii [Some problems of the theory of tractor traction energy concept]. *Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva: Visnyk KhNTUSH [Mechanization of agricultural production: Journal KNTUA]*, 2012, 5-13.
11. **Janulevicius, A., Juostas, A., Pupinis, G.** Engine working modes during tractors operational period / Variklio darbo rezimai traktoriu eksploatacijos metu. *Mechanika*, 2010, 3(83), 58-64.
12. **Marsili, A., Ragni, L., Santoro, G., Servadio, P., Vassalini, G.** PM – Power and Machinery: Innovative Systems to reduce Vibrations on Agricultural Tractors: Comparative Analysis of Acceleration transmitted through the Driving Seat. *Biosystems engineering*, 2002, 81(1), 35-47, doi: 10.1006/bioe.2001.0003.
13. **Miao, M., Wang, Z. H., Gao, S. D., Liu, H. F., Mou, J. J.** Hydromechatronically-integrated simulation on tractor suspension systems. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2012, 10(3), 286-290.

#### Відомості про автора (About the Authors)

**Кожушко Андрій Павлович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри автомобіле- та тракторобудування; м. Харків; Україна; ORCID: 0000-0002-4725-5911; e-mail: Andreykozhushko7@gmail.com.

**Andriy Kozhushko** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associated Professor at the Department of Car and Tractor Industry; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4725-5911; e-mail: Andreykozhushko7@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Кожушко, А. П.** Аналіз конструктивних особливостей причіпних та напівпричіпних цистерн у складі машинно-тракторного агрегату / **А. П. Кожушко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 34-40. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.05.

*Please cite this article as:*

**Kozhushko, A.** Analysis of design features trailed and semitrailer tanks as part of the machine-tractor unit. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), 34-40, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.05.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Кожушко, А. П.** Анализ конструктивных особенностей прицепа и полуприцепа цистерн в составе машинно-тракторного агрегата / **А. П. Кожушко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 34-40. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.05.

**АННОТАЦІЯ** Цель работы заключается в обосновании выбора машинно-тракторного агрегата с прицеп- и полуприцеп-цистернами при формировании динамической модели прямолинейного движения по сложному рельефу за счет комплексного подхода при анализе современной сельскохозяйственной техники. В результате вычисления коэффициента энергонасыщенности колесных тракторов по критериям одинакового типоразмера передних и задних шин, а также диапазона изменения мощности двигателя 200 ÷ 500 л.с., приведены мировые марки тракторов: Claas, Case, New Holland, John Deere, ХТЗ и другие. На основе данного анализа установлена принадлежность колесных тракторов с одинаковым типоразмером шин к тяговой или тягово-энергетической концепции. Установлено, что к тягово-энергетической концепции относятся подавляющее большинство тракторов, то есть современные производители тракторов не исключают условий эксплуатации с параллельно работающими приводами отбора мощности, к примеру, при выполнении транспортных или транспортно-технологических операций. Выполнен анализ мировых производителей тракторных цистерн, используемых при транспортировке жидкости в сельскохозяйственных угодьях. Установлен возможный диапазон количества жидкости в цистерне в зависимости от конструктивных особенностей платформы (остова). В работе отмечено, что более популярным является платформа полуприцеп-цистерна, однако для комплексного анализа перераспределения центра масс жидкости в емкости необходимо рассмотреть как полуприцеп, так и прицеп-цистерны. Обозначена конструкция ходовой системы полуприцеп-цистерны и прицепа-цистерны. Приведены упрощенные динамические модели полуприцеп- и прицеп-цистерны с установившемся управляющим воздействием на обобщенную систему машинно-тракторного агрегата, внешнего возмущения, реакции трактора и цистерны, а также влияние перераспределения массы жидкости в цистерне на колесный трактор. Освещены основные подходы к формированию динамической (нелинейной) модели прямолинейного движения машинно-тракторного агрегата с полуприцеп- и прицеп-цистернами. Описаны компоненты динамической модели, которые изменяются в вертикальной и продольной плоскостях, а также при угловых перемещениях.

**Ключевые слова:** машинно-тракторный агрегат; цистерна; колесный трактор; колебания; постоянное движение; математическая модель.

Надійшла (received) 14.02.2019

УДК 621.757:621.7.08

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.06

## INFLUENCE OF STRUCTURAL COMPONENTS PLACEMENT ON CASTING TECHNOLOGICAL DAMAGES FORMATION

J. M. KUSYJ<sup>1\*</sup>, V.G. TOPILNYTSKYJ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mechanical Engineering Department, National University «Lviv Polytechnic», Lviv, UKRAINE

<sup>2</sup> Machines Designing and Exploitation Department, National University «Lviv Polytechnic», Lviv, UKRAINE

\*e-mail: jarkym@ukr.net

**ABSTRACT** The technological processes designing main criterion are identified. The reliability parameters: infallibility, durability, repairability, preservation are described with machine part life cycle's substages and stages are described. The reliability support principles of difficult engineering systems for mechanical engineering production are analyzed. The insufficient researches level regarding influence of casting's structural components on defects formation on it surface is argued. The reliability varieties are considered, its place in the machine part life cycle's structure is identified and mathematical dependences for potential reliability definition are suggested. Inexpediency of potential reliability using as the part condition forecasting's criterion during it machining is justified. The blanks operations importance in the technological process planning structure of cast blanks is confirmed. The mathematical dependence for technological processes infallible implementation's estimated probability (the technological process reliability coefficient) is confirmed. The defects types and its formation mechanisms for blanks are analyzed. The casting defects main types: burnt-on sands, cavities, flashes and cracks are characterized. The deficiencies role as surface layer's infringements during parts work in machine is installed. The parameters for the deficiencies control according to ISO 8785: 1998 are presented. The metal destruction phases during machining are considered. It is installed that big angle grains boundaries have an important role in technological damages and processes of alloys destruction situating between grains boundaries formation. The material damageability degree evaluation's modern conceptions as the operating time result of direct and indirect measurements are considered and its main deficiencies are specified. The LM-hardness method for definition of the castings damageability  $W$  as part infallibility parameter is presented. The technological fixture and the experimental researches execution and implementation technique are described. The received results justification and analysis are presented. The further researches directions are scheduled.

**Keywords:** technological process; reliability; infallibility; casting; technological damage; damageability

## ВПЛИВ РОЗМІЩЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ НА ФОРМУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ВИЛИВКА

Я. М. КУСИЙ<sup>1</sup>, В.Г. ТОПІЛЬНИЦЬКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> кафедра технології машинобудування, Національний університет "Львівська політехніка", Львів, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра проектування та експлуатації машин, Національний університет "Львівська політехніка", Львів, УКРАЇНА

**АНОТАЦІЯ** Встановлено основні критерії проектування технологічних процесів. Описано зв'язок показників надійності: безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності, збережливості із етапами та стадіями життєвого циклу виробу. Проаналізовано принципи забезпечення надійності складних технічних систем для машинобудівного виробництва. Аргументовано на недостатньому рівні досліджень стосовно впливу розміщення конструктивних елементів виливка на формування дефектів на його поверхні. Розглянуто різновиди надійностей, встановлено їх місце у структурі життєвого циклу виробу та приведено математичні залежності для визначення потенційної надійності. Обґрунтовано недоцільність використання потенційної надійності в якості критерію прогнозування стану виробу під час його виготовлення. Підтверджено вагомість заготівельних операцій у структурі технологічних процесів механічного оброблення литих заготовок. Приведено математичну залежність для оцінки ймовірності безвідмовного здійснення технологічного процесу (коефіцієнта надійності технологічного процесу). Проаналізовано види дефектів і механізми їх формування для виливків. Охарактеризовано основні види дефектів литва: пригари, раковини, заливини та тріщини. Встановлено роль вад як порушень поверхневого шару при роботі деталей в складі виробів. Представлено параметри для контролю вад згідно ISO 8785: 1998. Розглянуто етапи руйнування металу під час обробки різанням. Встановлено, що важливу роль у формуванні технологічних пошкоджень і процесах міжзереного руйнування сплавів мають великокутові границі зерен. Розглянуто сучасні концепції оцінки ступеню пошкоджуваності матеріалу як напрацювання за результатами прямих і непрямих вимірювань та вказано їх основні недоліки. Представлено метод LM-твердості для визначення пошкоджуваності виливків  $W$  як характеристики безвідмовності виробу. Описано технологічне оснащення та методику проведення і здійснення експериментальних досліджень. Представлено обґрунтування та проаналізовано отримані результати. Намічено шляхи подальших досліджень.

**Ключові слова:** технологічний процес; надійність; безвідмовність; лита заготовка; технологічне пошкодження; пошкоджуваність

### Introduction

The main criteria of technological process planning are specifications support and minimum parts

manufacturing cost. The reliability parameters, which are occurred during parts exploitation, are usually disregarded [1-5].

The reliability parameters: infallibility, durability, repairability, preservation connect with all machine part life cycle's substages and stages in particular and machines as a whole (fig. 1). The reliability parameters are laid at the parts designing. The reliability parameters are supplied at the parts manufacturing. The reliability parameters are appeared at the parts exploitation. Therefore the reliability problem is comprehensive [1, 2].

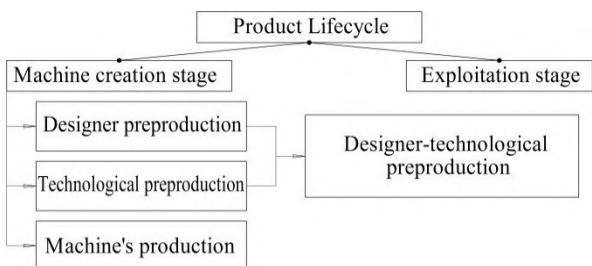


Fig. 1 – Product Lifecycle's stages and substages

On the mechanical engineering development's modern stage the reliability problem becomes actual in connection with designs complication, products machining and assembles, tasks soluble responsibility increasing. The successful decision of this problem depends on the organisational, technical, information and methodological quality components (fig. 2) [3]

Organisational ensuring realises the plans and works complex to reliability parameters, the technical services organisation, economic-legal and administrative mutual relations between machines customer, designer and manufacturer.

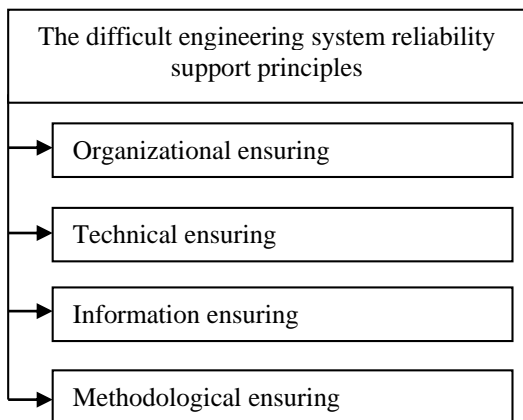


Fig. 2 – The difficult engineering system reliability support principles

Technical ensuring is defined by the branch fitting-out using of applied software, experimental and industrial base, technology perfection, diagnostics and control.

Information ensuring is means and the directions of the collection, accumulation, processes, analysis and using data about systems, failure and defects analysis results design and exploitation processes.

Methodological ensuring covers a theoretical base and engineering-applied methods of systems reliability analysis on the machine life cycle's stages.

At the same time the influence of casting structural components placement on it surface layer defects formation is investigated less. Moreover the technique of technological damages quantitative definition both on casting operation, and during the technological process planning. Therefore these questions require further fundamental theoretical and experimental researches.

**The investigation purpose**

The investigation purpose is the casting structural components influence's analysis on the machines details reliability parameters ensuring.

**The main part**

Technological process has direct and important influence on reliability parameters. However these communications are difficult, multi-stage and also not obvious (fig. 3) [1-3].

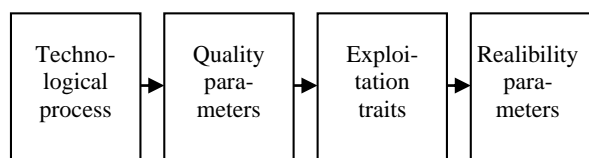


Fig. 3 – The dependence scheme of the reliability parameters about the technological process level

Insufficient quality of the part conception development processes and its production's preparation results in 80% of all defects emerging during production and parts using. The wrong, hasty and uncompleted technology design and technical requirements non-observance cause about 60% of all failures arising during part's warranty period [2, 3].

Therefore, ISO 9001:2008 standard underlines the all actions integration. At the same time, the works gravity centre is transferred from function to a process that guaranteed the management's unity, the organizational culture improvement and allows PLM technologies to be effectively implemented [2,3].

The modern reliability theory is based on fundamental mathematics and natural sciences laws [5-10].

There are potential, actual and reliable reliability from technological contention. Potential reliability laid at the design preproduction and technological preproduction. Actual reliability is supplied at the production substage. Exploitation reliability is displayed at the part exploitation stage depending on particular conditions [3].

The tasks, which require a prime definition, are the priority reliability characteristics establishing, its quantitative definition development and part behaviour's forecasting both at the machine creation stage, and at the exploitation stage.

The part potential reliability defines it maximally reliability achievable value [3]:

$$P_0 = P_d \cdot P_{elem} \cdot P_{prod}, \quad (1)$$

where  $P_d$ ,  $P_{elem}$ ,  $P_{prod}$  – potential, respectively, the design, furnishing elements and production processes reliability.

The potential design reliability  $P_d$  is the fact probability that requirements specification which stated in standard documentation specifications remain within the given parameters limits, if sudden failure does not take place.

The potential furnishing elements reliability  $P_{elem}$  is the fact probability that the elements will work properly during determined time at given power modes and the exploitation conditions:

$$P_{elem} = k_i \cdot k_c \cdot k_e, \quad (2)$$

where  $k_i$  – coefficient accounting given type elements failure intensity for determined period;  $k_c$  – coefficient accounting exploitation conditions (temperature, humidity etc.);  $k_e$  – coefficient characterising the equipment's type (power, elevating etc.).

The production processes potential reliability  $P_p$  is defined as the probability that individual technological operations are completed without allowable defects.

In real exploitation conditions, the gap between potential and practical reliability is appreciably given the hidden and obvious defects (40–85 % of the total). These defects are laid down at the machine creating stage (fig. 1), which cause failure during the exploitation stage [1-3].

In this regards potential reliability shouldn't be considered as the machine part condition forecasting's criterion during it manufacturing.

Therefore the interrelations criteria establishing between technological parameters on the substages of machine creation stage and reliability characteristics are the mechanical engineering's important task.

The blanking operation's role is not enough taken into account at modern technological process designing from the reliability position [2,3]. The blanks structure and property should be considered in close combination with the metal heredity from liquid condition. Only 25% of charge's properties are transferred to the blank. Other 75 % are formed during alloy pouring and curing upon cooling [2,3].

Therefore the reliability parameters formation's analysis on blanking operations has a significant influence to machine parts manufacturing by cutting.

The technological processes infallible implementation's estimated probability (the technological process reliability coefficient) will be described including blanking operations [1]:

$$P(t) = \prod_{i=1}^m [1 - (1 - P_0) \cdot (1 - P_{x_i}) \cdot (1 - P_k)], \quad (3)$$

where  $P_0(t)$ ,  $P_{x_i}(t)$  – the technological process performance's probability on blanking and intermediate operations (the reliability coefficient on blanking and intermediate operation),  $P_k$  – the parts rejection absence's probability on control operations (the reliability coefficient on control operations).

Hence, the technological processes infallible implementation's estimated probability  $P(t)$  straight depends on the technological process performance's probability on blanking and intermediate operations  $P_k$ ,  $P_{x_i}(t)$  and parts rejection absence's probability on control operations  $P_k$ .

The physical and chemical heterogeneity which are formed during blank's solidification, is transformed into damages or defects at technological cutting as a structural heredity result in determined cases [2-10].

The castings defects are diverse. Some of them particularly formed on surfaces adjoining with gas phase, by their essence relate to natural roughness. Considerably lot of surface layer's heterogeneities is connected with processes occurring on the firm phase and foundry forms boundaries. Their formation depends on the casting method and the liquid material properties [11,12].

The burnt-on sands, cavities, flashes and cracks are the main blanking's defects.

The burnt-on sand is the metal surface's defect as difficult separated layer on casting which is formed as the form material chemical and physical interaction's result with metal and his oxides.

The gas cavity is displayed as cavity formed with gases allocated from melt

The flash is a defect which results from liquid metal's hit to backlash between the casting crust and the crystallizer wall which is formed owing to the meniscus twist in their contact area.

Hot crack is defect as surface breakage arising during melt solidification.

Cold cracks arise at temperatures lying below metal transition temperature from the plastic deformations area to elastic area.

The medium's aggressive factors impact, working loads, wear and corrosion result to surface layer destruction. Morphology formed structures is connected closely with the surface layer degradation's mechanisms. It allows solving diagnostic tasks according to technical objects current condition's appreciation [11].

The surface layer infringement at parts work consisting of machine from the reasons not connected with operational factors, as well as at transport, storage and assembling, is attributed to flaws. Their presence and characteristics are also specified and are applied for the parts appropriateness evaluation to further operation.

The flaws are named by surface layer local geometrical heterogeneities formed by inadvertent or random impact.

The flaws can be displayed in any asperity deviations dimensional level. Pursuant to ISO 8785:1998



they are considered as surface recesses scale's independent differentiated on morphology, camber and combined relief elements.

Recess represents defect located below nominal surface. Among them they allocate following heterogeneities types: groove, scratch, crack, blowhole, wane, dent and others.

Cambers are relief elements formed with material located higher than nominal surface. Their modifications are presented by following types: flash, buckle, scale, deposits and others.

The combined flaws can lie both above, and below nominal surface. They involves crater, lap, scoring.

The flaws presence's admissibility depends on the surface functional assignment and their characteristics - length, depth, width, height, relative density of the arrangement etc. These parameters are defined by simple measurements on the following definitions basis (ISO 8785:1998) [11]:

surface imperfection length  $SIM_l$  – greatest dimension of the surface imperfection, measured parallel to the reference surface;

surface imperfection width  $SIM_w$  – greatest dimension of the surface imperfection, measured normal to the surface imperfection length and parallel to the reference surface;

single surface imperfection depth  $SIM_{sd}$  – greatest depth of the surface imperfection, measured from and perpendicular to the reference surface;

combined surface imperfection depth  $SIM_{cd}$  – greatest depth of the surface imperfection, measured from and perpendicular to the reference surface;

single surface imperfection height  $SIM_{sh}$  – greatest height of the surface imperfection, measured from and perpendicular to the reference surface;

combined surface imperfection height  $SIM_{ch}$  – distance between the reference surface and the upper most point of the surface imperfection, measured from and perpendicular to the reference surface;

surface imperfection area  $SIM_a$  – area of a single surface imperfection projected onto the reference surface;

total surface imperfection area  $SIM_t$  – area equal to the sum of the individual surface imperfection areas, within the agreed limits of discrimination;

surface imperfection number  $SIM_n$  – number of surface imperfection on the total real surface, within the agreed limits of discrimination;

number of surface imperfections per unit area  $SIM_n/A$  – number of surface imperfections on the specified surface imperfection evaluation area  $A$ .

The destruction process includes following substages:

1) damages accumulation and material integrity infringements in the voltage formation and deformations area;

2) the tiny cracks development in defect medium ;

3) cracks development and material particles separation at unit loads and motions given on preparation boundaries.

The grains boundaries with big angles have determining role in technological damages formation and alloys destruction between grains boundaries. The various origin distribution boundaries influence to deformation processes and alloys destructions isn't explored. To a considerable extent it is due to failure to take account in existing models the structure boundaries grains and border grains zones structural-phase condition [2].

In practice of the materiology and the mechanical engineering are known methods of the material degree evaluation damageability as the operating time result by direct (methods of weighing, metalgrafia etc.) and indirect (electric resistance, acoustic emission etc.) measurements of metal mechanical specifications without destruction [2,12]. The specified ways application for material degradation evaluation as a damages accumulation result during operating time is followed by big errors, as correlation between measured parameters and specifications of structural-phase condition for wide nomenclature of materials ambiguous and is not investigated thoroughly.

From known evaluation methods the most appropriate is material hardness measurement method on determined stages of the operating time. After that, taking into account mechanical specifications correlations, in particular hardness, with structure parameters, material damageability evaluate degree. This method is noninformative and inexact, as between material hardness and it technological damageability correlation weak and not is not always unambiguous.

Therefore necessity in method's development of the material structure evaluation's degradation as a damages accumulation result during the operating time arose which would allow to provide informativeness and accuracy.

The samples structure condition's surveillance quality on the one hand and material's damage of in under study part of samples on the other hand can be carried out by method of LM-hardness developed under the academician A. A. Lebedev direction. By the evaluation criterion not absolute physical quantities values serve, and their derivatives, for example, dissipation of received results of the control performed by the same devices in identical conditions [2]. LM - hardness method is easier to realise, applying as mechanical specification hardness on Rockwell. The hardness value is used for parameters indirect evaluation by the structure and other properties.

Homogeneity serves of parameter which integrated describes material condition during the hardness control results processing. Homogeneity is described Vejbull's coefficient  $m$  on Gumbel's known formula [2,13]. Big numerical values of coefficient  $m$  concern hardness sizes dispersion's low level, the damageability lowest degree; smaller values, according to logic, define a damageability high degree [2,13].

The Weibull distribution is described by [2,13]:

$$P(\sigma) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{k}\right)^m}, \quad (4)$$

The Weibull's homogeneity coefficient is defined to mathematical dependence:

$$m = \frac{d(n)}{2,30259 \cdot S(\lg(H))}, \quad (5)$$

where  $d(n)$  is characteristic, which is pegged to the measurements amount  $n$ ;

$$S(\lg(H)) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\lg(H_i) - \overline{\lg(H)})^2}, \quad (6)$$

$$\overline{\lg(H)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \lg(H_i). \quad (7)$$

In researches [2,13] is offered to evaluate the material structure analysis on it damageability  $W$ :

$$W = \frac{m_{\max} - m_i}{m_{\max}}, \quad (8)$$

where  $m_i$  is the Weibull homogeneity coefficient's value on  $i$ -th lines (planes);  $m_{\max}$  is the maximum Weibull homogeneity coefficient's value for determined measurements series.

However, if unknown microhardness values distribution on sample height (to priority of metal corium hardening), the damageability value of  $W$  is inexpedient to operate. Then the material structural condition's evaluation is implemented on the Weibull homogeneity coefficient's value.

Experimental researches led for casting components analysis influences of the technological damageability formation, as part infallibility parameter.

In sand mold the blank (sizes 165x155x22 mm, material AK21M2,5H2,5 GOST 1853-93) was cast (fig. 4). After crystallization the blank was divided in three samples: with small and big risers and with gate.



Fig. 4 – The samples for experimental researches: 1 - with small riser; 2 - with gate; 3 - with big riser

Samples end surfaces were processed on universal-milling machine tool 676 ( $t = 0,2-2$  mm;  $S_{XB} = 42$  mm/min;  $n = 640$  min<sup>-1</sup>) by end milling cutter  $\varnothing 45$  mm ( $z = 2$ ). Two machining series were carried out. The

control of surface layer parameters was implemented after each machining.

The hardness was measured in five cross-sections on distances 2, 4, 7, 12, 17 mm from the casting's surface (on 30 values) after machining. The measurements implemented for samples 1, 2 (fig. 4) on the device TP-5006 GOST 23677-79 on N's scale by means of ball  $\varnothing 3,175$  with load 588,4 H.

The Weibull homogeneity coefficient ( $m$ ) was computed by equations (5-7). The casting material damageability  $W$  was calculated by equation (8) in medium Mathcad 15 by researches results. The change of damageability  $W$  according sample's thickness is presented on the fig. 5.

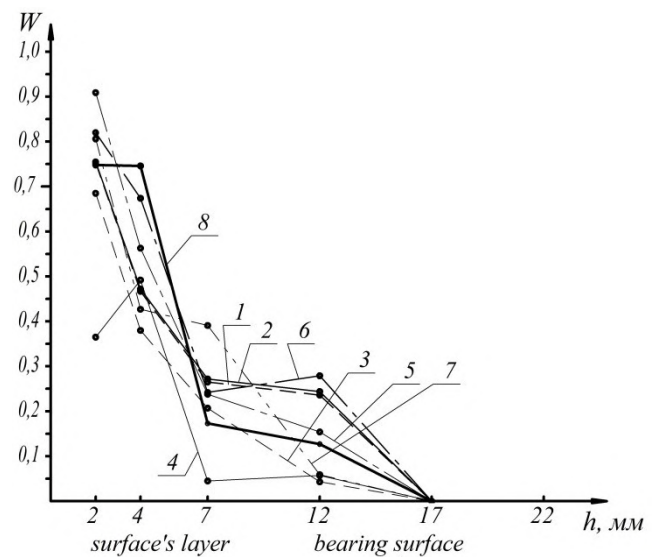


Fig. 5 – The material damageability dependence's schedule  $W$  according thickness of samples 1 and 2 (fig. 4): 1, 2 - from small riser fellow for the first and second experience series respectively; 3, 4 - from opposite end surface from riser a fellow for first and second experience series respectively; 5, 6 - for gate from small riser a fellow for the first and second experience series respectively; 7, 8 - for gate from big riser for the first and second experience series

### The results discuss

The casting damageability structure's experimental researches results showed.

1. The maximum technological damages quantity takes place for the material's zones at a depth up to 2 mm from surface for sample with gape: more - on the small riser's part, less - on the big riser's part. It is due to specific features of the material hardening process, impurities presence, heterogeneities in surface layer and cavity biased from symmetry axis to the small riser's direction. Results are confirmed by least Weibull homogeneity coefficient's values ( $m$ ), as well as the damageability largest values  $W$ . The Weibull homogeneity coefficient ( $m$ ) is more for

sample with small riser, and the damageability value  $W$  is less. It is due to growth of the distance from gate.

2. The damageability stabilisation observed for sample with small riser for the first and second experience series at moving deep into material from 2 to 4 mm. At the same time in the cross-section from gate the damageability is more. It evidences about form design elements influence of to impurities and heterogeneities on casting section distribution. Damageability grows for sample with gate at moving to shrinkage cavity (the second experience series).

3. The damageability values stabilisation takes place at a sample's depth from 4 to 17 mm. It is confirmed by growth of the Weibull homogeneity coefficient's values ( $m$ ) and approach to the cross-section with quick melt's solidification.

### Conclusions

The main conclusions are made on the held researches grounds.

1. The technological damages evaluation in parts surface layers on blanking operations and after machining is expedient to lead on the hardness characteristics dispersion degree.

2. Parameter of technological damageability  $W$  is offered for the first time as criterion for the parts infallibility evaluation at the machine creation stage.

3. Further research are expedient to extend on more wide parts and materials nomenclature, to introduce a given technique to modern mechanical engineering production's practice.

### Список літератури

1. **Кусий, Я. М.** Розроблення методу вібраційно-відцентрового зміцнення для технологічного забезпечення безвідмовності деталей машин / **Я. М. Кусий, А. М. Кук** // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2015. Т. 1, № 7 (73). – С. 41-51. – doi: 10.15587/1729-4061.2015.36336.
2. **Кусий, Я. М.** Вплив технологічного маршруту оброблення на формування міжзеренної пошкоджуваності виливків / **Я. М. Кусий, О. А. Кузін, М. О. Кузін** // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2016. – 1/ 5 (79). – С. 39-47. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.59845.
3. **Kusyj, J.** Vibratory-centrifugal strengthening's influence on failure-free parameters of drilling pumps bushings / **J. Kusyj, A. Kuk, V. Topilnytskyy** // *Technology audit and production reserves*. – 2018. – Vol. 1, № 1 (39). – P. 4-12. – doi: 10.15587/2312-8372.2018.123838.
4. **McDowell, D. L.** Simulation-assisted materials design for the concurrent design of materials and products / **D. L. McDowell** // *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. – 2007. – Vol. 59, № 9. – P. 21-25. – doi: 10.1007/s11837-007-0111-7.
5. **Skoog, A.** Input data management in simulation-industrial practices and future trends / **A. Skoog, T. Pereva, B. Johansson** // *Simulation Modelling Practices and Theory*. – 2012. – Vol. 29. – P. 181-192. – doi: 10.1016/j.simpat.2012.07.009.

6. **Wang, L.** Data representation of machine models / **L. Wang** // *Dynamic thermal analysis of machines in running state*. – London: Springer-Verlag, 2014. – P. 11-29. – doi: 10.1007/978-1-4471-5273-6\_2.
7. **McEvily, A. J.** Metal failures: mechanisms, analysis, prevention / **A. J. McEvily**. – John Wiley & Sons. – 2002. – 324 p. – doi: 10.1002/9781118671023.
8. **Zohdi, T. I.** An introduction to computational micromechanics / **T. I. Zohdi, P. Wriggers** // *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*. Springer, 2005. – 198 p. – doi: 10.1007/978-3-540-32360-0.
9. **Kundu, T.** Fundamentals of fracture mechanics / **T. Kundu** // *CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, USA*. – 2008. – 304 p.
10. **Durham, S. D.** Cumulative Damage Models for System Failure with Application to Carbon Fibers and Composites / **S. D. Durham, W. I. Padgett** // *Technometrics*. – 1997. – Vol. 39, № 1. – P. 34-44. – doi: 10.2307/1270770.
11. **Григорьев, А. Я.** Физика и микрогеометрия технических поверхностей / **А. Я. Григорьев** // *Беларуская наука*. – Минск, 2016. – 247 с.
12. **Aftanaziv, I. S.** Vibrational-centrifugal surface strengthening of drill and casing pipes / **I. S. Aftanaziv, L. I. Shevchuk, L. R. Strutynska, O. I. Strogan** // *Scientific Bulletin of National Mining University*. – 2018. – Issue 5. – P. 88-97.
13. **Lebedev, A. A.** A new method of assesment of material degradation during its operating time / **A. A. Lebedev, N. R. Muzyka, N. L. Volchek** // *Zaliznychnyi Transport Ukrainy*. – 2003. – Vol. 5. – P. 30-33.

### References (transliterated)

1. **Kusyj, J., Kuk, A.** Rozroblennya metodu vibracijno-vidcentrovogo zmichnennya dlya tehnologichnogo zabezpechennya bezvidmovnosti detalej mashyn [Method devised to improve technological reliability of machine parts]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, **1/7(73)**, 41-51, doi: 10.15587/1729-4061.2015.36336.
2. **Kusyj, J., Kuzin, O., Kuzin, N.** Vplyv tehnologichnogo marshrutu obroblyennya na formuvannya mizhzerennoyi poskodzhuvanosti vylyvkviv [The dependence of intergrain damageability of casting on the technological treatment route]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **1/5(79)**, 39-47, doi: 10.15587/1729-4061.2016.59845.
3. **Kusyj, J., Kuk, A., Topilnytskyy, V.** Vibratory-centrifugal strengthening's influence on failure-free parameters of drilling pumps bushings. *Technology audit and production reserves*, 2018, **1/1 (39)**, 4-12, doi: 10.15587/2312-8372.2018.123838.
4. **McDowell, D. L.** Simulation-assisted materials design for the concurrent design of materials and products. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2007, **59(9)**, 21-25, doi: 10.1007/s11837-007-0111-7.
5. **Skoog, A., Perera, T., Johansson, B.** Input data management in simulation-industrial practices and future trends. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012, **29**, 181-192, doi: 10.1016/j.simpat.2012.07.009.
6. **Wang, L.** Data Representation of Machine Models. *Dynamic Thermal Analysis of Machines in Running Stat*. London: Springer-Verlag, 2014, 11–29, doi: 10.1007/978-1-4471-5273-6\_2.

7. **McEvily, A. J.** Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention. Ed. 2. John Wiley & Sons, 2002, 480, doi: 10.1002/9781118671023
8. **Zohdi, T. I., Wriggers, P.** An Introduction to Computational Micromechanics. *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*. Springer, 2005, 198, doi: 10.1007/978-3-540-32360-0.
9. **Kundu, T.** Fundamentals of Fracture Mechanics. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2008, 304.
10. **Durham, S. D., Padgett, W. J.** Cumulative Damage Models for System Failure with Application to Carbon *Fibers and Composites. Technometrics*, 1997, **39**(1), 34-44, doi: 10.2307/1270770.
11. **Grigorjev, A. J.** Fizika i mikrogeometrija tehničkih povrhnostej [The technical surfaces physics and microgeometry]. *Belarusian science. Minsk*, 2016. 247.
12. **Aftanaziv, I. S., Shevchuk, L. I., Strutynska, L. R., Strogan, O.I.** Vibrational-centrifugal surface strengthening of drill and casing pipes. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2018, **5**, 88-97.
13. **Lebedev, A. A., Muzyka, N. R., Volchek, N. L.** A new method of assesment of material degradation during its operating time. *Zaliznychnyi Transport Ukrainy*, 2003, **5**, 30-33.

#### About authors (відомості про авторів)

**Jaroslav Kusyj** – PhD, Docent, National University «Lviv Polytechnic», Docent of Mechanical Engineering Department, Lviv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5741-486X>; e-mail: [jarkym@ukr.net](mailto:jarkym@ukr.net).

**Кусий Ярослав Маркіянович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри технології машинобудування, м. Львів, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5741-486X>; e-mail: [jarkym@ukr.net](mailto:jarkym@ukr.net).

**Volodymyr Topilnytskyu** – PhD, Docent, National University «Lviv Polytechnic», Docent of Machines Designing and Exploitation Department, Lviv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5191-326X>; e-mail: [topilnvol@gmail.com](mailto:topilnvol@gmail.com).

**Топільницький Володимир Григорович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри проектування та експлуатації машин, м. Львів, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5191-326X>; e-mail: [topilnvol@gmail.com](mailto:topilnvol@gmail.com).

Please cite this article as:

**Kusyj, J. Topilnytskyu, V.** Influence of structural components placement on casting technological damages formation. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2019, **5** (1330), 41-47, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.06.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

**Кусий, Я. М.** Вплив розміщення елементів конструкції на формування технологічних пошкоджень вилівка / **Я. М. Кусий, В. Г. Топільницький** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – № 5 (1330). – С. 41-47. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.06.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Кусый, Я. М.** Влияние размещения элементов конструкции на формирование технологических повреждений отливки / **Я. М. Кусый, В. Г. Топильницкий** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2019. – № 5 (1330). – С. 41-47. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.06.

**АННОТАЦІЯ** Установлені основні критерії проектування технологічних процесів. Описані зв'язи показателів надійності: безотказності, довговечності, ремонтпригодності, збереженості з етапами і стадіями життєвого циклу изделия. Проаналізовані принципи забезпечення надійності складних технічних систем для машинобудівного виробництва. Аргументовано недостатній рівень досліджень щодо впливу розміщення конструктивних елементів отливки на формування дефектів на її поверхні. Розглянуто різновидності надійності, встановлено їх місце в структурі життєвого циклу изделия і приведені математичні залежності для визначення потенціальної надійності. Обґрунтовано нецелесообразність використання потенціальної надійності в якості критерія прогнозування стану изделия в час його виготовлення. Підтверджено значимість заготовчих операцій в структурі технологічних процесів механічної обробки литих заготовок. Приведена математична залежність для оцінки ймовірності безотказного виконання технологічного процесу (коефіцієнта надійності технологічного процесу). Проаналізовані види дефектів і механізми їх формування в отливках. Охарактеризовано основні види дефектів лиття: пригары, раковини, заливини і тріщини. Встановлено роль изъянов як порушень поверхневого шару при роботі деталей в складі изделий. Представлено параметри для контролю изъянов згідно ISO 8785: 1998. Розглянуто етапи руйнування металу при обробці резаннем. Встановлено, що важливу роль в формуванні технологічних пошкоджень і процесах межкристалічного руйнування сплавів мають границі зерен з більшими кутами. Розглянуто сучасні концепції оцінки ступеня пошкоджуваності матеріала як наработки по результатам прямих і косвенних вимірювань і вказано їх основні недоліки. Представлено метод ЛМ-твердості для визначення пошкоджуваності отливок як характеристики безотказності изделия. Описано технологічне оснащення і методика проведення і виконання експериментальних досліджень. Представлено обґрунтування і аналіз отриманих результатів. Намечено шляхи подальших досліджень.

**Ключевые слова:** технологічний процес; надійність; безотказність; литая заготовка; технологічне пошкодження; пошкоджуваність.

Поступила (received) 08.02.2019

УДК 621.514

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.07

## О ПРИМЕНЕНИИ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧИ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ В СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Ф. И. ЛУХТУРА\*, М.В. МЕДВЕДЕВА

кафедра ПТЭУ и ТС, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь, УКРАИНА

\*e-mail: lukhelen@yandex.ru

**АННОТАЦИЯ** Рассмотрены вопросы, связанные с влиянием импульсного (циклического) подключения насосов в сеть на эффективность работы насосных станций и параметры систем водоснабжения. Разработана математическая динамическая модель системы производства и распределения жидкости для анализа работы насосов в импульсном режиме. На основе анализа уравнения динамики подачи рабочей среды (энергоносителя) в систему распределения определены рациональные значения длительности (импульсов) подключения агрегатов насосной станции и паузы между импульсами, а также скважности импульсов, в зависимости от емкости сети и аккумулирующих устройств, и величины потребления жидкости. Показано существенное влияние указанных функциональных параметров на характеристики импульсного подключения нагнетателей и интенсивность подачи энергоносителя. Характерно, что изменение величины давления (напора), как при его росте, так и при его снижении, например при включении и отключении привода нагнетателя, происходит нелинейно. Причем наполненность поля графика изменения давления различна, что существенно влияет на энергетические показатели работы насосной станции в таком режиме. Определены также диапазоны изменения частоты импульсов, в которых может быть более эффективен импульсный режим подключения нагнетателей в системах водоснабжения в сравнении со стационарным режимом эксплуатации. Приведенная инженерная теория может служить основой для разработки алгоритмов системы регулирования нагнетателя путем перевода, например, на холостой ход или включения-выключения привода, анализа его работы при частичных режимах с оценкой затрат потребляемой энергии, с целью повышения экономической эффективности от использования нагнетателей в предлагаемых режимах. Полученные результаты также полезно использовать для решения оптимизационных задач на переменных режимах работы насосной станции при покрытии ее графиков нагрузок. Данный подход и представленные решения могут быть распространены на другие классы нагнетателей – компрессоры, вентиляторы, использующие в качестве рабочей среды газ.

**Ключевые слова:** насос; жидкость; энергия; аккумулятор; импульсное (циклическое, ступенчатое) регулирование; коэффициент заполнения цикла.

## ON THE APPLICATION OF PULSE SUPPLY OF WORKING ENVIRONMENT IN WATER SUPPLY SYSTEMS

F. LUKHTURA\*, M. MEDVEDIEVA

Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, SHEE "PSTU", Mariupol, UKRAINE

**ABSTRACT** Questions related to the influence of a pulsed (cyclical) pump connection to the network on the efficiency of pumping stations and the parameters of water supply systems are considered. A mathematical dynamic model of a fluid production and distribution system has been developed to analyze the operation of pumps in a pulsed mode. Based on the analysis of the equation of the dynamics of supplying the working medium (energy carrier) to the distribution system, rational values of the duration (pulses) of connecting the pumping station units and the pause between pulses, as well as the pulse duty cycle, depending on the network capacity and accumulating devices, and the magnitude of fluid consumption are determined. The significant effect of these functional parameters on the characteristics of the pulse connection of the blowers and the intensity of the energy carrier supply is shown. It is characteristic that the change in the value of pressure (pressure), both when it grows and when it decreases, for example, when the drive of the supercharger is turned on and off, is non-linear. Moreover, the fullness of the field of the graph of pressure change is different, which significantly affects the energy performance of the pumping station in this mode. The ranges of change in the frequency of the pulses, in which the pulsed mode of connecting the blowers in water supply systems in comparison with the stationary mode of operation can be more effective, have also been determined. The above engineering theory can serve as a basis for developing algorithms for regulating the supercharger by transferring, for example, idling or switching the drive on and off, analyzing its operation in partial modes with estimating the energy consumption, in order to increase the economic efficiency of using superchargers in the proposed modes. The obtained results are also useful for solving optimization problems on variable operating modes of a pumping station when covering its load schedules. This approach and the presented solutions can be extended to other classes of superchargers - compressors, fans, which use gas as a working medium.

**Keywords:** pump; fluid; energy; battery; pulse (cyclic, step) regulation; duty cycle.

### Введение

Актуальность рассматриваемых в работе вопросов определяется возросшим значением энергоэффективности системы подачи и

распределения (СПР) жидкости для промышленных предприятий и коммунального хозяйства, которым в современных условиях отечественные хозяйствующие субъекты и общество в целом отводят первостепенную роль. Насущная необходимость

решения этой проблемы закреплена в Законе Украины от 01.07.1994 № 74/94-ВР «Об энергосбережении». В связи с ростом цен на электроэнергию и, как следствие, увеличением издержек насосных станций (НС), связанных с оплатой электроэнергии, вопрос эффективного и рационального использования энергетических ресурсов на НС становится весьма актуальным, повышение ее энергоэффективности является перспективным направлением снижения энергопотребления НС. С целью снижения энергоемкости большое значение придается оптимизации СПР и НС в целом. Нагнетательные станции, как один из основных структурных элементов СПР, во многом определяют ее эксплуатационные и экономические показатели работы. Осуществление этой программы требует развития действующих и создания новых высокоэффективных систем промышленного, сельскохозяйственного и коммунального водоснабжения.

Насосные станции являются важнейшим элементом современных систем водопровода и канализации. Именно через них жидкости сообщается энергия, необходимая для поднятия ее на большую высоту или транспортирования на значительные расстояния. Насосные станции представляют собой сложный комплекс сооружений и оборудования. Правильный выбор технико-экономических параметров этого комплекса во многом определяет надежность и экономическую эффективность подачи или отведения воды.

Современные НС производств различных отраслей представляют собой мощные энергетические комплексы, которые потребляют до 15% всей вырабатываемой в стране энергии.

Тип и число основных и вспомогательных насосов, состав помещений и набор вспомогательного оборудования, конструктивные особенности и предъявляемые к насосной станции технологические требования зависят от ее назначения.

В работах [1-27] представлены решения многообразных оптимизационных задач, связанных как с насосными, так и компрессорными станциями для транспорта различных жидкостей и газов. В исследованиях [4-5] представлен системный подход к анализу функционирования основных технологических агрегатов компрессорных станций. В [6-18] показано влияние на ход оптимизационных решений:

- состояния городских магистральных сетей (коррозия, износ или занос, образование отложений и др.) способных привести к необходимости снижения давления, что требует компенсировать соответствующее падение напора на участках, приближенных к потребителям;

- состояния (износ) оборудования станций (НС) обуславливающих необходимость совершенствования их работы или реконструкции для повышения надежности и КПД;

- развития городов и увеличения высотности домов, особенно при уплотнительной застройке, требующих обеспечения потребных подачи и напора для новых потребителей, в том числе за счет оснащения нагнетателями домов повышенной этажности и многое другое.

Вследствие изменения объемов производства по мере суточного потребления, агрегаты нагнетательной станции (НС) часто эксплуатируются в неоптимальных режимах с пониженным КПД, что может приводить к существенному перерасходу электроэнергии вплоть до 10%.

Решение задачи снижения энергозатрат методом оптимизации работы НС требует построения математической модели системы снабжения потребителей и решения на ее основе оптимизационных задач методами математического программирования. Наиболее полные модели представлены в [19,20]. Кроме того, по предварительным оценкам, до 50 % энергозатрат НС может быть сокращено за счет изменения состава (насосного, компрессорного) оборудования и способов управления.

В течение срока эксплуатации нагнетатель работает на расчетном режиме, соответствующим максимуму КПД, как правило, менее 50% времени, поэтому вопросы регулирования насоса и его экономичность имеют важное значение.

Основная задача регулирования нагнетателя [21-27] – подача в сеть расхода  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, при этом основные параметры  $H$ ,  $N$ ,  $p$ ,  $\eta$  изменяются. Универсальные способы регулирования (применяемые для всех типов машин):

- временная остановка насоса;
- изменение частоты вращения вала насоса;
- дросселирование;
- перепуск жидкости из нагнетательной линии в подводящую линию и др.

Возможны также дополнительные различные методы регулирования подачи насоса:

- регулирование поворотом лопаток входного регулирующего аппарата (поворотными направляющими лопастями на входе в рабочее колесо);

- перевод нагнетателя на режим холостого хода в т. ч. используя цикличное (импульсное) регулирование. В этом случае нагнетатели, обычно оснащаются системой регулирования, обеспечивающей изменение производительности путем автоматического перевода нагнетателя на холостой ход. Этот способ производится ступенчатым регулированием [1-4]. Инженерная теория такого регулирования, разработанная в [1-4], позволяет приближенно определить для каждого режима потребления продолжительность фаз холостого хода



(или остановки) и нагнетания. Недостаток этой теории – полученное линейное изменение давления во времени продолжительности фаз холостого хода (или остановки) и нагнетания, что противоречит физическим основам этих процессов.

К тому же при использовании импульсной подачи энергоносителя в СПР теоретическое обоснование его эффективности и глубокий анализ динамики импульсного регулирования в технической литературе, кроме попытки в работах [1-4] для винтовых компрессоров, практически отсутствует.

Для насосных установок с циклическим регулированием подачи жидкости такая теория не разработана.

**Цель работы**

Разработка физической модели рабочего процесса установок насосной станции с импульсным (циклическим) подводом рабочей среды к системе водоснабжения и ее анализ, обоснование эффективности и преимущества ее использования для повышения эффективности водоснабжения.

**Изложение основного материала**

Пусть имеем систему нагнетания (с баком-аккумулятором) объемом  $V$  и давлением  $P_{нач}$  или напором  $H_{нач}$ , с суммарной площадью сечения потребления  $f$  (рис.1). Общую систему нагнетания можно условно заменить эквивалентным объемом. Примем, что давление окружающей среды и коэффициенты расхода системы трубопроводов постоянны. Обозначим среднее избыточное давление нагнетания  $p$  (напор  $H$ ).

Справедливость предположения о преимуществе использования импульсного подключения насосов к системе водоснабжения можно доказать лишь на основе анализа уравнения динамики процесса нагнетания жидкости.

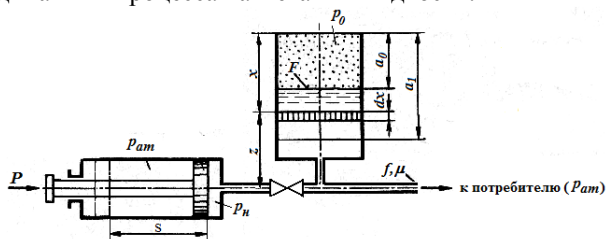


Рис. 1 – Формализованная принципиальная схема нагнетания

В общем случае, пренебрегая потерями давления от насоса до аккумулирующего устройства, это уравнение примет вид:

$$dP_1 = dP_2 + dP_3, \tag{1}$$

где  $dP_1$  – энергия, подводимая к рабочему телу в нагнетателе (компрессоре или насосе), Дж;  $dP_2$  –

энергия, затраченная на изменение давления рабочего тела в системе аккумулирования, Дж;  $dP_3$  – потребляемая энергия («потери» энергии при перемещении и отдаче конечному потребителю), Дж.

Слагаемые уравнения (1), с некоторыми упрощениями, можно представить так:

$$dP_1 = N dt, \quad dP_2 = V dp, \\ dP_3 = Q_{номп} \cdot p dt = \mu \cdot f \sqrt{2/\rho} p^{\frac{3}{2}} dt,$$

где  $N$  – подводимая мощность, Вт;  $dt$  – интервал времени, с;  $p$  – текущее давление нагнетания в системе, Н/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность рабочего тела (жидкости), кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – коэффициент расхода трубопроводов;  $f$  – площадь сечения канала потребления, м<sup>2</sup>.

При эксплуатации в импульсном режиме насосных установок уравнение динамики (1) принимает вид

$$\frac{F}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \cdot \frac{dH}{dt} - \left[ H_{уст}^{\frac{1}{2}} - H^{\frac{1}{2}} \right] = 0, \quad H^{\frac{1}{2}} = \frac{Q_{нас}}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \tag{2}$$

где  $H$  – текущий напор, м;  $F$  – площадь сечения бака-аккумулятора;  $Q_{нас}$  – производительность насоса. Его решение (при  $F = const$ )

$$t_{нагн} = \frac{2F}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \left[ \sqrt{H_{нач}} - \sqrt{H} + \sqrt{H_{уст}} \ln \frac{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{нач}}}{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H}} \right] \tag{3}$$

При выводе уравнений (2) и (3) давление в газовой полости аккумулятора принято равным атмосферному давлению (газовая полость сообщается с атмосферой), пренебрегали существующими потерями на всасывающей и нагнетательной линии до бака-аккумулятора (рис.1), истечение жидкости у потребителя происходит в атмосферу, забор жидкости из резервуара происходит при внешнем атмосферном давлении ( $p_0 = p_{атм}$ ), аккумулятор призматической формы.

Графическое изображение этого решения (3) представлено на рис. 2, а. Видно, что изменение давления во времени близко к экспоненциальной зависимости, что явно отличается от решения [1-4].

При отключении насосов питание потребителей осуществляется от накопленной энергии в баке-аккумуляторе системы СПР и уравнение динамики опорожнения аккумулирующей емкости примет вид

$$dP_2 = -dP_3. \tag{4}$$

Уравнение динамики (4) при эксплуатации в импульсном режиме насосных установок может быть представлено как:

$$\frac{F}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \cdot \frac{dH}{dt} + H^{\frac{1}{2}} = 0. \tag{5}$$



Его решение (время, за которое напор изменяется от  $H_{нач}$  до  $H$ )

$$t_{паузы} = \frac{2F}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \left[ \sqrt{H_{нач}} - \sqrt{H} \right]. \quad (6)$$

Напор в конце процесса (цикла)

$$H = \left[ \sqrt{H_{нач}} - \frac{\mu \cdot f \sqrt{2g}}{2F} t_{паузы} \right]^2. \quad (7)$$

Графическое изображение этого решения представлено на рис. 2,б. Как и в предыдущем случае, изменение давления во времени нелинейно, и близко к параболической зависимости, что явно отличается от решения [1-4]. Граничные значения давления рабочей среды могут быть записаны в виде условий:  $H = H_{нач}$  при  $t = 0$  и  $H = H_{уст}$  при  $t \rightarrow \infty$ .

Таким образом, графически нагнетание в сеть и опорожнение сети в импульсном режиме проиллюстрированы на рис. 2 (соответственно а и б). Подводимая мощность к рабочей среде за время  $\tau_{имп}$  и опорожнение сети во время длительности паузы  $\tau_{паузы}$  в импульсном режиме проиллюстрированы на рис. 3.

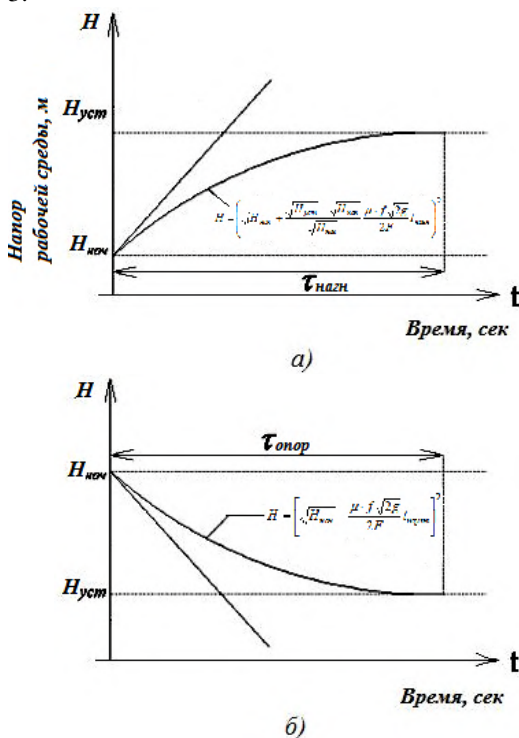


Рис. 2 - Графическое представление зависимости давления рабочей среды а) от времени подачи и б) паузы (холостого хода, останова и др.)

При этом длительность подачи (импульс) от  $H_{нач}$  до  $H_{кон}$  – отрезок времени, в течение которого нагнетатель работает при максимальной подаче (и мощности). можно определить, используя соотношение (3):

$$\tau_{нагн} = \frac{2F}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \left[ \sqrt{H_{нач}^{нагн}} - \sqrt{H_{кон}^{нагн}} + \sqrt{H_{уст}} \ln \frac{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{нач}^{нагн}}}{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{кон}^{нагн}}} \right]. \quad (8)$$

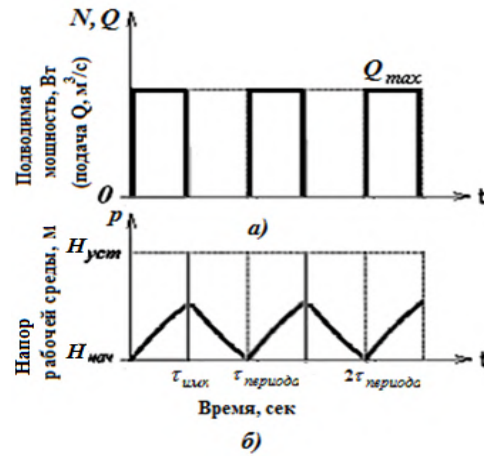


Рис. 3 - Динамика подвода мощности в нагнетателе к рабочей среде (а), подачи (импульса) и (б) паузы (холостого хода, останова и др.) в импульсном режиме

Разлагая последнее слагаемое в ряд при  $0 < \frac{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H}}{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{нач}^{нагн}}} \leq 2$ , и ограничиваясь одним членом ряда, получим

$$\tau_{нагн} = \frac{2F}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \left[ \sqrt{H_{нач}^{нагн}} - \sqrt{H_{кон}^{нагн}} - \sqrt{H_{уст}} \frac{\sqrt{H_{нач}^{нагн}} - \sqrt{H_{кон}^{нагн}}}{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{нач}^{нагн}}} \right] = \frac{2F}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \left( \sqrt{H_{кон}^{нагн}} - \sqrt{H_{нач}^{нагн}} \right) \frac{\sqrt{H_{нач}^{нагн}}}{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{нач}^{нагн}}}.$$

Тогда

$$H = \left( \sqrt{H_{нач}^{нагн}} + \frac{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{нач}^{нагн}}}{\sqrt{H_{нач}^{нагн}}} \frac{\mu \cdot f \sqrt{2g}}{2F} \tau_{нагн} \right)^2.$$

Длительность паузы (холостого хода, останова) – отрезок времени между двумя последовательными импульсами, в течение которого подача отсутствует, и происходит снижение давления вследствие потребления

$$\tau_{паузы} = \frac{2F}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \left[ \sqrt{H_{нач}^{паузы}} - \sqrt{H_{кон}^{паузы}} \right]. \quad (9)$$

Тогда период цикла  $\tau_{периода}$  – отрезок времени между началами двух последовательных импульсов, определяется суммой соотношений (1.6) и (1.7), а их скважность  $S$  равна отношению периода  $\tau_{периода}$  следования импульсов к длительности импульса  $\tau_{имп}$

$$\tau_{\text{период}} = \tau_{\text{нагн}} + \tau_{\text{паузы}} = \frac{2F \sqrt{H_{\text{уст}}}}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \ln \frac{\sqrt{H_{\text{уст}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}}{\sqrt{H_{\text{уст}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}} =$$

$$= \frac{2F \cdot Q_{\text{нас}}}{\mu^2 f^2 2g} \ln \frac{\sqrt{H_{\text{уст}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}}{\sqrt{H_{\text{уст}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}}; \quad (10)$$

$$S = \frac{\tau_{\text{периода}}}{\tau_{\text{нагн}}} = 1 + \frac{\sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}} - \sqrt{H_{\text{кон}}^{\text{паузы}}}}{\sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}} - \sqrt{H_{\text{кон}}^{\text{нагн}}} + \sqrt{H_{\text{уст}}}} \ln \frac{\sqrt{H_{\text{уст}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}}{\sqrt{H_{\text{уст}}} - \sqrt{H_{\text{кон}}^{\text{нагн}}}} \quad (11)$$

При этом,  $H_{\text{кон}}^{\text{нагн}} = H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}$ ,  $H_{\text{нач}}^{\text{нагн}} = H_{\text{кон}}^{\text{паузы}}$ .

В общем случае сложных форм импульсов скважность определяется отношением площади осциллограммы, ограниченной по горизонтали длительностью периода  $\tau_{\text{имп}}$ , а по вертикали – амплитудой импульсов давления, к площади, занимаемой этими импульсами в указанных границах.

Тогда осредненная величина потребляемой мощности  $P_{\text{ср}}$ , определяются по формуле:

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{max}}}{S} = P_{\text{max}} \cdot \beta. \quad (12)$$

Коэффициент заполнения цикла или коэффициент использования мощности  $\beta$  – обратная величина скважности импульсов – отношение длительности импульса к периоду включения:

$$\beta = \frac{1}{S} = \frac{\tau_{\text{имп}}}{\tau_{\text{периода}}} = \frac{W}{W_{\text{уст}}}, \quad (13)$$

где  $\tau_{\text{периода}}$  – период процесса, с;  $\tau_{\text{имп}}$  – продолжительность одного импульса нагнетания, с;  $W$  – осредненный по времени расход электроэнергии (или потребляемого топлива) при импульсной подаче рабочей среды, кВт·ч;  $W_{\text{уст}}$  – установленный (максимальный) расход электроэнергии, кВт·ч; а продолжительность (длительность) одного импульса

$$\tau_{\text{имп}} = \beta \cdot \tau_{\text{периода}} \quad (14)$$

Средний расход электроэнергии  $W_{\text{имп}}$  при импульсном режиме рассчитывается как

$$W_{\text{имп}} = \frac{W_{\text{уст}}}{S}. \quad (15)$$

Средний расход электроэнергии на сжатие  $W_{\text{ср}}^{\text{стаци}}$  на стационарном режиме можно найти из баланса энергии по (1) при  $dP_2 = 0$ , т.е. при  $dP_1 = dP_3$  и можно представить следующим образом:

$$W_{\text{ср}}^{\text{стаци}} = Q_{\text{потр}} P_{\text{ср}} \tau_{\text{период}} = \mu \cdot f \sqrt{2/\rho} P_{\text{ср}}^{\frac{3}{2}} \tau_{\text{период}} \quad (16)$$

$$P_{\text{ср}} = \rho g H_{\text{ср}} = \frac{1}{t} \int_0^{\tau_{\text{период}}} \rho g H dt.$$

При этом величина потребления с учетом норм потребления может принимать значение  $Q_{\text{потр}} = \text{const}$ .

Вернемся к выражениям (1) и (5). Для дальнейшего анализа процесса нас будет интересовать слагаемое  $dP_3$ . Как было указано выше, например, при опорожнении аккумулятора  $H = \left[ \sqrt{H_{\text{нач}}} - \frac{\mu \cdot f \sqrt{2g}}{2F} t_{\text{паузы}} \right]^2$ , а  $dP_3 = \mu \cdot f \sqrt{2/\rho} p^{\frac{3}{2}} dt$ .

Но теперь у нас есть выражение (4) и (8) для расчета значений текущего напора (или давления  $p$ ) в функции времени. Таким образом,

$$dP_3^{\text{имп}} = \mu \cdot f \sqrt{2/\rho} p^{\frac{3}{2}} dt =$$

$$= \mu \cdot f \sqrt{2/\rho} \cdot (\rho g)^{\frac{3}{2}} \left[ \sqrt{H_{\text{нач}}} + \frac{\sqrt{H_{\text{уст}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}}}{\sqrt{H_{\text{нач}}}} \frac{\mu \cdot f \sqrt{2g}}{2F} t_{\text{нагн}} \right]^3 dt$$

$$dP_3^{\text{паузы}} = \mu \cdot f \sqrt{2/\rho} p^{\frac{3}{2}} dt =$$

$$= \mu \cdot f \sqrt{2/\rho} \cdot (\rho g)^{\frac{3}{2}} \left[ \sqrt{H_{\text{нач}}} - \frac{\mu \cdot f \sqrt{2g}}{2F} t_{\text{паузы}} \right]^3 dt \quad (17)$$

Для определения количества энергии  $P_3$  найдем первообразную функцию от выражений (17).

Согласно (14) количество энергии, переданное «потребителю» за время от 0 до  $\tau_{\text{имп}}$

$$P_3^{\text{имп}} = \int_0^{\tau_{\text{имп}}} dP_3 =$$

$$= \frac{\rho g H_{\text{нач}}^{\text{нагн}} V_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}{2} \left[ \left( 1 + \left( \frac{\sqrt{H_{\text{уст}}}}{\sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}} - 1 \right) \frac{Q_{\text{нас}}}{2F \cdot H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}} \tau_{\text{нагн}} \right)^4 - 1 \right]. \quad (18)$$

за время от 0 до  $\tau_{\text{паузы}}$

$$P_3^{\text{паузы}} = \int_0^{\tau_{\text{паузы}}} dP_3 =$$

$$= \frac{\rho g H_{\text{нач}}^{\text{паузы}} V_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{Q_{\text{нас}}}{2F \cdot H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}} \tau_{\text{паузы}} \right)^4 \right]. \quad (18, a)$$

где  $V$  и  $H$  – соответственно объем и высота жидкости в аккумуляторе;  $Q$  – расход жидкости у потребителя;  $F$  – площадь поперечного сечения (призматического, цилиндрического) аккумулятора.

### Обсуждение результатов

Произведем сравнение количества энергии, переданной потребителю по традиционной непрерывной подаче при неизменном давлении

рабочей среды за время от 0 до  $\tau_{\text{периода}}$  (при равенстве слагаемого в уравнении сохранения (1)  $dP_2 = 0$ )

$$P_3^{(2)} = \int_0^{\tau_{\text{периода}}} dP_3 = W_{\text{ср}}^{\text{стац}} = Q_{\text{потр}} P_{\text{ср}} \tau_{\text{период}} = \mu \cdot f \sqrt{2/\rho} P_{\text{ср}}^{\frac{3}{2}} \tau_{\text{период}} \sigma \quad (19)$$

при этом среднее давление  $P_{\text{ср}}$  рабочей среды определяется по (16), и количество энергии  $P_3^{\text{илт}} + P_3^{\text{паузы}}$ , переданное по рекомендуемому способу импульсной подачи от начального давления  $P_{\text{нач}}$  до давления, которую примет рабочая среда в результате фазы нагнетания и опорожнения за время от 0 до  $\tau_{\text{илт}}$  и от 0 до  $\tau_{\text{паузы}}$ , т.е. за все время  $\tau_{\text{периода}}$

Обозначим первое количество энергии символом  $P_3^{(2)}$ , второе – символом  $P_3^{(1)}$ . Для справедливости неравенства  $P_3^{(2)} > P_3^{(1)}$  необходимо, чтобы разность  $\Delta P_3 = P_3^{(2)} - P_3^{(1)} > 0$ .

Для сравнения значений  $P_3^{(1)}$  и  $P_3^{(2)}$ , полученных по выражениям (18) и (19), соответственно найдем их разность:

$$\Delta P_3 = \mu \cdot f \sqrt{2/\rho} P_{\text{ср}}^{\frac{3}{2}} \tau_{\text{периода}} - \frac{\rho g H_{\text{нач}} V_{\text{нач}}}{2} \left[ \left( 1 + \left( \frac{\sqrt{H_{\text{уст}}}}{\sqrt{H_{\text{нач}}}} - 1 \right) \frac{Q_{\text{нач}}}{2F \cdot H_{\text{нач}}} \tau_{\text{нагн}} \right)^4 - 1 \right] - \frac{\rho g H_{\text{нач}} V_{\text{нач}}}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{Q_{\text{нач}}}{2F \cdot H_{\text{нач}}} \tau_{\text{паузы}} \right)^4 \right] > 0 \quad (20)$$

При этом  $H_{\text{нач}}^{\text{паузы}} = H_{\text{кон}}^{\text{илт}}$ ,

$$\begin{aligned} \tau_{\text{период}} &= \frac{2F \sqrt{H_{\text{уст}}}}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \ln \frac{\sqrt{H_{\text{уст}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}}{\sqrt{H_{\text{уст}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}} \cong \\ &= \frac{2F \sqrt{H_{\text{уст}}}}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \frac{\sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}}{\sqrt{H_{\text{уст}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}}; \\ \tau_{\text{нагн}} &= \frac{2F}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \frac{\left( \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}} \right) \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}}{\sqrt{H_{\text{уст}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}} = \\ &= \frac{2F \cdot H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}{Q_{\text{нач.потр}}} \cdot \frac{\sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}}{\sqrt{H_{\text{уст}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &= \frac{\tau_{\text{периода}}}{\tau_{\text{илт}}} = \frac{\sqrt{H_{\text{уст}}}}{\sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}} \frac{\sqrt{H_{\text{уст}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}}{\sqrt{H_{\text{уст}}} - \sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}} = \frac{\sqrt{\frac{H_{\text{уст}}}{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}} - 1}}{1 - \sqrt{\frac{H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}{H_{\text{уст}}}}} = \\ &= \frac{\frac{Q_{\text{нас}}}{\mu \cdot f \sqrt{2g H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}} - 1}{1 - \frac{Q_{\text{нас}}}{\mu \cdot f \sqrt{2g H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}}} = \frac{Q_{\text{нас}}^{\text{нагн}}}{Q_{\text{нас}}^{\text{паузы}}} = \frac{1}{1 - q_{V_{\text{нач.нагн.}}}} = \\ &= \frac{1}{q_{V_{\text{нач.нагн.}}} - q_{V_{\text{нач.паузы}}}} \end{aligned}$$

где  $q_V$  - относительный параметр потребления.

Тогда, преобразуя последнее выражение с учетом выше приведенных соотношений, и для простоты принимая равенство  $H_{\text{ср}} = H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}$ , что несколько завышает показатели эффективности импульсного режима подачи энергии к рабочей среде, получим

$$\begin{aligned} \Delta P_3 &= \mu f \sqrt{2/\rho} \left( \rho g H_{\text{нач}}^{\text{паузы}} \right)^{\frac{3}{2}} \tau_{\text{периода}} - \\ &- \frac{\rho g H_{\text{нач}}^{\text{нагн}} V_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}{2} \left[ \left( 1 + \left( \frac{\sqrt{H_{\text{уст}}}}{\sqrt{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}} - 1 \right) \frac{Q_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}{2F \cdot H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}} \tau_{\text{нагн}} \right)^4 - 1 \right] - \\ &- \frac{\rho g H_{\text{нач}}^{\text{паузы}} V_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{Q_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}{2F \cdot H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}} \tau_{\text{паузы}} \right)^4 \right] > 0 \quad (21) \end{aligned}$$

т.е. необходимым и обязательным условием для выполнения неравенства  $P_3^{(2)} - P_3^{(1)} > 0$  является

$$\begin{aligned} \tau_{\text{периода}} &> \\ &> \frac{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}} V_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}{2 Q_{\text{нач}}^{\text{паузы}} \left( H_{\text{нач}}^{\text{паузы}} \right)} \left[ \left( 1 + \left( \frac{\sqrt{H_{\text{уст}}}}{\sqrt{H_{\text{нач}}}} - 1 \right) \frac{Q_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}{2F \cdot H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}} \tau_{\text{нагн}} \right)^4 - 1 \right] + \\ &+ \frac{V_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}{2 Q_{\text{нач}}^{\text{паузы}}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{Q_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}{2F \cdot H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}} \tau_{\text{паузы}} \right)^4 \right], \quad (22) \end{aligned}$$

где  $Q_{\text{нач}}^{\text{паузы}}$  - величина потребления (расход) в начале паузы;  $Q_{\text{нач}}^{\text{нагн}}$  - величина потребления в начале нагнетания;  $V_{\text{нач}}^{\text{нагн}}$  и  $V_{\text{нач}}^{\text{паузы}}$  - объем жидкости в аккумуляторе в начале и конце процесса нагнетания;  $\tau_{\text{нагн}}$ ,  $\tau_{\text{паузы}}$  - длительность процессов подачи и паузы, или

$$\tau_{\text{периода}} > \frac{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}} \nu_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}{2Q_{\text{нач}}^{\text{паузы}} (H_{\text{нач}}^{\text{паузы}})} \left[ \left( 1 + \left( \frac{\sqrt{H_{\text{уст}}}}{\sqrt{H_{\text{нач}}}} - 1 \right) \frac{\tau_{\text{нагн}}}{\tau_{\text{нач.нагн}}} \right)^4 - 1 \right] + \frac{V_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}{2Q_{\text{нач}}^{\text{паузы}}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{S \cdot \tau_{\text{нагн}} - 1}{\tau_{\text{нач.паузы}}} \right)^4 \right], \quad (22a)$$

а скважность импульсов в соответствии с (22) должна соответствовать условию вида

$$S > \frac{A}{\tau_{\text{нагн}}} \cdot f_1(\tau_{\text{нагн}}) + \frac{B}{\tau_{\text{нагн}}} \cdot f_2(\tau_{\text{нагн}}), \quad \text{где } A \text{ и } B$$

некоторые постоянные, зависящие от характеристик системы СПР.

Отсюда продолжительность импульса подачи энергии рабочей среде, при принятых допущениях, должна соответствовать определенному условию, вытекающему из (22), а частота цикла (процесса)

$$\omega = \tau_{\text{периода}}^{-1} < \left\{ \frac{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}} \nu_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}{2Q_{\text{нач}}^{\text{паузы}} (H_{\text{нач}}^{\text{паузы}})} \left[ \left( 1 + \left( \frac{\sqrt{H_{\text{уст}}}}{\sqrt{H_{\text{нач}}}} - 1 \right) \frac{\tau_{\text{нагн}}}{\tau_{\text{нач.нагн}}} \right)^4 - 1 \right] + \frac{V_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}{2Q_{\text{нач}}^{\text{паузы}}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{S \cdot \tau_{\text{нагн}} - 1}{\tau_{\text{нач.паузы}}} \right)^4 \right] \right\}^{-1} \cong \frac{Q_{\text{нач.потр}}^{\text{паузы}}}{2FH_{\text{нач}}^{\text{паузы}}} \left[ \left( 1 - \sqrt{\frac{H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}{H_{\text{уст}}}} \right) / \left( 1 - \sqrt{\frac{H_{\text{нач}}^{\text{нагн}}}{H_{\text{нач}}^{\text{паузы}}} \right)} \right]. \quad (23)$$

При соблюдении условий (22) и (23) импульсный режим подвода энергии к рабочей среде, как независимый самостоятельный фактор влияния, является более экономичным, чем безимпульсный режим.

Полученные результаты позволяют утверждать, что подвод энергии к рабочей среде в нагнетателе в импульсном режиме с энергетической точки зрения может быть более рационально при представленных выше условиях. Объем энергии, «снятой» с нагнетателя при поочередных импульсных подключениях, оказывается большим, чем при использовании безимпульсной подачи в течение того же времени, и среднему давлению в системе (сети), что приводит, согласно (12) и (13), к сокращению расхода электроэнергии. Кроме того, увеличение мощности нагнетания, приводит еще к более эффективному режиму импульсной подачи. Последнее обстоятельство может несколько снижать уровень надежности работы НС при росте давления рабочей среды.

С ростом объема системы нагнетания растет время заполнения ее до создания необходимого давления, уменьшается частота цикла, а с ростом расхода потребителя частота цикла увеличивается. С

увеличением потребления также увеличивается время заполнения до необходимого давления, а с ростом сопротивления трубопроводов время работы нагнетателя до создания необходимого давления уменьшается. С увеличением мощности нагнетания частота процесса увеличивается. При этом время нагнетания уменьшается.

Таким образом, из соотношения (23) следует, что на частоту импульсов влияет расход у потребителя, объем аккумулятора в системе, площадь сечения канала потребления, а также мощность подвода энергии к рабочей среде и ее начальное и конечное давление (амплитудная характеристика системы). Последняя статья воздействия, зависящая от задатчика давления, влияет также на частоту подвода тепла при всех остальных неизменных параметрах системы нагнетания. Кроме того, увеличение частоты импульсов  $\omega$  при снижении давления «потолка сжатия» снижает эффективность энергоподвода, т.к. при этом снижается амплитуды изменения давления (сглаживание) приводит к перерасходу электроэнергии в связи с поддержанием необходимого давления внутри системы.

Следует особо отметить, что для поддержания более эффективной работы системы нагнетания на область изменения частоты импульсов накладывается ограничение (22), (23).

В конечном итоге, определены длительности подачи рабочей среды и паузы между импульсами, а также скважность импульсов, в зависимости от величины потребления, оценены амплитудно-частотные характеристики импульсного режима подвода энергии в системе нагнетания, которые обеспечивают более эффективные режимы эксплуатации насосных установок.

Предлагаемый метод подачи энергоносителя должен, по-возможности, осуществляться в условиях наибольшей разности напоров (давлений). Кроме того, циклическую подачу можно осуществлять разными методами регулирования: переводом на холостой ход или остановом компрессора, частотным регулированием подачи, дросселированием и др. При этом необходима адаптация того или иного метода регулирования под предлагаемую методику циклической подачи. Кроме этого, необходимо наличие достаточно емких аккумуляторов.

В заключении можно отметить, что полученные результаты с успехом может использоваться техническими работниками при выборе оптимальной эксплуатационной схемы работы агрегатов (насосов) для покрытия графиков нагрузок в короткие сроки без использования сложных вычислительных программных комплексов. Такой подход позволяет минимизировать средний удельный расход электроэнергии и др. Кроме того, эту методику можно использовать для оптимизации работы насосной станции при покрытии ее нагрузки в любой момент времени, а также суточных, сезонных, годовых нагрузок и др.

### Выводы

1. С использованием представленной аналитической математической модели системы импульсного нагнетания жидкостей в сеть уточнены и определены основные параметры режима циклического (импульсного) подключения насосов.
2. Для повышения эффективности работы системы нагнетания с импульсным подводом энергии необходимо выдерживать определенное соотношение между длительностью импульса роста давления и полного периода процесса.
3. Полученные результаты разработки инженерной методики для расчета функциональных параметров импульсного подвода энергии к системам водоснабжения позволяет осуществлять выбор более эффективных конструктивных их характеристик при проектировании систем водоснабжения и способов эксплуатации, в т.ч. агрегатов на соответствующую электрическую мощность.
4. При дальнейших исследованиях в рассматриваемом направлении целесообразным является учет характеристик нагнетателей и сети при различных интенсивностях импульсной подачи, что позволит получить более полную картину и разработать более эффективные методы импульсного регулирования подачи рабочей среды в системы водоснабжения.

### Список литературы

1. **Бондаренко, Г. А.** Инженерная теория регулирования винтовых компрессоров переводом на холостой ход / **Г. А. Бондаренко** // *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки.* – 2003. – №3(49). – С. 63-71.
2. **Бондаренко, Г. А.** Некоторые особенности работы компрессоров на пневмосеть [Текст] / **Г.А. Бондаренко, В. В. Шишов** // *Проектирование и моделирование. Компрессорное и энергетическое машиностроение.* – 2008. – № 1(11). – С. 62-65.
3. **Бондаренко, Г. А.** Винтовые компрессоры в системах обеспечения сжатым воздухом / **Г.А. Бондаренко, П.Е. Жарков.** – Сумы. Изд-во СумГУ. – 2003. – 130 с.
4. **Бондаренко, Г. А.** Винтовые воздушные компрессорные станции / **Г. А. Бондаренко.** – Сумы: Изд-во СумГУ, 2003.– 245 с.
5. **Крюков, О. В.** Регулирование производительности газоперекачивающих агрегатов преобразователями частоты / **О. В. Крюков** // *Компрессорная техника и пневматика.* – 2013. – № 3. – С. 21-24.
6. **Крюков, О. В.** Комплексная оптимизация энергопотребления агрегатов компрессорных станций / **О. В. Крюков** // *Газовая промышленность.* – 2013. – С. 30-33.
7. **Стогней, В. Г.** Оптимизация режимов работы компрессорных станций промышленных предприятий: учеб. пособие / **В. Г. Стогней, А. В. Бараков.** – Воронеж: Воронеж. политехн. ин-т., 1987. – 87 с.
8. **Кочкин, П. А.** Методы повышения эффективности работы компрессорных станций / **П. А. Кочкин, И. Н.**

- Мухин** // *Информатизация и системы управления в промышленности.* – 2009. – №3(23).
9. **Жигулин, И. Н.** Оптимизация работы компрессорной станции промышленного предприятия / **И. Н. Жигулин** // *Транспорт-2014 : труды междунар. науч.-практ. конф. (22-25 апреля 2014 г.; Ростов-на-Дону).* – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовский государственный университет путей сообщения, 2014. – Ч.2. – С. 224-226.
10. **Штейнмиллер, О. А.** Статическая и полирежимная оптимизация параметров насосного оборудования системы «районная насосная станция – абонентская сеть» / **О. А. Штейнмиллер, А. Н. Ким** // *Вестник гражданских инженеров.* – 2009. – №2(19). – С. 41-45.
11. **Штейнмиллер, О. А.** Численные методы решения задачи оптимального синтеза повысительных систем подачи и распределения воды микрорайона / **О. А. Штейнмиллер** // *Вестник гражданских инженеров.* – 2009. – №4(21). – С. 81-87.
12. **Сумароков, С. В.** Математическое моделирование систем водоснабжения / **С. В. Сумароков.** – Новосибирск : Наука, 1983. – 167 с.
13. **Турк, В. И.** Насосы и насосные станции / **В. И. Турк.** – М. : Стройиздат, 1976. – 304 с.
14. **Шевелев, Ф. А.** Водоснабжение больших городов зарубежных стран / **Ф. А. Шевелев, Г. А. Орлов.** – М. : Стройиздат, 1987. – 347 с.
15. **Штейнмиллер, О. А.** Задача оптимального синтеза повысительных систем подачи и распределения воды (СПРВ) микрорайона / **О. А. Штейнмиллер, А. Н. Ким** // *Вестник гражданских инженеров.* – 2009. – № 1 (18). – С. 80-84.
16. **Евдокимов, А.** Минимизация функций и ее приложение к задачам автоматизированного управления инженерными сетями / **А. Евдокимов.** – Харьков: Вища школа, 1985 – 288 с.
17. **Евдокимов, А.** Оптимальные задачи на инженерных сетях / **А. Евдокимов.** – Харьков : Вища школа, 1976. – 153 с.
18. **Копытин, А. Н.** Современные подходы в определении эффективности работы насосных агрегатов / **А. Н. Копытин, О. Ю. Царинник** // *Сантехника, отопление, кондиционирование.* – 2007. – №8. – С. 14-16.
19. **Костин, В. И.** Регулирование производительности нагнетателей при смешанной схеме совместной работы / **В. И. Костин** // *Известия вузов. Строительство.* – Новосибирск, 2006. – № 6. – С. 61-64.
20. **Абрамов, Н. Н.** Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды / **Н. Н. Абрамов.** – М. : Стройиздат, 1972. – 288 с.
21. **Sarbu I.** Energetic optimization of water pumping in distribution systems / **I. Sarbu, I. Borza** // *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.* – 1998. - Vol. 42, № 2. – P. 141-152.
22. **Gevorgov, L.** PLC-based flow rate control system for centrifugal pumps / **L. Gevorgov, V. Vodovozov, T. Lehtla, I. Bakman** // *56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia.* – 2015. – doi:10.1109/RTUCON.2015.7343115
23. **Tamminen, J.** Variable speed drive-based pressure optimization of a pumping system comprising individual branch flow control elements / **J. Tamminen, T. Ahonen, A. Kosonen, J. Ahola, J. Tolvanen** // *16th European Conference on Power Electronics and Applications, Lappeenranta, Finland.* – 2014. – doi: 10.1109/EPE.2014.6910988.

24. **Annus, I.** Pumps Energy Consumption Based on New EU Legislation / **I. Annus, D. Uibo, T. Koppel** // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 89. – P. 517-524. – doi:10.1016/j.proeng.2014.11.473
25. **Vodovozov, V.** Circulation centrifugal pump with variable speed drives and minimal electricity consumption / **V. Vodovozov, L. Gevorkov, Z. Raud**, // *11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, Cadiz, Spain. – 2017. – doi: 10.1109/CPE.2017.7915193.
26. **Almeida, A. T.** Market Transformation of Energy-Efficient Technologies in the EU / **A. T. Almeida, P. Fonseca, H. Falkner, P. Bertoldi** // *Energy Policy*. – 2003. – Vol. 31. – P. 563-575. – doi:10.1016/S0301-4215(02)00100-3.
27. **Ahonen, T.** Frequency-Converter-Based Hybrid Estimation Method for the Centrifugal Pump Operational State / **T. Ahonen, J. Tamminen, J. Ahola, J. Kestilä** // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2012. – Vol. 59. – P. 4803-4809. – doi:10.1109/TIE.2011.2176692.
10. **Shteynmiller, O. A., Kim, A. N.** Statischeckaya i polirezhimnaya optimizatsiya parametrov nasosnogo oborudovaniya sistemy «rayonnaya nasosnaya stantsiya – abonentskaya set'» [Static and multi-mode optimization of the parameters of the pumping equipment of the system "district pumping station - subscriber network"]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 2009, 2 (19), 41-45.
11. **Shteynmiller, O. A.** Chislennyye metody resheniya zadachi optimal'nogo sinteza povysitel'nykh sistem podachi i raspredeleniya vody mikrorayona [Numerical methods for solving the problem of optimal synthesis of upgrading water supply and distribution systems in a microdistrict]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 2009, 4 (21), 81-87.
12. **Sumarokov, S. V.** *Matematicheskoye modelirovaniye sistem vodosnabzheniya* [Mathematical modeling of water supply systems]. Novosibirsk, Nauka, 1983, 167.
13. **Turk, V. I.** *Nasosy i nasosnyye stantsii* [Pumps and pumping stations]. Moscow, Stroyizdat, 1976, 304.
14. **Shevelev, F. A., Orlov, G. A.** *Vodosnabzheniye bol'shikh gorodov zarubezhnykh stran* [Water supply of large cities of foreign countries]. Moscow, Stroyizdat, 1987, 347.
15. **Shteynmiller, O. A., Kim, A. N.** Zadacha optimal'nogo sinteza povysitel'nykh sistem podachi i raspredeleniya vody (SPRV) mikrorayona [The task of optimal synthesis of upgrading water supply and distribution systems (SPRV) of the microdistrict]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 2009, 1(18), 80-84.
16. **Yevdokimov, A.** *Minimizatsiya funktsiy i yeye prilozheniye k zadacham avtomatizirovannogo upravleniya inzhenernymi setyami* [Minimization of functions and its application to the tasks of automated management of engineering networks]. Khar'kov, Vishcha shkola, 1985, 288.
17. **Yevdokimov, A.** *Optimal'nyye zadachi na inzhenernykh setyakh* [Optimal problems on engineering networks]. Khar'kov, Vishcha shkola, 1976, 153.
18. **Kopytin, A. N., Tsarinnik, O. Yu.** Sovremennyye podkhody v opredelenii effektivnosti raboty nasosnykh agregatov [Regulation of supercharger performance with a mixed scheme of joint work]. *Santekhnika, otopeniye, konditsionirovaniye [Plumbing, heating, air conditioning]*, 2007, 8, 14-16.
19. **Kostin, V. I.** Regulirovaniye proizvoditel'nosti nagnetateley pri smeshannoy skheme sovместnoy raboty [Regulation of supercharger performance with a mixed scheme of joint work]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of universities]. Building*. Novosibirsk, 2006, 6, 61-64.
20. **Abramov, N. N.** *Teoriya i metodika rascheta sistem podachi i raspredeleniya vody* [Theory and method of calculating water supply and distribution systems]. Moscow, Stroyizdat, 1972, 288.
21. **Sarbu I., Borza I.** Energetic optimization of water pumping in distribution systems. *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.*, 1998, 42, 2, 141-152.
22. **Gevorkov, L., Vodovozov, V., Lehtla, T., Bakman, I.** PLC-based flow rate control system for centrifugal pumps. *56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 2015, doi: 10.1109/RTUCON.2015.7343115

## References (transliterated)

1. **Bondarenko, G. A.** Inzhenernaya teoriya regulirovaniya vintovykh kompressorov perevodom na kholostoy khod [Engineering theory of regulation of screw compressors by transfer to idle]. *Visnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu [The Sums State University Bulletin]*, 2003, 3(49), 63-71.
2. **Bondarenko, G. A., Shishov, V. V.** Nekotoryye osobennosti raboty kompressorov na pnevmoset' [Some features of the operation of compressors on the pneumatic network]. *Proyektirovaniye i modelirovaniye. Kompessornoye i energeticheskoye mashinostroyeniye [Design and modeling. Compressor and power engineering]*, 2008, 1 (11), 62-65.
3. **Bondarenko, G. A., Zharkov, P. E.** *Vintovyye kompressory v sistemakh obespecheniya szhatym vozdukhom* [Screw compressors in compressed air supply systems]. Sumy, Izd-vo SumGU. – 2003, 130.
4. **Bondarenko, G. A.** *Vintovyye vozdushnyye kompressornyye stantsii* [Screw air compressor stations]. Sumy, Izd-vo SumGU, 2003, 245.
5. **Kryukov, O. V.** Regulirovaniye proizvoditel'nosti gazoperekachivayushchikh agregatov preobrazovatelyami chastoty [Regulation of the performance of gas pumping units frequency converters]. *Kompessornaya tekhnika i pnevmatika [Compressors and pneumatics]*, 2013, 3, 21-24.
6. **Kryukov, O. V.** Kompleksnaya optimizatsiya energopotrebleniya agregatov kompressornykh stantsiy [Integrated optimization of energy consumption of compressor station units]. *Gazovaya promyshlennost' [Gas industry]*, 2013, 30-33.
7. **Stogney, V. G., Barracks, A. V.** *Optimizatsiya rezhimov raboty kompressornykh stantsiy promyshlennykh predpriyatiy: ucheb. posobiye* [Optimization of operating modes of compressor stations of industrial enterprises: studies. manual]. Voronezh, Voronezh. politekh. in-t., 1987, 87.
8. **Kochkin, P. A., Mukhin, I. N.** Metody povysheniya effektivnosti raboty kompressornykh stantsiy [Methods to improve the efficiency of compressor stations]. *Informatizatsiya i sistemy upravleniya v promyshlennosti [Informatization and control systems in industry]*, 2009, 3(23).
9. **Zhigulin, I. N.** Optimizatsiya raboty kompressornoy stantsii promyshlennogo predpriyatiya. *Transport-2014 : trudy mezhd. nauch.-prakt. konf. (22-25 aprelya 2014 g.; Rostov-na-Donu)*. [Transport-2014: works between. scientific-practical conf. (Rostov-on-Don)]. Rostov-na-Donu: Izd-vo Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya, 2014, Part.2, 224-226.

23. **Tamminen, J., Ahonen, T., Kosonen, A., Ahola, J., Tolvanen, J.** Variable speed drive-based pressure optimization of a pumping system comprising individual branch flow control elements. *16th European Conference on Power Electronics and Applications*, Lappeenranta, Finland, 2014, doi: 10.1109/EPE.2014.6910988.
24. **Annus, I., Uibo, D., Koppel, T.** Pumps Energy Consumption Based on New EU Legislation. *Procedia Engineering*, 2014, 89, 517-524, doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.473.
25. **Vodovozov, V., Gevorkov, L., Raud, Z.** Circulation centrifugal pump with variable speed drives and minimal electricity consumption. *11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, Cadiz, Spain, 2017, doi: 10.1109/CPE.2017.7915193.
26. **Almeida, A. T., Fonseca, P., Falkner, H., Bertoldi, P.** Market Transformation of Energy-Efficient Technologies in the EU. *Energy Policy*, 2003, 31, 563-575, doi: 10.1016/S0301-4215(02)00100-3.
27. **Ahonen, T., Tamminen J., Ahola J., Kestilä J.** Frequency-Converter-Based Hybrid Estimation Method for the Centrifugal Pump Operational State. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59, 4803-4809, doi: 10.1109/TIE.2011.2176692.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Лухтура Федор Иванович** – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ст. преподаватель кафедры промышленных теплоэнергетических установок и теплоснабжения; г. Мариуполь, Украина; e-mail: lukhelena@yandex.ru.

**Fedor Lukhtura** – Senior Lecturer, Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, State higher educational establishment “Priazovskyi State Technical University”, Mariupol, Ukraine; email: lukhelena@yandex.ru.

**Медведева Марина Владимировна** – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ассистент кафедры промышленных теплоэнергетических установок и теплоснабжения; г. Мариуполь, Украина.

**Marina Medvedieva** – Assistant lecturer, Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, State higher educational establishment “Priazovskyi State Technical University”, Mariupol, Ukraine.

*Please cite this article as:*

**Лухтура, Ф. И.** О применении импульсного подачи рабочей среды в системы водоснабжения / **Ф. И. Лухтура, М. В. Медведева** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 48-57. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.07.

*Please cite this article as:*

**Lukhtura, F., Medvedieva, M.** On the application of pulsed supply of working environment in water supply systems. *Bulletin of NTU KhPI. Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), 48-57, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.07.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Лухтура, Ф. І.** Про застосування імпульсної подачі робочого середовища в системи водопостачання / **Ф. І. Лухтура, М. В. Медведева** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 48-57. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.07.

**АНОТАЦІЯ** Розглянуто питання, пов'язані з впливом імпульсного (циклічного) підключення насосів в мережу на ефективність роботи насосних станцій і параметри систем водопостачання. Розроблено математичну динамічну модель системи виробництва і розподілу рідини для аналізу роботи насосів в імпульсному режимі. На основі аналізу рівняння динаміки подачі робочого середовища (енергоносія) в систему розподілу визначені раціональні значення тривалості (імпульсів) підключення агрегатів насосної станції і паузи між імпульсами, а також сквантності імпульсів, в залежності від ємності мережі та акумуляторів, і величини споживання рідини. Показано суттєвий вплив зазначених функціональних параметрів на характеристики імпульсного підключення нагнітачів і інтенсивність подачі енергоносія. Характерно, що зміна величини тиску (напору), як при його зростанні, так і при його зниженні, наприклад при включенні і відключенні приводу нагнітача, відбувається нелінійно. Причому наповненість поля графіка зміни тиску різна, що істотно впливає на енергетичні показники роботи насосної станції в такому режимі. Визначено також діапазони зміни частоти імпульсів, в яких може бути більш ефективний імпульсний режим підключення нагнітачів в системах водопостачання в порівнянні зі стаціонарним режимом експлуатації. Наведена інженерна теорія може служити основою для розробки алгоритмів системи регулювання нагнітача шляхом переключення, наприклад, на холостий хід або включення-виключення приводу, аналізу його роботи при часткових режимах з оцінкою витрат споживаної енергії, з метою підвищення економічної ефективності від використання нагнітачів в пропонуваніх режимах. Отримані результати також корисно використовувати для вирішення оптимізаційних задач на змінних режимах роботи насосної станції при покритті її графіків навантажень. Даний підхід і представлені рішення можуть бути поширені на інші класи нагнітачів - компресори, вентилятори, що використовують як робоче середовище газ.

**Ключові слова:** насос; рідина; енергія; акумулятор; імпульсна (циклічна, поетапна) регулювання; коефіцієнт заповнення циклу.

Поступила (received) 08.02.2019



УДК 621. 577

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.08

## СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

В. О. ТАРАСОВА\*, М. О. КУЗНЕЦОВ, Д. Х. ХАРЛАМПІДІ

Відділ моделювання та ідентифікації теплових процесів, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків, УКРАЇНА

\*e-mail: Tarasova@nas.gov.ua

**АНОТАЦІЯ** Створення діагностичних засобів для моніторингу сучасних систем тепло- та холодопостачання будівель є наразі дуже актуальною задачею, рішення якої дозволить істотно знизити енергоспоживання і забезпечити необхідний температурний режим в приміщенні в цілому або в локальних місцях великої споруди, де необхідна організація зонального обігріву або охолодження. В даний час з підвищенням ціни на енергоносії все більше впроваджуються сучасні енергозберігаючі системи термотрансформації для комплексного тепло- та холодопостачання. Розроблення системи ефективного моніторингу дозволить усунути безліч проблем, які пов'язані з впливом експлуатаційних факторів, ще до моменту їх критичного накопичення, що в подальшому дозволить забезпечити помітний ефект енергозбереження. Метою роботи є створення методики обробки даних моніторингу систем тепло- та холодопостачання на базі парокомпресорних теплових насосів і чилерів із залученням сучасних методів прикладної термодинаміки для діагностування їх енергетичної ефективності. Методика дозволяє в режимі «on-line» здійснювати термодинамічне тестування роботи установки за обмеженою кількістю параметрів, що замірюються, в тому числі в режимі роботи парокомпресорних теплових насосів і чилерів з частковим навантаженням. Розроблено інструментарій визначення реальних ексергетичних втрат в елементах парокомпресорних чилерів і теплових насосів без залучення баз даних теплофізичних властивостей холодоагентів, тобто переважно за допомогою тих параметрів, що реєструються контрольно-вимірювальними приладами (температура, потужність приводу компресора). Запропоновано графоаналітичний спосіб визначення температур випаровування і конденсації в циклі парокомпресорних чилерів і теплових насосів. Виконано аналіз даних моніторингу діючої теплонасосної системи тепло- та холодопостачання адміністративної будівлі, за результатами якого визначено аномалії в роботі випарника цієї установки.

**Ключові слова:** моніторинг; незворотність; ексергія; ентропійно-статистичний аналіз; дилер; тепловий насос

## HEAT PUMP ENERGY EFFICIENCY MONITORING AND DIAGNOSTIC SYSTEM

V. TARASOVA, M. KUZNETSOV, D. KHARLAMPIDI

Department of Modeling and Identification of Thermal Processes, A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of NAS of Ukraine, Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The creation of diagnostic tools for monitoring of modern heat and cooling systems for buildings is now a highly topical task, the solution of which will significantly reduce the energy consumption and provide the necessary temperature conditions in the room as a whole or in local areas of a large construction, where the organization of zonal heating or cooling is necessary. Currently, with the increase in the price of energy, the modern energy-saving thermal transformation systems for integrated heat and cold supply are increasingly being introduced. Development of an effective monitoring system will eliminate many problems associated with the impact of operational factors, even before their critical accumulation, and in the future will provide a noticeable effect of energy saving. The aim of the work is to create a method for processing monitoring data of heat and cold supply systems based on steam-compressor heat pumps and chillers, using the modern methods of applied thermodynamics to diagnose their energy efficiency. The method allows the real-time thermodynamic testing of the unit's operation using a limited number of measured parameters, including the partial load mode of steam-compressor heat pumps and chillers. The method was developed to determine the actual exergy losses in the elements of the steam-compressor chillers and heat pumps using parameters recorded by measuring devices (temperature, drive power of the compressor) without using databases on the thermophysical properties of refrigerants, that is. A grapho-analytical method for determining the evaporation and condensation temperatures in a cycle of steam-compressor chillers and heat pumps is proposed. The analysis of monitoring data during the operating heat pump of the existing administrative building heat and cold supply system was carried out, the results of which revealed anomalies in the operation of the evaporator of this installation.

**Keywords:** monitoring; irreversibility; exergy; entropy-statistical analysis; chiller; heat pump.

### Вступ

Підприємства з виробництва та зберігання харчової продукції, а також більшість об'єктів

житлово-комунального сектору є найбільшими споживачами енергоресурсів. Ситуація, яка склалася наразі в Україні, є наслідком того, що інженерні системи цих підприємств, які включають холодильне,

вентиляційне, теплообмінне, насосно-компресорне і цілий ряд іншого обладнання, проектувалися понад 20 років тому, коли ціни на енергоносії були відносно низькими, тому на більшості підприємств не приділялося належної уваги питанням розробки енергоефективних схем рекуперації теплової енергії або впровадженню ефективних систем на базі термотрансформаторів. Наразі з підвищенням ціни на енергоносії ситуація кардинально змінилася, а саме при будівництві нових житлових комплексів і торгово-розважальних центрів все більш впроваджуються сучасні енергозберігаючі системи термотрансформації для виконання функцій комплексного тепло- та холодопостачання. Між цим, впровадження цих систем, незважаючи на їх привабливість з точки зору майбутнього енергозаощадження та загальної екологічної безпеки, гальмується не тільки за рахунок їх достатньо великої капітальної вартості, але також у зв'язку з непрофесійним підходом до їх проектування та подальшої експлуатації. Це призводить до збільшення терміну їх окупності та в деяких випадках, взагалі, до відмови споживачів від таких систем.

Взагалі енергоємність одиниці виробленої теплоти або холоду протягом всього терміну експлуатації систем тепло- та холодопостачання на базі сучасних чилерів та теплових насосів фактично не контролюється. Після монтажу системи на об'єкті питання контролю її параметрів, як правило, стає вже обов'язком споживача, а не виробника обладнання. Між цим, за нашим глибоким переконанням, контроль витрати енергії в системах термотрансформації повинен бути такою ж обов'язковою процедурою, як і контроль витрати палива в автомобілі, якщо використовувати подібну аналогію.

Слід зазначити, що в останні роки ситуація щодо впровадження систем моніторингу почала змінюватися і деякі підприємства самі встановлюють ці системи на об'єктах з теплонасосним обладнанням [1–3]. Однак моніторинг теплового насосу або чилера на цих об'єктах в багатьох випадках обмежується тільки спостереженням за роботою установки з «on-line» реєстрацію незначної кількості параметрів, що заміряються, створенням їх архіву, а також побудовою багатьох незрозумілих графіків, що мають лише ілюстративний характер, та за допомогою яких можна лише здійснити управління установкою у так званому «ручному» режимі. Крім того, відсутність аналізу та узагальнення результатів такого моніторингу взагалі унеможливує створення більш досконалих перспективних проектів систем тепло- та холодопостачання будівель торговельного, адміністративного призначення, об'єктів харчової промисловості та житлово-комунального сектору. Таким чином, можна стверджувати, що наразі існує запит у проведенні заходів, що спрямовані на визначення енергоощадних режимів експлуатації

термотрансформаторів, які працюють у складі сучасних систем забезпечення мікроклімату. А саме, створення методики моніторингу та діагностики енергетичної ефективності таких систем, яка здатна виявляти похибки у проектуванні обладнання та дозволяла скорегувати режими роботи цих систем під час їх експлуатації.

При цьому слід зазначити, що завдання створення системи моніторингу на об'єкті, де встановлене дороге сучасне теплонасосне обладнання, ускладнюється ще одним фактором – це гарантійне обслуговування установки. Власники торговельних об'єктів, які оснащені сучасними імпортними кліматичними системами, перш за все побоюючись за порушення вимог гарантійного обслуговування, не допускають втручання у контур циркуляції холодоагенту з метою здійснення замірів температур та тиску у характерних точках циклу. Замірюються лише режимні параметри зовнішнього контуру, вологість зовнішнього повітря, енергія, що витрачається на привід компресора, вентилятора та насосу. Між цим без наявності інформації відносно параметрів циклу холодоагенту неможливо якісно провести діагностику ефективності установки з визначенням ексергетичних втрат у кожному елементі [4,5].

На нашу думку, тільки аналіз термодинамічної досконалості сучасних систем забезпечення мікроклімату дозволить судити про дійсну енергоємність вироблених теплоти і холоду та свідчити взагалі про якість системи. У такій постановці завдання моніторингу систем тепло- та холодопостачання нам уявляються набагато ширше. Це не просто спостереження за параметрами роботи установки та реєстрація споживаної енергії, але також аналіз і діагностика термодинамічної ефективності всієї системи.

### Мета роботи

Створення діагностичних засобів для моніторингу сучасних систем тепло- та холодопостачання будівель та споруд є наразі досить актуальною задачею, вирішення якої дозволить суттєво знизити енергоспоживання та забезпечити необхідний температурний режим у приміщенні в цілому або у локальних місцях великої споруди (наприклад, торгової зали супермаркету, виробничого цеху й тощо), де необхідна організація зонального обігріву або охолодження.

Метою роботи є створення методики обробки даних моніторингу систем тепло- та холодопостачання на базі пароконпресорних теплових насосів (ТН) та чилерів із залученням сучасних методів прикладної термодинаміки з ціллю діагностування їх енергетичної ефективності.

**Аналіз існуючих підходів до діагностування роботи сучасних систем забезпечення мікроклімату на основі чилерів та теплових насосів**

Накопичений досвід експлуатації ТН дозволяє стверджувати, що тільки за рахунок створення системи ефективного моніторингу безліч проблем, що пов'язані з впливом експлуатаційних факторів, може бути усунено ще до моменту їх критичного накопичення, що в подальшому дозволить забезпечити помітний ефект енергозбереження.

На початку дев'яностих років ХХ ст. з'явилась ціла низка новаторських робіт щодо діагностики чилерів і установок кондиціонування, які були переважно орієнтовані на виявлення в установках ознак несправностей і складання так званої «матриці симптомів». Кожній несправності відповідало збільшення або зменшення конкретних вимірюваних параметрів (наприклад, температур і тисків в термодинамічному циклі) щодо цих параметрів при справному стані установки [1, 6]. Основними недоліками такої діагностики була неможливість ідентифікації декількох несправностей. В останні два десятиліття розроблені методики більш точного визначення аномалій в роботі чилерів і ТН [2,7,8], метою яких було виявлення причин, що впливають на зменшення ефективності установки, а також забезпечення можливостей для швидкого їх усунення. Розроблені «on-line» FDD методики діагностики термотрансформаторів дозволяли визначити вплив декількох аномалій на продуктивність установки [2]. При реалізації цих методик, які базуються на вимірах термодинамічних параметрів установки, для виявлення несправностей, що призводять до зниження її продуктивності, використовуються віртуальні датчики і спрощені математичні моделі прогнозування характеристик термотрансформаторів. Слід додати, що «on-line» FDD методики, в решті решт, можуть ідентифікувати лише конкретну несправність, але вони не дозволяють оцінити, чи є певна причина аномалії «важкою» або «легкою» у контексті загального енергоспоживання установки. Для цього необхідна оцінка впливу величини деструкції ексергії в елементі через аномалію на приводну потужність всієї установки. Щоб кількісно оцінити цей вплив, широко використовуються методи сучасної прикладної термодинаміки. В останні роки набула розвитку одна з її напрямків – термoeкономічна діагностика [9].

До числа фундаментальних досліджень в галузі термoeкономічної діагностики енергетичної ефективності енергоперетворюючих систем по праву можна віднести роботи школи професора кафедри енергетичного машинобудування і охорони навколишнього середовища Дж. Тсатсароніса (Інженерно-технічний університет, м. Берлін, Німеччина). Також слід відзначити роботи проф. А. Валеро, проф. М. Лозано (Технічний університет, м. Сарагоса, Іспанія).

За результатами термoeкономічної діагностики можна представити повну картину розподілу деструкції ексергії в елементах установки. Водночас, використовуючи зазначені методики [6–9] без вимірювання температур і тисків холодоагенту в усіх точках термодинамічного циклу ТН, отримати вичерпну інформацію про ефективність елементів фактично неможливо.

Серед вітчизняних авторів, близьких за розглянутими питаннями, слід відзначити роботи проф. В. В. Вичужаніна (Одеський національний морський університет) [10]. Його роботи пов'язані з управлінням системами комфортного кондиціонування повітря за розрахунковими ексергетичними характеристиками. Однак результати цих досліджень спрямовані лише на діагностику центральних прямоотоково-рециркуляційних повітряних систем кондиціонування і не розраховані на тестування термодинамічних характеристик чилерів. Крім того, існує ще один важливий аспект експлуатації ТН, який залишається за рамками можливостей перерахованих методик аналізу і діагностики. Це робота ТН в режимі з неповним навантаженням. Термодинамічний аналіз цього режиму за допомогою традиційних «енергетичних» методик провести коректно неможливо. Найбільш доцільним при оцінці ефективності режиму з частковим навантаженням є ентропійно-статистичний метод аналізу, що запропонований у роботах вчених Дж. М. Гордона і К. С. Нджу [11–13].

**Постановка задачі дослідження**

Як коефіцієнт перетворення ТН, так і холодильний коефіцієнт холодильної машини (ХМ) визначають лише інтегральну характеристику ефективності і свідчать про якість установки. У ряді випадків вони можуть навіть дезорієнтувати. Так, будь-яка застаріла установка, що має в своєму складі неефективні компресор, а також неефективний конденсатор або випарник, але що експлуатується в значно менших температурних межах термодинамічного циклу, має більш високий коефіцієнт перетворення, ніж нова технічно досконала установка, але що експлуатується у більших температурних межах циклу. Тому використання технічних методів діагностування потребує чіткого визначення температурних меж циклу та співставлення з еталонними характеристиками установки. Більш універсальним є термодинамічний підхід, що базується на аналізі реальних значень втрат від незворотності, який дозволяє визначити дійсну енергоемність виробленого тепла або холоду та свідчить про конструктивну якість термотрансформатора [4,5]. Розуміння того, що існуючий апарат класичної термодинаміки не може дати відповідь на питання щодо реальних значень втрат в термотрансформаторах, спонукає шукати можливі

шляхи вирішення цього завдання. Зокрема доцільно розглядати підхід, що заснований на залученні в аналізі статистичних даних відносно значень реальних дисипативних втрат, які мають місце в сучасних чилерах і теплових насосах. Такий підхід дає уявлення щодо характеру розподілення різних видів незворотних втрат в залежності від продуктивності установки. Областю практичного застосування методу ентропійно-статистичного аналізу, тобто де він особливо затребуваний, на нашу думку є системи моніторингу і діагностики систем тепло- та холодопостачання на основі чилерів і теплових насосів.

З урахуванням відзначеного представилася доцільною розробка інтегральних засобів щодо експериментального визначення теплового потенціалу енергетичних потоків у сучасних системах забезпечення мікроклімату приміщень, що дозволяють при мінімальній кількості дослідів, а також в незручних місцях системи здійснити заміри параметрів потоку повітря. Отримана інформація щодо даних замірів повинна бути оброблена за допомогою методів статистики та проаналізована. Для цього потрібна розробка методики обробки даних моніторингу і діагностики сучасних систем термотрансформації, яка дозволяє за обмеженої кількості параметрів, що замірюються, проводити в «on-line» режимі тестування термодинамічної ефективності кожного елемента установки.

### Розробка методики обробки даних моніторингу діючої теплонасосної системи теплопостачання адміністративної будівлі

Розглянемо етапи обробки даних замірів параметрів та алгоритм розрахунку термодинамічної ефективності на прикладі системи моніторингу теплового насосу, що експлуатується у складі бівалентної системи опалення адміністративної будівлі.

Загальна методика включає три етапи: перший етап – моніторинг ТН, що передбачає тільки реєстрацію даних і збір інформації про роботу ТН (архівацію); другий етап – обробка даних моніторингу; третій етап – аналіз і діагностика термодинамічної ефективності ТН з залученням ентропійно-статистичних моделей.

Низькотемпературну систему водяного опалення на базі теплового насоса типу «повітря - вода» впроваджено у будівлі торгово-офісного комплексу м. Харкова, об'ємом 17580 м<sup>3</sup>, сумарним тепловим навантаженням 924 кВт. Згідно проекту було встановлено два теплових насоса марки Vicot серії VMN430L, що використовують як холодоагент фреон R407C.

Проектний режим роботи ТН: теплопродуктивність  $Q_k=450$  кВт, споживана потужність компресора  $N_{KM}=(59,9+76,8)$  кВт при температурі зовнішнього повітря  $T_{nc}=7$  °С і

температурах води на вході і виході конденсатора  $T_w=40/45$  °С.

На рис. 1 наведено мнемосхему системи опалення на базі ТН, що ілюструє перший етап методики – збір інформації щодо характеристик системи. Для обліку витрат теплоти на опалення використовується моноканалний лічильник тепла ФОРТ-04.

Інформаційно-вимірювальний комплекс, що розроблений для дистанційного моніторингу температур теплонасосної системи, базується на технології збору, передачі або зберігання інформації у вигляді пристроїв сімейства iButton Termochron і дозволяє за рахунок синхронного вимірювання температури одночасно у великій кількості точок досліджуваних об'єктів застосувати для обробки даних сукупність засобів регресійного, кореляційного і спектрального аналізів, що гарантує найбільш достовірне визначення температурних характеристик і ефективності роботи опалювальних систем на основі теплових насосів (рис. 2).

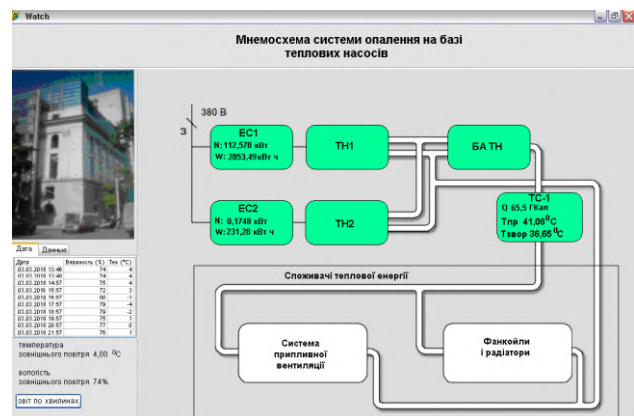


Рис. 1 – Мнемосхема системи опалення з ТН: EC1, EC2 – електролічильники; ТН1, ТН2 – теплові насоси; БА ТН – бак-акумулятор; ТС-1 – лічильник тепла

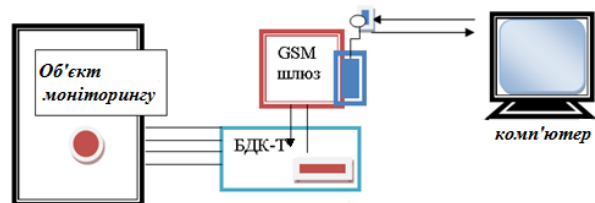


Рис. 2 – Принципова схема інформаційно-вимірювального комплексу

До складу комплексу входять (рис. 2):

- блок дистанційного контролю температур БДК-Т;
- шлюз передачі інформації GSM;
- персональний комп'ютер.

На другому етапі проводиться обробка даних моніторингу ТН.

Система моніторингу ТН здійснює замір наступних параметрів (рис. 3): температури «прямої» води  $T_{пр}$ , що подається до споживача тепла (відповідає температурі води на виході з конденсатора  $T_{w2}$ ), температури «зворотної» води  $T_{звор}$ , що повертається охолодженою від споживача тепла (відповідає температурі води на вході в конденсатор  $T_{w1}$ ), температури  $T_{hc}$  і вологості  $\phi$  зовнішнього повітря, а також споживання електроенергії компресором  $N$ , що замірюється на клеммах електродвигуна та реєструється кожну секунду роботи установки.

При розгляді інформації про роботу ТН щодо потужності було виявлено, що другий ТН не включався в цей період роботи ( $N_2 < 0,32$  кВт). Перший же компресор працював з частими остановами – періодами, коли його потужність  $N_1$  не перевищувала значення 2,7 кВт.

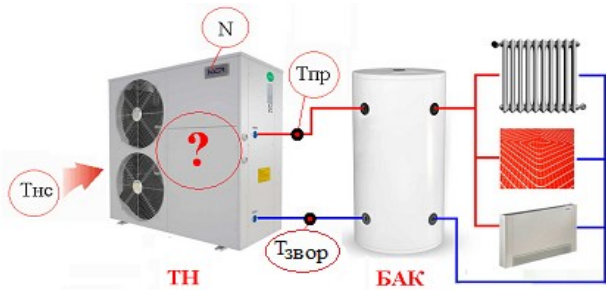


Рис. 3 – Ілюстративна схема параметрів, що замірюються при роботі ТН

Коефіцієнт перетворення  $COP_h$  визначається за формулою як співвідношення теплопродуктивності  $Q_k$  до споживання електроенергії компресором, що замірюється на клеммах електродвигуна,  $N$ .

$$COP_h = \frac{Q_k}{N} = \frac{G_w \cdot c_{pw} (T_{пр} - T_{звор})}{N}$$

де  $G_w, c_{pw}$  – витрата і теплоємність води.

Індикаторна потужність компресора  $N_{км}$ , що споживається на стиск холодоагенту, визначається як

$$N_{км} = N \cdot \eta_{ем}$$

де  $\eta_{ем}$  – електромеханічний ККД компресора.

На рис. 4 наведено дані моніторингу щодо зміни температур теплоносіїв і вологості повітря за розглянутий термін.

На підставі заміряних параметрів для першого ТН марки VMN430L було визначено характер змінювання теплопродуктивності, електричної енергії, що витрачається на привід ТН (рис. 5), та обчислено коефіцієнт перетворення ТН (рис. 6).

З рис. 4–6 видно, що при зниженні температури зовнішнього повітря нижче  $-1$  °С ТН часто відключався, а при зниженні  $T_{hc}$  нижче  $-5$  °С – відключився на довгий період часу (5 діб). Крім того, видно, що за весь аналізований термін експлуатації

ТН його теплопродуктивність була нижче проектною на 150 кВт. Однак за значеннями  $COP_h$  виявити будь-які несправності в роботі ТН складно, тому що він є функцією температур на вході в теплообмінники.

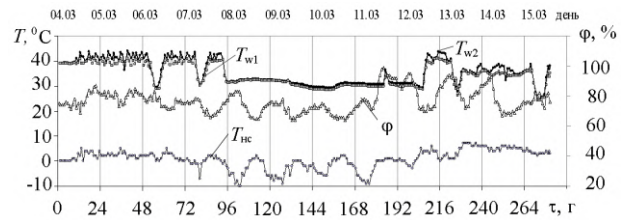


Рис. 4 – Зміна вологості  $\phi$  і температур зовнішнього повітря  $T_{hc}$ , води на вході  $T_{w1}$  і на виході конденсатора  $T_{w2}$  протягом експлуатації ТН

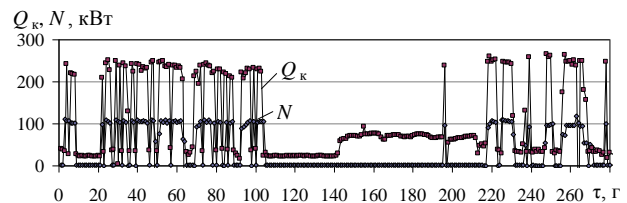


Рис. 5 –  $N$  і  $Q_k$ , що визначені у результаті обробки даних моніторингу

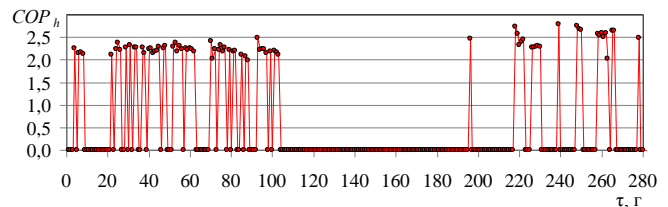


Рис. 6 – Коефіцієнт перетворення ТН за результатом обробки даних моніторингу

Для оцінки ефективності за енергетичними характеристиками режимів роботи ТН були побудовані залежності холодопродуктивності  $Q_0$  і потужності  $N$  від температур теплоносіїв на вході у випарник  $T_{s1}$  і конденсатор  $T_{w1}$  за даними виробника [14], використовуючи поправочні коефіцієнти.

На рис. 7 представлено порівняння статичних характеристик установки, що діагностується, з еталонними режимами.

Маркерами на рис. 7 показані реальні характеристики, пунктирними лініями – еталонні, що наведені виробником в каталогах.

З рис. 7 видно, що при однакових режимних параметрах (температури теплоносіїв на вході в теплообмінні апарати  $T_{s1}$  і  $T_{w1}$ ) в еталонному та діагностуемому режимах холодопродуктивність установки, що діагностується, істотно нижче.



Розрахунок холодильного коефіцієнту за формулою

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{N} = \frac{Q_k - N_{\text{км}}}{N}$$

довів, що для еталонних режимів він змінюється від 2,4 до 3,06, а для діагностованих – у межах 0,98 ÷ 1,7.

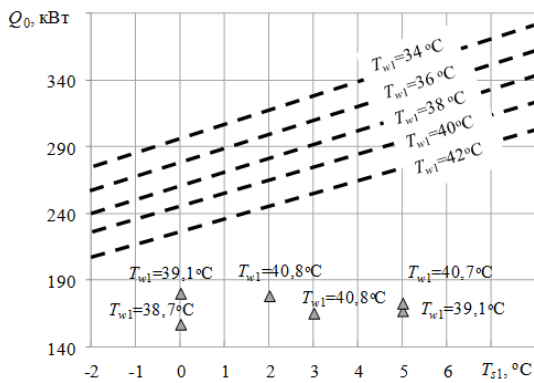


Рис. 7 – Статичні характеристики ТН VMN430L

Для аналізу ефективності роботи ТН залежність  $\varepsilon$  для еталонного і дійсного режимів роботи від співвідношення температур на вході в теплообмінні апарати наведено на рис. 8.

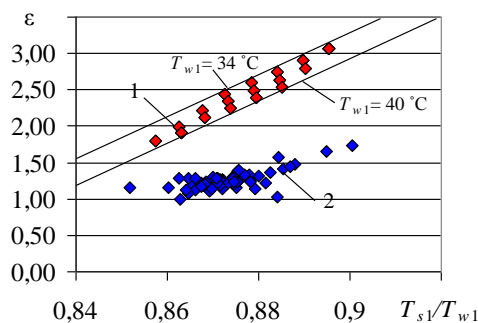


Рис. 8 – Залежність  $\varepsilon$  від співвідношення температур  $T_{s2}/T_{w1}$ : 1 – еталонний режим; 2 – дані моніторингу

З рис. 8 можна бачити, що  $\varepsilon$  установки, що діагностується, істотно нижче еталонних значень. Однак причини такого низького холодильного коефіцієнта з'ясувати за енергетичними характеристиками неможливо.

Аналіз роботи за енергетичними показниками ефективності дозволяє зробити лише припущення, що відключення ТН може відбуватися з наступних причин. Перша причина – ТН відключається, коли температура води в баку-акумуляторі (БА<sub>ТНА</sub>) досягає необхідного рівня. Друга причина – відключення ТН пов'язано з обмерзанням випарника і необхідністю подальшої процедури дефростації (розморожування).

Третя причина – ТН відключається при температурах зовнішнього повітря нижче  $-1^\circ\text{C}$ , після чого для покриття теплового навантаження системи опалення потрібно підключати теплогенератор.

Для більш детального розбору причин неефективної роботи установки необхідно перейти до наступного третього етапу.

Третій етап запропонованої методики передбачає аналіз і діагностику ефективності ТН з використанням напівемпіричних термодинамічних моделей. На цьому етапі з'ясується, чи відповідають реальні значення енергетичної ефективності ТН тим значенням, які виробник заявляє як еталонні для даної моделі.

Оскільки ТН, що діагностується, є установкою великої теплопродуктивності (понад 150 кВт), спочатку для математичного опису режимів його роботи слід використовувати двопараметричну термодинамічну модель [12].

Методом множинної регресії були оброблені заявлені виробником каталожні значення енергетичної ефективності ТН – чилера VMN430L. При відповідних температурах води на вході в конденсатор  $T_{w1}$  і повітря на виході з випарника  $T_{s2}$ , а також заданому значенні  $Q_0$  отримано регресійні рівняння наступного виду

$$\left[ \frac{1}{\varepsilon} + 1 - \frac{T_{w1}}{T_{s2}} \right] Q_0 = 3,0825 T_{w1} - 775,4836 - 83,701 (T_{w1}/T_{s2}), \quad (1)$$

яке при термодинамічному аналізі використовується як еталонна характеристика ТН.

Слід зазначити одну важливу особливість ентропійно-статистичного аналізу ТН. Для отримання регресійного рівняння (1) обробка даних здійснювалася за величинами  $Q_0$  і  $\varepsilon$ . Залучення до обробки значень теплопродуктивності  $Q_k$  установки і коефіцієнту перетворення  $COP_h$  є некоректною постановкою задачі щодо створення ентропійно-статистичної моделі. Це вимагає пояснення. Згідно енергетичного балансу ТН індикаторна потужність компресора  $N_{\text{км}}$  визначає величину корисної теплової потужності ТН  $Q_k = Q_0 + N_{\text{км}}$ . При цьому та ж потужність витрачається також на подолання термогідрравлічної незворотності в циклі. У зв'язку з цим виділити вплив втрат в циклі на коефіцієнт перетворення ТН без урахування  $N_{\text{км}}$  при збереженні заданої теплової продуктивності неможливо. З цієї причини втрати від незворотності мають бути віднесені до холодопродуктивності установки, а не до її теплопродуктивності.

Вірогідність регресійного рівняння підтверджується оцінкою основних статистичних показників і критеріїв [15]. На рис. 9 наведено порівняння розрахункових даних з даними моніторингу.

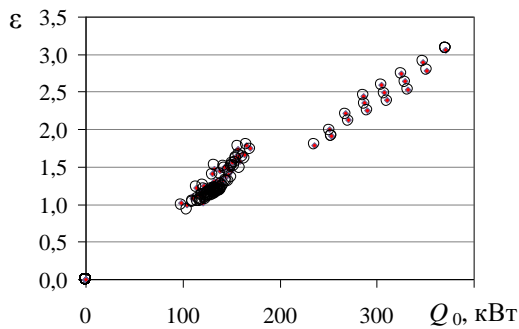


Рис. 9 – Залежність  $\varepsilon$  від  $Q_0$ :  $\blacklozenge$  –  $\varepsilon$ , що визначений за даними моніторингу;  $\circ$  –  $\varepsilon$ , що визначений по двопараметричній регресійній моделі ТН

На рис. 10 наведено сумарні втрати в ТН VMN430L. Втрати, певні для проектних режимів роботи установки, можна описати лінійними залежностями при варіюванні температури теплоносія на вході в конденсатор. Значення втрат для діагностуємих режимів ТН лежать дещо вище, ніж ті, які повинні бути для цієї установки.

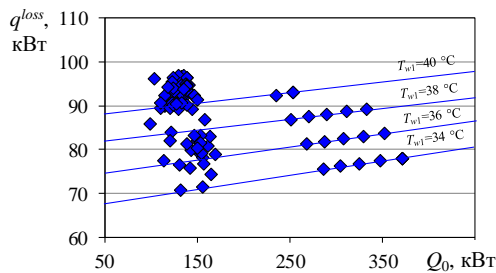


Рис. 10 – Сумарні втрати  $q^{loss}$  в ТН VMN430L

На рис. 11 наведено втрати від незворотності з розподіленням їх відповідно на зони випаровування і конденсатора. Як можна бачити, втрати, що віднесені до зони випаровування, перевищують втрати, що мають бути при нормальній роботі ТН. Перевищення втрат у конденсаторі у зрівнянні з нормальним режимом роботи ТН не спостерігається.

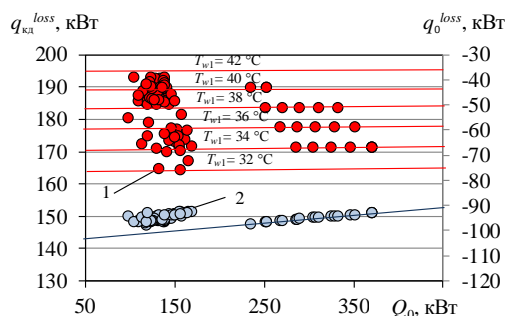


Рис. 11 – Розподілення втрат в ТН VMN430L: 1 – втрати, що віднесені до зони конденсатора  $q_{kd}^{loss}$ ; 2 – втрати, що віднесені до зони випаровування  $q_0^{loss}$

Аналіз ТН на основі двопараметричної моделі довів, що існує аномалія в зоні випарника. Ця аномалія може бути пов'язана не тільки зі зниженням ефективності безпосередньо роботи випарника, але й інших елементів.

Для локалізації можливих аномалій (несправностей) необхідно ідентифікувати температури випаровування і конденсації в циклі. Для ТН Vicot серії VMN430L проведено аналіз з визначенням температур випаровування і конденсації в циклі та поелементним ексергетичним аналізом. При цьому для визначення внутрішньої дисипації енергії в циклі використовувалась напівемпірична трьохпараметрична ентропійно-статистична модель [13]

$$\frac{T_{s1}}{T_{w1}} \left[ 1 + \frac{1}{\varepsilon} \right] - 1 = \frac{T_{s1} \Delta S_{вн}}{Q_0} + \frac{Q_{тп}^{екв} (T_{w1} - T_{s1})}{T_{w1} Q_0} + \frac{R_{сум} Q_0}{T_{w1}} \left[ 1 + \frac{1}{\varepsilon} \right]. \quad (2)$$

У рівнянні (2) величина  $\Delta S_{вн}$  визначає внутрішні дисипативні втрати енергії у циклі, у тому числі, що пов'язані з впливом гідравлічних опорів за трактом холодоагенту,  $Q_{тп}^{екв}$  – теплові втрати з поверхні обладнання,  $R_{сум}$  – сумарні втрати від незворотності внаслідок кінцевої різниці температур у випарнику та конденсаторі.

Величини внутрішньої дисипації енергії для ТН Vicot серії VMN430L визначені методом множинної лінійної регресії як коефіцієнти в рівнянні (2) для масиву даних, який отриманий шляхом обробки експериментальних даних, що надані виробником  $\Delta S_{вн} = 0,1223$  кВт/К,  $Q_{тп}^{екв} = 210$  кВт і  $R_{сум} = 0,044$  К/кВт.

Якщо установка працює справно у штатному режимі, ці коефіцієнти мають залишатися такими ж, як і у еталонному режимі установки. Будь які несправності установки (аномалії у роботі обладнання) відображаються на значеннях цих коефіцієнтів.

Нами запропоновано новий спосіб визначення коефіцієнтів  $R_{сум}$ ,  $Q_{тп}^{екв}$  і  $\Delta S_{вн}$  для установки, що діагностується. Він полягає в тому, що вони визначаються вже не як регресійні коефіцієнти в рівнянні (2), що отримані у результаті обробки даних випробувань (на відміну від методики, що наведена у [13]), а обчислюються по залежностям, що отримані для значень втрат від незворотності у еталонних режимах, за наступним алгоритмом.

Алгоритм визначення  $R_{сум}$ ,  $Q_{тп}^{екв}$  і  $\Delta S_{вн}$  можна розділити на етапи:

1. За методом множинної лінійної регресії оброблюються дані заводських випробувань, що наведені в каталозі виробника, та визначаються еталонні значення  $R_{сум}$ ,  $Q_{тп}^{екв}$  і  $\Delta S_{вн}$ .
2. Визначаються втрати від незворотності на основі отриманих еталонних значень регресійних коефіцієнтів  $R_{сум}$ ,  $Q_{тп}^{екв}$  і  $\Delta S_{вн}$  по залежностям:



– внутрішні втрати від незворотності у циклі

$$Loss_{\Delta s} = T_{w1} \Delta S_{вн}; \quad (3)$$

– втрати з поверхні обладнання

$$Loss_Q = \frac{Q_{тп}^{екв} (T_{w1} - T_{s1})}{T_{s1}}; \quad (4)$$

– втрати від незворотності внаслідок кінцевої різниці температур у випарнику і конденсаторі

$$Loss_R = \frac{R_{сум} Q_0^2}{T_{s1}} \left[ 1 + \frac{1}{\epsilon} \right]. \quad (5)$$

3. Описується функціями залежність незворотних втрат від співвідношення  $T_{s1}/T_{w1}$ .

4. Визначаються незворотні втрати для установки, що діагностується, по функціях  $Loss = f(T_{s1}/T_{w1})$ , в які підставляються еталонні коефіцієнти для штатних режимів  $R_{сум}$ ,  $Q_{тп}^{екв}$  і  $\Delta S_{вн}$ .

5. З рівнянь для втрат (3–5) при підстановці параметрів, що заміряються у ході моніторингу, визначаються потрібні шукані коефіцієнти для установки, що діагностується.

6. Проводиться співставлення отриманих значень коефіцієнтів з еталонними значеннями  $R_{сум}$ ,  $Q_{тп}^{екв}$  і  $\Delta S_{вн}$ .

Очевидною є перевага такого способу. Не потрібно створювати новий масив даних щодо діагностуємих режимів роботи установки для того щоб визначати дійсні  $R_{сум}$ ,  $Q_{тп}^{екв}$  і  $\Delta S_{вн}$  як коефіцієнти регресії, а можна визначати їх в режимі «on-line». Крім того, визначення традиційним способом (за методом лінійної регресії) може призводити до похибки результатів, тому що при моніторингу має місце великий розкид даних замірювань.

На рис. 12 наведено змінювання значень  $R_{сум}$  для еталонних та діагностуємих режимів.

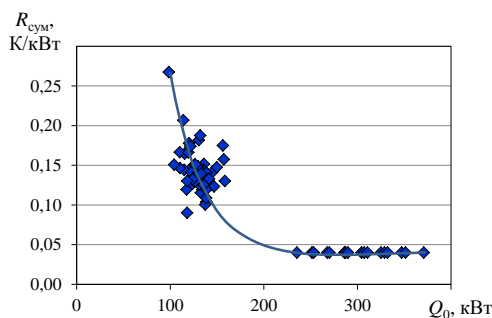


Рис. 12 – Змінювання  $R_{сум}$  від  $Q_0$

Як можна бачити з рис. 12, для режиму ТН, що діагностується, спостерігається істотне зростання

термічного опору. За результатами аналізу цього показника, зниження його ефективності може бути слідством виникнення наступних аномалій у роботі елементів та вузлів:

- зменшення витрати теплоносія в конденсаторі;
- пошкодження теплообмінної поверхні та трубопроводів обв'язки конденсатору;
- зменшення витрати теплоносія у випарнику;
- скипання;
- обмерзання поверхні випарника;
- комбінація вказаних несправностей.

Більш конкретний висновок щодо можливої аномалії можна зробити тільки визначивши температурні межі циклу за оригінальною методикою, яку наведено у [16].

У даному дослідженні ми суттєво вдосконалили відому ентропійно-статистичну модель Гордона-Нджу [13]. Як відзначалося самими авторами цієї моделі, головною вадою її застосування для діагностування ХМ і ТН було неможливість ідентифікації конкретної аномалії у елементі. Тестування термодинамічної ефективності установки на основі моделі Гордона-Нджу здійснювалося за рахунок лише співставлення визначених регресійних коефіцієнтів  $R_{сум}$ ,  $Q_{тп}^{екв}$  і  $\Delta S_{вн}$  для установки, що діагностується, з гранично допустимими значеннями цих же коефіцієнтів, що визначні за результатами заводських випробувань. У цілому це вказувало лише на інтегральний ефект впливу аномалій. Для визначення конкретної аномалії необхідно ідентифікувати температурні межі термодинамічного циклу і далі провести поглиблений ексергетичний аналіз. Далі наводяться етапи здійснення цього розрахунку.

Так, якщо записати модель Гордона-Нджу (2) для визначення потужності компресора, як

$$N = Q_0 \cdot \left[ \frac{T_{w1}}{T_{s1}} - 1 \right] + T_{w1} \Delta S_{вн} + \frac{Q_{тп}^{екв} (T_{w1} - T_{s1})}{T_{s1}} + \frac{R_{сум} Q_0^2}{T_{s1}} \left[ 1 + \frac{1}{\epsilon} \right],$$

то видно, що повна потужність складається з потужності, що витрачається в ідеальному циклі Карно, яка дорівнює

$$N_{C1} = Q_0 \cdot \left[ \frac{T_{w1}}{T_{s1}} - 1 \right],$$

та втрати від незворотності термогідрравлічних процесів. Записавши холодильний коефіцієнт для ідеального циклу Карно

$$\epsilon_{C1} = \left( \frac{T_{w1}}{T_{s1}} - 1 \right)^{-1}$$

і для циклу Карно в температурних межах випаровування  $T_0$  і конденсації  $T_k$

$$\varepsilon_{c2} = \frac{N_{c2}}{Q_0} = \left( \frac{T_k}{T_0} - 1 \right)^{-1} \leq \varepsilon_{c1},$$

а також припустивши, що різниця робіт в цих двох циклах  $(N_{c2} - N_{c1})$  дорівнює втратам внаслідок кінцевої різниці температур  $Loss_R$  (рис. 13), можна визначити співвідношення між  $T_k$  і  $T_0$

$$\varepsilon_{c2} = \frac{1}{\left( \frac{T_{w1}}{T_{s1}} - 1 \right) + \frac{R_{сум} Q_0}{T_{s1}} \left[ 1 + \frac{1}{\varepsilon} \right]} \Rightarrow \frac{T_k}{T_0}.$$

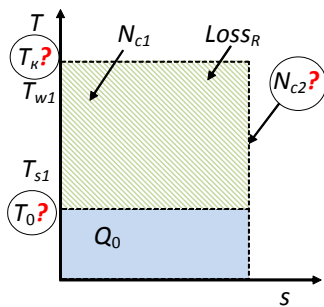


Рис. 13 – Схема визначення  $T_k/T_0$

Далі, використовуючи дані заводських випробувань ТН Vicot VMN430L, отримаємо поліноміальну залежність холодопродуктивності  $Q_0$  (кВт) напівгерметичного компресору від температур випаровування та конденсації

$$Q_0 = (532439 + 20260,27 \cdot T_0 - 3118,06 \cdot T_k + 302,629 \cdot T_0^2 - 147,278 \cdot T_0 \cdot T_k - 29,7935 \cdot T_k^2 + 1,602112 \cdot T_0^3 - 2,38901 \cdot T_k \cdot T_0^2 - 0,14603 \cdot T_0 \cdot T_k^2 + 0,081979 \cdot T_k^3) / 1000.$$

На рис. 14 наведено побудовану номограму для графоаналітичного визначення  $T_k$  і  $T_0$  в залежності від  $T_{s1}$  і  $T_{w1}$  та  $Q_0$  для ТН Vicot VMN430L.

Слід зазначити, що запропоновану номограму наведено виключно з метою ілюстрації розрахункового процесу визначення  $T_k$  і  $T_0$ . У створеному програмному забезпеченні для обробки даних моніторингу  $T_k$  і  $T_0$  визначаються у режимі «on-line» на основі чисельного моделювання.

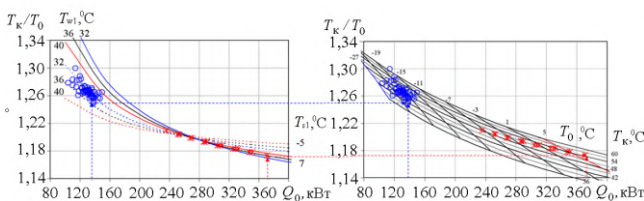


Рис. 14 – Номограма для визначення  $T_k$  і  $T_0$  для ТН Vicot VMN430L

Рис. 15 ілюструє графік режимних параметрів ТН, на якому нанесені значення  $T_k$  і  $T_0$ , що визначені за допомогою номограми (див. рис. 14). Скупчення точок понизу графіку відповідає значенням температур для режимів, що діагностуються.

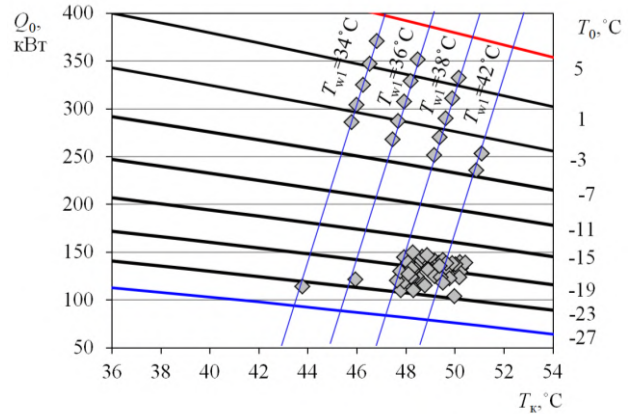


Рис. 15 – Графік режимних параметрів ТН

Як можна бачити з рис. 15, при експлуатації ТН спостерігається суттєве зниження  $T_0$ .

За результатами ексергетичного аналізу, який проведено за методикою [16], встановлено, що компресор та конденсатор ТН експлуатуються без виникнення аномалій, про що свідчить однаковий тренд графіків деструкції ексергії у еталонному та діагностуємому режимах (рис. 16–17). Між цим у роботі випарника можна констатувати суттєве збільшення деструкції ексергії, що свідчить про виникнення аномалії у цьому елементі (рис. 17).

На рис. 18 представлено зіставлення поточних значень втрат  $R_{сум}$  при зміні температурі зовнішнього повітря  $T_{nc}$  у часі. Штрихпунктирна лінія відповідає еталонному їх значенню.

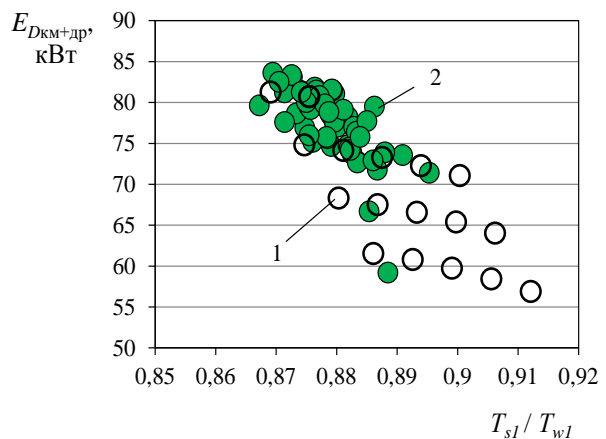


Рис. 16 – Залежність сумарної деструкції ексергії у компресорі і дроселі від  $T_{s1}/T_{w1}$ : 1 – еталонний режим; 2 – діагностуємий режим

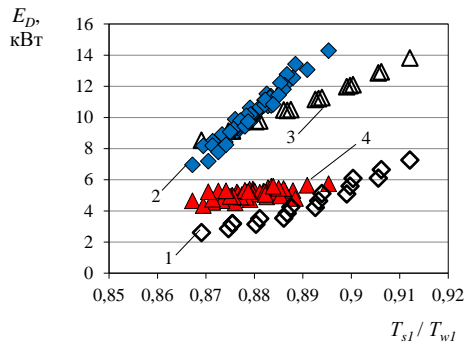


Рис. 17 – Залежність деструкції ексергії у конденсаторі і випарнику від  $T_{sl}/T_{w1}$ : 1, 2 – деструкція ексергії у випарнику для еталонних та діагностуємих режимів, відповідно; 3, 4 – деструкція ексергії у конденсаторі для еталонних та діагностуємих режимів, відповідно

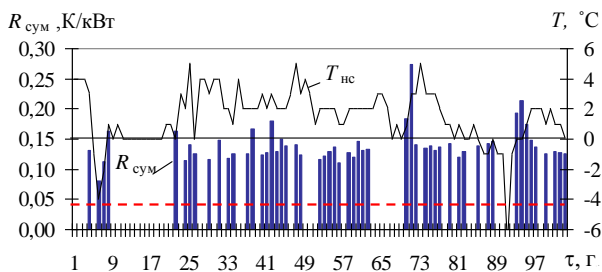


Рис. 18 – Змінення  $R_{сум}$  та  $T_{нс}$  у часі

Нульові значення  $R_{сум}$  відповідають відключенню компресора і включенню режиму дефростації (розморожування). Як можна бачити з графіка, термічний опір  $R_{сум}$  для діагностуємих режимів вище еталонних значень (штрихпунктирна лінія на рис.18). При цьому, після режиму дефростації його значення трохи знижуються, а потім знову підвищуються.

Ми припускаємо, що зниження теплової потужності пов'язано з неповнотою відтавання теплообмінної поверхні випарника.

### Висновки

Створено методику обробки даних моніторингу систем тепло- та холодопостачання із залученням сучасних методів прикладної термодинаміки, яка дозволяє проводити оцінку термодинамічної ефективності кожного елемента системи за обмеженою кількістю параметрів, що заміряються.

Запропоновано графоаналітичний спосіб визначення температур випаровування та конденсації у циклі парокомпресорних чилерів і теплових насосів.

Виконано аналіз даних моніторингу діючої теплонасосної системі тепло- та холодопостачання адміністративної будівлі, за результатами якого визначено аномалії у роботі випарника цієї установки.

### Список літератури

1. Nooman, A. M. Fault Detection and Diagnosis in Air Conditioners and Refrigerators / A. M. Nooman, N. R. Miller, C. W. Bullard. // *Air Conditioning and Refrigeration Center University of Illinois Mechanical & Industrial Engineering Dept*, 1999. – P. 101.
2. Grimmeliuss, H. T. On-line failure diagnosis for compression refrigeration plants / H. T. Grimmeliuss, J. K. Woud, G. Been // *Int. J. Refrigeration*. – 1995. – Vol. 18. – P. 31–41. – doi: 10.1016/0140-7007(94)P3709-A.
3. Клепанда, А. С. Методика моніторинга термодинамічної ефективності теплового насоса / А. С. Клепанда, В. А. Тарасова, Ю. В. Бережко // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – Т. 2, № 8 (68). – С. 3–8. – doi: 10.15587/1729-4061.2014.23086.
4. Мацевитый, Ю. М. Системно-структурный анализ парокомпресорных термотрансформаторов / Ю. М. Мацевитый, Э. Г. Братуга, Д. Х. Харлампиди, В. А. Тарасова. – Харьков: ИПМаш НАН Украины, 2014. – 269 с.
5. Бродянский, В. М. Доступная энергия Земли и устойчивое развитие систем жизнеобеспечения. 2. Ресурсы Земли / В. М. Бродянский // *Технические газы*. – 2011. – № 3. – С. 48–63.
6. Adam, W. Fault Detection and Diagnostics for Commercial Coolers and Freezers / W. Adam, E. James // *Herrick Laboratories, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, USA*, 2008. – С. 1–10.
7. Rossi, T. M. A statistical rule-based fault detection and diagnostic method for vapor compression air conditioners / T. M. Rossi, J. E. Braun // *HVAC&R Research*. – 1997. – Vol. 3. – P. 19–37. – doi: 10.1080/10789669.1997.10391359.
8. Li, H. A Methodology for Diagnosing Multiple Simultaneous Faults in Vapor-Compression Air. Conditioners / H. Li, J. E. Braun // *HVAC&R Research*. – 2007. – Vol. 13. – P. 369–395. – doi: 10.1080/10789669.2007.10390959.
9. Piacentino, A. Critical analysis of conventional thermoeconomic approaches to the diagnosis of multiple faults in air conditioning units: capabilities, drawbacks and improvement directions. A case study for an air-cooled system with 120 kW capacity / A. Piacentino, M. Talamo // *Int. J. Refrigeration*. – 2013. – Vol. 36, Issue 1. – P. 24–44. – doi: 10.1016/j.ijrefrig.2012.09.014.
10. Вычужанин, В. В. Управление системами комфортного кондиционирования воздуха по расчетным эксергетическим характеристикам / В. В. Вычужанин // *Холодильная техника*. – 2006. – № 1. – С. 48–52.
11. Gordon, J. M. Thermodynamic Modeling of Reciprocating Chillers / J. M. Gordon, K. C. Ng // *Journal Applied Physics*. – 1994. – № 75. – P. 2769–2779. – doi: 10.1063/1.356215.
12. Gordon, J. M. Centrifugal chillers: Thermodynamic modeling and diagnostics case study / J. M. Gordon, K. C. Ng, H. T. Chua // *Int. J. Refrigeration*. – 1995. – № 18 (4). – P. 253–257. – doi: 10.1016/0140-7007(95)96863-2.
13. Gordon, J. M. Cool Thermodynamics. The Engineering and Physics of Predictive, Diagnostic and Optimization Methods for Cooling Systems / J. M. Gordon, K. C. Ng. – Cornwall, England: MPG Books Ltd., 2001. – 276 p.
14. Vicot Group. URL: <http://www.vicot.com.cn/english/index.php>.

15. Андронов, А. М. Теория вероятностей и математическая статистика / А. М. Андронов, Е. А. Копытов, Л. Я. Гринглаз. – СПб.: Питер, 2004. – 461 с.
16. Харлампи́ди, Д. Х. Определение реальных термодинамических потерь термотрансформаторов при работе с частичной нагрузкой / Д. Х. Харлампи́ди, В. А. Тарасова, М. А. Кузнецов // *Технические газы*. – Т.18, 3. – 2018. – С. 14–27. – doi:10.18198/j.ind.gases.2018.0909.

#### References (transliterated)

1. Nooman, A. M., Miller, N. R., Bullard, C. W. Fault Detection and Diagnosis in Air Conditioners and Refrigerators, *Air Conditioning and Refrigeration Center University of Illinois Mechanical & Industrial Engineering Dept*, 1999, 101.
2. Grimmelius, H. T., Woud, J. K., Been, G. On-line failure diagnosis for compression refrigeration plants. *Int. J.Refrigeration*, 1995, **18**, 31–41, doi: 10.1016/0140-7007(94)P3709-A.
3. Klepanda, A. S., Tarasova, V. A., Berezhko, Yu. V. Metodika monitoringa termodinamicheskoy effektivnosti teplovogo nasosa. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovoyih tehnologiy*, 2014, **2**, **8** (68), 3-8, doi: 10.15587/1729-4061.2014.23086.
4. Matsevityiy, Yu. M., Bratuta, E. G., Harlampidi, D. H., Tarasova, V. A. Sistemno-strukturniy analiz parokompresorniyh termotransformatorov. Harkov: IPMash NAN Ukrainyi, 2014, 269.
5. Brodyanskiy, V. M. Dostupnaya energiya Zemli i ustoychivoe razvitie sistem zhizneobespecheniya. 2. Resursyi Zemli. *Tekhnicheskie gazyi*, 2011, **3**, 48-63.
6. Adam, W., James, E. Fault Detection and Diagnostics for Commercial Coolers and Freezers. Herrick Laboratories, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette. USA, 2008, 1-10.
7. Rossi, T. M., Braun, J. E. A statistical rule-based fault detection and diagnostic method for vapor compression air conditioners. *HVAC&R Research*, 1997, **3**, 19-37, doi: 10.1080/10789669.1997.10391359.
8. Li, H., Braun, J. E. A Methodology for Diagnosing Multiple Simultaneous Faults in Vapor-Compression Air Conditioners. *HVAC&R Research*, 2007, **13**, 369-395, doi: 10.1080/10789669.2007.10390959.
9. Piacentino, A., Talamo M. Critical analysis of conventional thermoeconomic approaches to the diagnosis of multiple faults in air conditioning units: capabilities, drawbacks and improvement directions. A case study for an air-cooled system with 120 kW capacity. *Int. J. Refrigeration*, 2013, **36**, **1**, 24-44, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2012.09.014.
10. Vyichuzhanin, V. V. Upravlenie sistemami komfortnogo konditsionirovaniya vozduha po raschetnyim eksergeticheskim harakteristikam. *Holodilnaya tehnika*, 2006, **1**, 48–52.
11. Gordon, J. M., Ng, K. C. Thermodynamic Modeling of Reciprocating Chillers. *Journal Applied Physics*, 1994, **75**, 2769-2779, doi: 10.1063/1.356215.
12. Gordon, J. M., Ng, K. C., Chua, H. T. Centrifugal chillers: Thermodynamic modeling and diagnostics case study. *Int. J. Refrigeration*, 1995, **18** (4), 253-257, doi: 10.1016/0140-7007(95)96863-2.
13. Gordon, J. M. Ng, K. C. Cool Thermodynamics. The Engineering and Physics of Predictive, Diagnostic and Optimization Methods for Cooling Systems. Cornwall. England: MPG Books Ltd., 2001, 276.
14. Vicot Group. Available at: <http://www.vicot.com.cn/english/index.php>.
15. Andronov, A. M., Kopyitov, E. A., Gringlaz, L. Ya. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika. SPb.: Piter, 2004, 461.
16. Kharlampidi, D. H., Tarasova, V. A., Kuznetsov, M. A. Opredelenie realnyih termodinamicheskikh poter termotransformatorov pri rabote s chastichnoy nagruzkoy. *Tekhnicheskie gazyi*, **18**, **3**, 2018, 14-27, doi: 10.18198/j.ind.gases.2018.0909.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Тарасова Вікторія Олександрівна** – кандидат технічних наук, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, старший науковий співробітник відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-3252-7619; e-mail: vat523710@gmail.com.

**Victoria Tarasova** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of NAS of Ukraine, Senior Researcher of Department of Modeling and Identification of Thermal Processes, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3252-7619; e-mail: vat523710@gmail.com.

**Кузнецов Михайло Олександрович** – кандидат технічних наук, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, науковий співробітник відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5180-8830; e-mail: childeric1975@gmail.com.

**Mikhail Kuznetsov** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of NAS of Ukraine, Researcher of Department of Modeling and Identification of Thermal Processes, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5180-8830; e-mail: childeric1975@gmail.com.

**Харлампи́ди Дионіс Харлампи́дович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, провідний науковий співробітник відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-4337-6238; e-mail: kharlampidi@ipmach.kharkov.ua.

**Dionis Kharlampidi** – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of NAS of Ukraine, Leading Researcher of Department of Modeling and Identification of Thermal Processes, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4337-6238; e-mail: kharlampidi@ipmach.kharkov.ua.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Тарасова, В. О.** Система моніторингу та діагностики енергетичної ефективності теплонасосної установки // **В. О. Тарасова, М. О. Кузнецов, Д. Х. Харлампи́ди** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 58-69. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.08.

*Please cite this article as:*

**Tarasova, V., Kuznetsov, M., Kharlampidi, D.** Heat pump energy efficiency monitoring and diagnostic system. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 58-69, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.08.

*Пожадуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Тарасова, В. А.** Система мониторинга и диагностики энергетической эффективности теплонасосной установки / **В. А. Тарасова, М. А. Кузнецов, Д. Х. Харлампи́ди** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 58-69. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.08.

**АННОТАЦИЯ** Создание диагностических средств для мониторинга современных систем тепло- и холодоснабжения зданий является сейчас весьма актуальной задачей, решение которой позволит существенно снизить энергопотребление и обеспечить необходимый температурный режим в помещении в целом или в локальных местах большого сооружения, где необходима организация зонального обогрева или охлаждения. В настоящее время с повышением цены на энергоносители все больше внедряются современные энергосберегающие системы термотрансформации для комплексного тепло- и холодоснабжения. Разработка системы эффективного мониторинга позволит устранить множество проблем, связанных с воздействием эксплуатационных факторов, еще до момента их критического накопления, и в дальнейшем позволит обеспечить заметный эффект энергосбережения. Целью работы является создание методики обработки данных мониторинга систем тепло- и холодоснабжения на базе парокомпрессорных тепловых насосов и чиллеров с привлечением современных методов прикладной термодинамики для диагностики их энергетической эффективности. Методика позволяет в режиме «on-line» осуществлять термодинамическое тестирование работы установки по ограниченному числу измеряемых параметров, в том числе в режиме работы парокомпрессорных тепловых насосов и чиллеров с частичной нагрузкой. Разработан инструментарий определения реальных эксергетических потерь в элементах парокомпрессорных чиллеров и тепловых насосов без привлечения баз данных о теплофизических свойствах хладагентов, то есть преимущественно с помощью тех параметров, которые регистрируются контрольно-измерительными приборами (температура, мощность привода компрессора). Предложен графоаналитический способ определения температур испарения и конденсации в цикле парокомпрессорных чиллеров и тепловых насосов. Выполнен анализ данных мониторинга действующей теплонасосной системы тепло- и холодоснабжения административного здания, по результатам которого определены аномалии в работе испарителя этой установки.

**Ключевые слова:** мониторинг; необратимость; эксергия; энтропийно-статистический анализ; чиллер; тепловой насос.

*Поступила (received) 13.02.2019*

УДК 331.45:628.51:681.586

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.09

## МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ШКІДЛИВИХ ЧИННИКІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЗДОРОВ'Я РОБІТНИКІВ МАШИНОБУДІВНОГО ПІДПРИЄМСТВА

О. М. ЧЕРНЯК\*, Р. М. ТРИЩ, А. М. ДЕНИСЕНКО

кафедра Охорони праці, стандартизації та сертифікації, УІПА, Харків, УКРАЇНА  
\*e-mail: olena-cheraniak@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Показники небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на здоров'я людини, мають різну природу, тобто їх показники різні та вони мають різні шкали оцінювання, але на сьогодні не існує єдиної методики їх оцінювання, крім того різноманітність кваліметричних методів оцінювання вимагає глибокого наукового дослідження в частині оптимальності та ефективності. У статті запропоновано для оцінювання показників шкідливих чинників застосовувати залежності, які враховують максимальні, мінімальні та оптимальні значення і параметр форми, змінюючи який, можна отримувати різні оцінки на безрозмірній шкалі. Визначено три групи показників шкідливих чинників та побудовано для кожної групи залежності, що дозволило уніфікувати систему залежностей для оцінки показників шкідливих чинників. Проаналізовано переваги та недоліки системи залежностей. Суттєвим недоліком є невизначеність вибору параметру форми, оскільки від нього залежить оцінка показника на безрозмірній шкалі. Для визначення параметру форми запропоновано метод аналізу ієрархії, який ґрунтується на попарному порівнянні факторів, що дозволить отримувати достовірні значення. Зазначено, що перевагою застосування методу аналізу ієрархії для вибору параметра форми є мала кількість експертів, що дає можливість його застосування на виробництві при оцінюванні показників шкідливих чинників. Застосовуючи запропоновані коефіцієнти в якості параметра форми системи залежності дозволяють в кожному окремому випадку, в залежності від показника шкідливого чинника, рекомендувати жорсткіші чи слабші вимоги до показників. Проаналізовано небезпечні та шкідливі чинники у гарячому цеху машинобудівного підприємства та визначено їх допустимі норми згідно з нормативними документами. Запропонована апробація методики оцінювання показників шкідливих чинників. Графічно побудовано оцінку показників шкідливих чинників. На шкали нанесено максимально-допустимі та мінімально-допустимі значення показників шкідливих чинників. Визначено узагальнений показник шкідливих чинників для підстави приймати рішення стосовно подальших дій щодо поліпшення умов праці.

**Ключові слова:** показник шкідливих чинників; параметр форми; метод аналізу ієрархії; узагальнений показник; шкала вимірювань; система залежності

## METHODS OF ASSESSING THE HARMFUL FACTORS AFFECTING THE HEALTH OF WORKERS OF A MACHINE-BUILDING ENTERPRISE

O. CHERNIAK, R. TRISHCH, A. DENYSENKO

Department of labor safety protection, standardization and certification, UEPA, Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Prevention and forecasting of the negative influence of harmful factors of machine building on the health of working people is an urgent task. Indicators of hazardous and harmful factors affecting human health are of different nature, that is, their indicators are different and they have different assessment scales, but today there is no uniform methodology for their assessment, besides the variety of qualimetric assessment methods requires in-depth scientific research in part optimality and efficiency. In the article it is suggested to use the dependences for the estimation of the indicators of the harmful factors taking into account the maximum, minimum and optimal values and the parameter of the form, changing which it is possible to receive different estimates on a dimensionless scale. Three groups of indicators of harmful factors were determined and built for each group of dependences, which made it possible to unify the dependency system for the estimation of indicators of harmful factors. The advantages and disadvantages of the dependency system are analyzed. A significant drawback is the uncertainty of the choice of the form parameter, since it depends on the assessment of the indicator on a dimensionless scale. A method for analyzing hierarchies, based on pairwise comparison of factors, to obtain reliable values is proposed to determine the form parameter. It is noted that the advantage of using the method of analysis of hierarchies to select a form parameter is a small number of experts, which makes it possible to use it in production in the evaluation of indicators of harmful factors. Applying the proposed coefficients as a parameter of the form of the system of dependence, allows in each individual case, depending on the indicator of the harmful factor, to recommend rigid or weaker requirements to the indicators. The dangerous and harmful factors in the hot shop of the machine-building enterprise are analyzed and their permissible norms are determined in accordance with the normative documents. Probation of the methodology for estimating the indicators of harmful factors is suggested. Graphically assessment of indicators of harmful factors was constructed. The maximum permissible and minimum permissible values of indicators of harmful factors are marked on the scales. A generalized indicator of harmful factors is determined for the reason to make a decision on further actions to improve working conditions.

**Keywords:** indicator of harmful factors; form parameter; hierarchy analysis method; generalized indicator; measurement scale; dependency system

### Вступ

Машинобудівна промисловість є однією з основних галузей національної економіки, що характеризується великою кількістю працюючих та

наявністю шкідливих та небезпечних виробничих чинників, які сягають досить високого рівня, викликаючи несприятливі наслідки для здоров'я працівників. Умови праці, що існують у більшості машинобудівних цехах, є причиною виникнення



професійних захворювань: вібраційної хвороби, нейросенсорної приглухуватості, пневмоконіозу, пилових бронхітів, захворювання кістково-м'язової і периферичної нервової систем [1-3]. Тому виникає актуальна задача оцінювання шкідливих та небезпечних виробничих чинників з метою їх прогнозування та попередження.

На даний час накопичений багатий практичний досвід методів оцінювання умов праці на робочих місцях і використання результатів оцінки для покращення умов праці [4-10]. Основними організаційними механізмами оцінювання умов праці на робочих місцях є атестація робочих місць за умовами праці, яка передбачає отримання оцінки відповідності умов праці державним нормативним вимогам охорони праці і включає [11,12]:

- комплексну оцінку факторів виробничого середовища і характеру праці та відповідність їх характеристик стандартам безпеки праці, будівельним та санітарним нормам і правилам;
- виявлення чинників і причин виникнення несприятливих умов праці;
- санітарно-гігієнічне дослідження чинників виробничого середовища та визначення ступеня важкості й напруженості трудового процесу на робочому місці;
- встановлення ступеня шкідливості і небезпечності праці та її характеру за гігієнічною класифікацією;
- обґрунтування віднесення робочого місця до категорії зі шкідливими (особливо шкідливими) умовами праці;
- визначення (підтвердження) права працівників на пільги;
- аналіз реалізації технічних і організаційних заходів, спрямованих на оптимізацію рівня гігієни, характеру і безпеки праці.

Сучасні тенденції ефективних машинобудівних підприємств передових економік світу не дотримання установлених нормативних вимог, а їх мінімізація. Тобто необхідно постійно оцінювати кількісні показники небезпечних чинників для їх прогнозування на деякий період часу та управління з метою їх мінімізації.

### Мета роботи

Провести ряд наукових досліджень, пов'язаних з отриманням результатів оцінювання в єдиних одиницях вимірювання, що дозволить отримати узагальнений показник шкідливого чинника на робочому місці.

### Викладення основного матеріалу

Визначення узагальненого показника шкідливого чинника на робочому місці пов'язано з отриманням єдиної оцінки, яка кількісно виражає безпечність через його окремі показники. Одним із

способів вирішення такого завдання є приведення різномірних показників шкідливих чинників у безрозмірну шкалу, що дозволяє звести усі показники до однієї розмірності, і у свою чергу, дасть можливість кількісно оцінити узагальнений показник шкідливого чинника.

Враховуючи, що різні групи показників шкідливих чинників мають різні оптимальні значення, пропонуємо побудувати для кожної групи свої залежності, що дозволить уніфікувати систему залежностей для оцінки показників шкідливих чинників.

Пропонується три групи показників шкідливих чинників:

- група показників шкідливих чинників, у яких оптимальне (найкраще) значення прямує до нижньої межі допустимих значень згідно нормативним вимогам. Наприклад, шкідливі речовини, вібрація, швидкість руху повітря тощо. У даному випадку, чим менше ці показники, тим краще;
- група показників шкідливих чинників, у яких оптимальне (найкраще) значення прямує до верхньої межі допустимих значень згідно нормативним вимогам. У даному випадку, чим більше значення показника, тим краще;
- група показників шкідливих чинників, у яких оптимальне (найкраще) значення прямує до середини межі допустимих значень згідно нормативним вимогам. Наприклад, температура.

Враховуючи, що різні групи показників шкідливих чинників мають різні оптимальні значення, пропонуємо побудувати для кожної групи свої залежності, що дозволить уніфікувати систему залежностей для визначення оцінювання будь-якого показника. Такий вид залежностей вперше був застосований для оптимізації технологічних процесів Дірінгером [13], а для оцінки систем управління якістю автором наукової роботи [14], але, на наш погляд, в даних роботах не досконалим є їх застосування в частині визначення коефіцієнта форми, що є найважливішим фактором у оптимальності їх застосування на практиці.

Розглянемо такий вид залежностей детально, використаємо існуючий досвід, врахуємо недоліки та застосуємо їх для оцінювання показників шкідливих чинників.

Залежність, яку пропонується застосувати для одержання оцінки показників шкідливих чинників на безрозмірній шкалі (від 0 до 1) має вигляд [13]:

$$F_x = \begin{cases} 0 & X_i \leq X_{i\min} \\ \left[ \frac{X_i - X_{i\min}}{X_{i\max} - X_{i\min}} \right]^k & X_{i\min} < X_i < X_{i\max} \\ 1 & X_i \geq X_{i\max} \end{cases} \quad (1)$$

де  $X_i$  – виміряне значення показника шкідливого чинника;  $X_{i\min}$  – мінімальне значення показника шкідливого чинника;  $X_{i\max}$  – максимальне значення показника шкідливого чинника;  $k$  – параметр форми.

Якщо параметр форми  $k$  – змінювати від 0,1 до одиниці з кроком 0,1, то залежності будуть вигнутими вгору, а якщо параметр форми змінювати від 1 до десяти з кроком 1, то залежність буде вгнута донизу (рис.1).

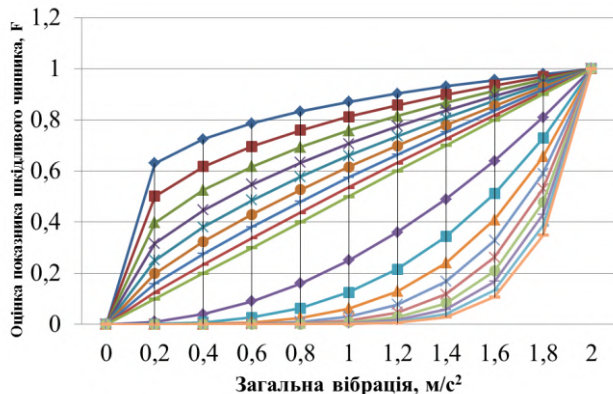


Рис. 1 - Система залежності (1) за умови, що параметр форми  $k$  змінюється від 0,1 до 10

Якщо оптимальний (найкращий) показник шкідливого чинника направляється до середини межі допустимих значень, то залежність буде мати вигляд:

$$F_x = \begin{cases} \left[ \frac{X_i - X_{i\min}}{t_i - X_{i\min}} \right]^{(k)} & X_{i\min} \leq X_i \leq t_i \\ \left[ \frac{X_i - X_{i\max}}{t_i - X_{i\max}} \right]^{(k)} & t_i < X_i \leq X_{i\max} \\ 0 & X_{i\min} > X_i > X_{i\max} \end{cases} \quad (2)$$

де,  $t_i$  - середина межі допустимих значень.

У такому випадку система залежності буде мати вигляд, показаний на рис. 2.

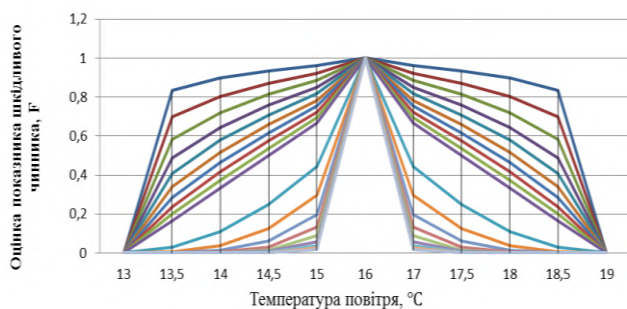


Рис. 2 - Система залежності (2) за умови, що параметр форми  $k$  змінюється від 0,1 до 10

В результаті ми маємо систему залежностей, які дозволяють отримувати оцінки показників шкідливих чинників на безрозмірній шкалі.

Розглянемо позитивні сторони системи залежностей. По перше, дані залежності мають параметр форми, що дозволяє змінювати її форму і

для кожного показника вибирати найбільш відповідний варіант. По-друге, запропоновані залежності враховують максимальне, мінімальне та оптимальне значення показника шкідливого чинника, що не вимагає вручну налаштовувати шкали оцінювання. По-третє – це простота моделей, що дозволяє застосовувати їх на практиці без спеціальних знань, що особливо цінно при оцінці показників шкідливих чинників на виробництві.

Але є також недолік, який може анулювати перераховані переваги, а саме, невідомо яким чином вибирати параметр форми, адже від нього залежить оцінка показника на безрозмірній шкалі. Тому пропонується застосувати метод аналізу ієрархій для визначення параметра форми  $k$  у залежностях (1) та (2).

Для переведення одиничних різнорозмірних показників шкідливих чинників в єдину безрозмірну шкалу та знаходження кількісної оцінки необхідно визначити залежність.

На вибір однієї з дев'ятнадцяти залежностей впливає безліч факторів, серед яких: ступінь впливу на здоров'я робітника, складність та специфіка виконання роботи, період року та інші. Кількісно визначити цей вибір немає можливості, оскільки кожний показник має свої характеристики та допустимі нормативні вимоги, які з часом змінюються. Отже, необхідно звернутися до теорії експертних оцінок, де прийняття рішення розуміється як вибір альтернативи з безлічі на основі аналізу факторів або критеріїв [15].

Усунути необхідність постійно тримати в полі зору усі фактори або групу однорідних і сконцентрувати увагу експерта на конкретній проблемі можна використовуючи методику парних порівнянь. Підхід до надання вагомості об'єктам на основі застосування методу парних порівнянь запропонований Т. Сааті [16].

Метод аналізу ієрархії (МАІ) є систематичною процедурою представлення елементів, які визначають сутність будь-якої проблеми, у вигляді ієрархії. Метод заснований на декомпозиції проблеми на елементарні складові частини і подальшій обробці послідовних суджень експерта, який приймає рішення щодо парних порівнянь. У результаті може бути виражена відносний ступінь взаємодії елементів в ієрархії. Ці судження згодом виражаються за допомогою чисел. МАІ включає процедури синтезу множинних суджень, отримання пріоритетності критеріїв і знаходження альтернативного рішення [16]. Перевагою застосування МАІ для вибору параметра форми є мала кількість експертів, достатньо трьох, що дає можливість його застосування на виробництві при оцінюванні показників шкідливих чинників.

Першим етапом застосування МАІ є реалізація принципу ідентичності та декомпозиції, що означає представити проблему у вигляді ієрархії. В загальному вигляді ієрархія представляє собою структуру від вершини (мета), через проміжні рівні

(критерії, від яких залежать наступні рівні) до самого низького рівня (перелік альтернативних рішень). Тобто, в МАІ основна мета дослідження і усі фактори, які в тій чи іншій мірі впливають на досягнення мети, розподіляються по рівням залежно від ступеня і характеру впливу. На верхньому рівні ієрархії завжди знаходиться одна вершина – мета дослідження. Другий рівень ієрархії складають фактори, які впливають на досягнення мети. Третій рівень складають фактори, від яких залежать вершини другого рівня, і т.д. цей процес побудови ієрархії продовжується до того, поки в структуру не буде включено усі основні фактори, або хоча б для одного з факторів останнього рівня не можна безпосередньо отримати необхідну інформацію. Після побудови ієрархії для кожної верхньої вершини проводиться оцінка коефіцієнтів вагомості, які визначають ступінь її залежності від вершин, які впливають на неї, більш низького рівня. При цьому використовується метод парних порівнянь [16].

Пропонуємо методику застосування МАІ для надання переваги одній із дев'ятнадцяти залежностей між одиничними різнорозмірними показниками та їх оцінками на безрозмірній шкалі на прикладі шкідливих та небезпечних чинників на робочому місці робітника у гарячому цеху машинобудівного підприємства.

Одним з найнебезпечніших цехів на машинобудівному підприємстві є гарячий цех. Визначили, що у гарячих цехах основними небезпечними й шкідливими виробничими чинниками є: мікроклімат, підвищений рівень шуму, вібрація, шкідливі речовини.

Показниками, що характеризують мікроклімат є: температура повітря; відносна вологість повітря; швидкість руху повітря; інтенсивність теплового випромінювання.

Для вимірювання температури повітря, відносної вологості повітря та швидкості руху повітря було використано прилад комбінований «ТКА-ПКМ»(60). Інтенсивність теплового випромінювання вимірювалась радіометром теплового випромінювання «ИК-метр». Вимірювання рівня шуму і загальної вібрації здійснювалось цифровим вимірювачем рівня звуку GM1351 та віброметром AR63A (GM63A), відповідно. Допустимі норми шкідливих чинників визначено у нормативних документах.

Для визначення оцінок показників шкідливих чинників  $F_x$  на безрозмірній шкалі застосовувались залежності (1), (2). Результати розрахунків занесені в таблицю 1.

На відповідні шкали наносяться максимально-допустимі та мінімально-допустимі значення показників шкідливих чинників. Графічно оцінка показників шкідливих чинників має вигляд як показано на рис.3.

Так як оцінки одиничних показників шкідливих чинників мають однакову шкалу вимірювання (0 - 1), то можна знайти узагальнений показник, застосувавши одну із середніх значень. В даному випадку застосовується середнє геометричне значення.

$$Q = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n F_{xi}} = \sqrt[7]{0,96 \times 0,87 \times 0,72 \times 0,36 \times 0,87 \times 0,76 \times 0,17} = 0,59$$

Отже, за допомогою залежності та експертів, для визначення параметру форми можна отримувати узагальнений показник. Таким чином, отримане значення узагальненого показника шкідливих чинників дає підстави приймати рішення стосовно подальших дій щодо поліпшення умов праці.

Таблиця 1 – Показники шкідливих чинників у гарячому цеху

№	Показники шкідливих чинників	$X_{\min}$	$X_{\max}$	$X_{\text{опт}}$	$X_i$	k	$F_x$
1	температура повітря, °C	13	19	16	17	0,1	0,96
2	відносна вологість повітря, %	25	75	50	68	0,9	0,87
3	швидкість руху повітря, м/с	0	0,5	0	0,1	0,2	0,72
4	інтенсивність теплового випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>	0	140	0	100	3	0,36
5	шум, дБа	60	80	0	75	0,5	0,87
6	загальна вібрація, м/с <sup>2</sup>	0	2	0	0,8	0,3	0,76
7	шкідливі речовини	0	1	0	0,8	8	0,17

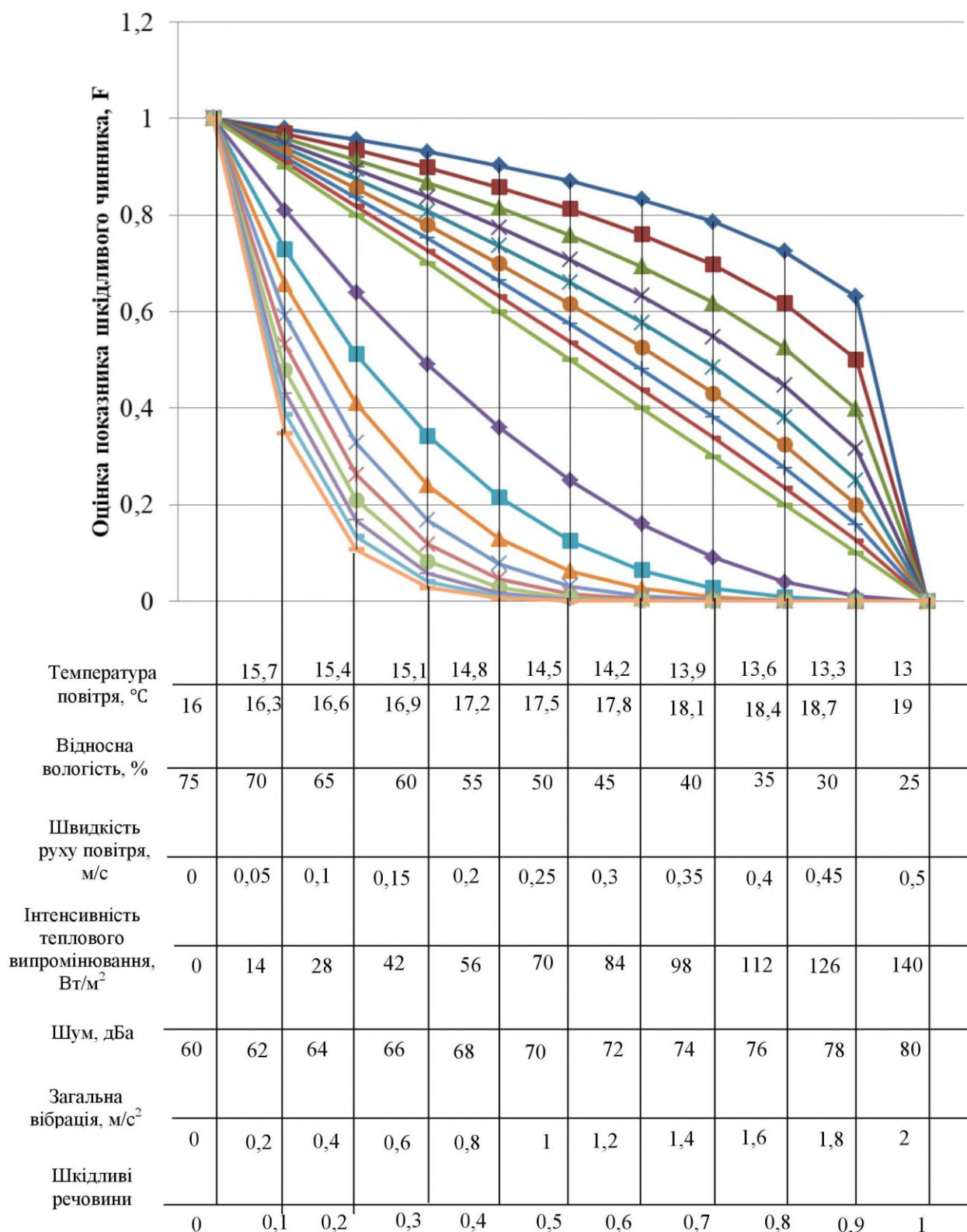


Рис. 3 - Система залежностей показників шкідливих чинників

## Висновки

Запропоновано для оцінювання показників шкідливих чинників застосовувати залежності, які враховують максимальні, мінімальні та оптимальні значення і параметри форми. Змінюючи який, можна отримувати різні оцінки на безрозмірній шкалі. Для визначення параметру форми запропоновано метод аналізу ієрархій, який дозволить отримувати достовірні значення при малій кількості експертів (три експерта). Запропонована апробація методики оцінювання показників шкідливих чинників у гарячому цеху на машинобудівному підприємстві.

## Список літератури

1. **Suuronen, K.** Self-reported skin symptoms in metal workers / **K. Suuronen, R. Jolanki, R. Luukkonen, K. Alanko, P. Susitaival** // *Contact Dermatitis*. – 2007. – Vol. 57. – P. 259-264. – doi:10.1111/j.1600-0536.2007.01207.x.
2. **Schulte, P. A.** Characterizing the Burden of Occupational Injury and Disease / **P. A. Schulte** // *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. – 2005. – Vol. 47. – No. 6. – P. 607-622. – doi: 10.1097/01.jom.0000165086.25595.9d.
3. **Azizi, M. H.** Occupational Noise-induced Hearing Loss / **M. H. Azizi** // *International Journal of Occupational and Environmental Medicine*. – 2010. – Vol. 1. – No. 3. – P. 116-123.
4. **Иванов, В. К.** Качество аттестации рабочих мест по условиям труда / **В. К. Иванов** // *Безопасность и охрана труда*. – 2013. – № 2. – С. 4.
5. **Баландавин, Б. А.** Аттестация рабочих мест, как основа снижения травматизма на производстве и профзаболеваний / **Б. А. Баландавин** // *Справочник специалиста по охране труда*. – 2003. – № 11. – С.86.
6. **Романенко, Н. В.** Вдосконалення організації державного нагляду у сфері охорони праці / **Н. В. Романенко** // *Вісник ННДІПБОП*. — 2008. — Вип. 21. — С. 3-4.
7. **Toppila, E.** Evaluation of the increased accident risk from workplace noise / **E. Toppila, I. Pyykkö, R. Pääkkönen** // *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. – 2009. – Vol. 15. – No. 2. – P. 155-162. – doi: 10.1080/10803548.2009.11076796.
8. **Rosa, L. V.** Assessing risk in sustainable construction using the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) / **L. V. Rosa, A. N. Haddad, P. V. R. de Carvalho** // *Cognition, Technology & Work*. – 2015. – Vol. 17. – No. 4. – P. 559–573. – doi: 10.1007/s10111-015-0337-z.
9. **Tchiehe, D. N.** Classification of risk acceptability and risk tolerability factors in occupational health and safety / **D. N. Tchiehe, F. Gauthier** // *Safety Science*. – 2017. – Vol. 92.– P. 138–147. – doi: 10.1016/j.ssci.2016.10.003.
10. **Bonner, J. C.** Nanoparticles as a Potential Cause of Pleural and Interstitial Lung Disease / **J. C. Bonner** // *Proceedings of the American Thoracic Society*. – 2010. – Vol. 7. – P. 138–141. – doi: 10.1513/pats.200907-061RM.
11. Порядок проведення атестації робочих місць за умовами праці. Надано чинності 1992-08-01. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/442-92-%D0%BF>.
12. Методичні рекомендації для проведення атестації робочих місць за умовами праці. Надано чинності 1992-

09-01. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0041205-92>

13. **Derringer, G.** Simultaneous Optimization of Several Response Variables / **G. Derringer, R. Suich** // *Journal of Quality Technology*. – 1980. – Vol. 12. – No 4. – P. 83-89. – doi: 10.1080/00224065.1980.11980968.
14. **Горбенко, Н. А.** Розробка методології оцінювання процесів систем управління якістю підприємств з урахуванням вимог міжнародних стандартів : дис. канд. техн. наук : 05.01.02 / Горбенко Н.А. – Харків, 2014. – 165 с.
15. **Азгальдов, Г. Г.** О квалиметрии / **Г. Г. Азгальдов, Э. П. Райхман**. – Москва: Издательство стандартов, 1973. – 172 с.
16. **Саати, Т.** Аналитическое планирование. Организация систем / **Т. Саати, К. Керне**. – Москва: Радио и связь, 1991. – 224 с.

## References (transliterated)

1. **Suuronen, K., Jolanki, R., Luukkonen, R., Alanko, K., Susitaival, P.** Self-reported skin symptoms in metal workers. *Contact Dermatitis*, 2007, **57**, 259-264, doi: 10.1111/j.1600-0536.2007.01207.x.
2. **Schulte, P. A.** Characterizing the Burden of Occupational Injury and Disease. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2005, **47**(6), 607-622, doi: 10.1097/01.jom.0000165086.25595.9d.
3. **Azizi, M. H.** Occupational Noise-induced Hearing Loss. *International Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2010, **1**(3), 116-123.
4. **Ivanov, V. K.** Kachestvo attestacii rabochih mest po usloviyam truda [The quality of certification of workplaces on working conditions]. *Bezopasnost' i ohrana truda [Safety and labor protection]*. 2013, **2**, 4.
5. **Balandavin, B. A.** Attestatsiya rabochikh mest, kak osnova snizheniya travmatizma na proizvodstve i profzabolevaniy [Certification of workplaces as a basis for reducing industrial injuries and occupational diseases]. *Spravochnik spetsialista po okhrane truda [Directory of labor protection specialist]*. 2003, **11**, 86.
6. **Romanenko, N. V.** Vdoskonalennya organizaciyi derzhavnogo naglyadu u sferi oxorony praci [Improvement of the organization of state supervision in the field of labor protection]. *Visnyk NNDIPBOP [Bulletin of National Research Institute for Occupational Safety and Health]*. 2008, **21**, 3-4.
7. **Toppila, E., Pyykkö, I., Pääkkönen, R.** Evaluation of the increased accident risk from workplace noise. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2009, **15** (2), 155-162, doi: 10.1080/10803548.2009.11076796.
8. **Rosa, L. V., Haddad, A. N., de Carvalho, P. V. R.** Assessing risk in sustainable construction using the Functional Resonance Analysis Method (FRAM). *Cognition, Technology & Work*, 2015, **17**(4), 559–573, doi: 10.1007/s10111-015-0337-z.
9. **Tchiehe, D. N., Gauthier, F.** Classification of risk acceptability and risk tolerability factors in occupational health and safety. *Safety Science*, 2017, **92**, 138–147, doi: 10.1016/j.ssci.2016.10.003.
10. **Bonner, J. C.** Nanoparticles as a Potential Cause of Pleural and Interstitial Lung Disease. *Proceedings of the American Thoracic Society*, 2010, **7**, 138–141, doi: 10.1513/pats.200907-061RM.

11. Poryadok provedennya atestaciyi robochy`x miscz` za umovamy` praci. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/442-92-%D0%BF>.
12. Metody`chni rekomendaciyi dlya provedennya atestaciyi robochy`x miscz` za umovamy` praci. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0041205-92>.
13. **Derringer, G., Suich, R.** Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality technology*, 1980, **12** (4), 83-89, doi: 10.1080/00224065.1980.11980968.
14. **Gorbenko, N. A.** Rozrobka metodologiyi ocinyuvannya procesiv system upravlinnya yakisty pidpry`emstv z uraxuvannyam vy`mog mizhnarodny`x standartiv: дис. канд. техн. наук, 2014, 165 p.
15. **Azgal'dov, G., Rajhman E.** O kvalimetrii. Izdatel'stvo standartov, Moskva, 1973.
16. **Saati, T., Kerne K.** Analiticheskoe planirovanie. Organizaciya sistem. Radio i svyaz', 1991.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Черняк Олена Миколаївна** – Українська інженерно-педагогічна академія, асистент кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-6167-8809; e-mail: olena-cherniak@ukr.net.

**Olena Cherniak** – assistant, Department of Labour Safety, Standardization and Certification, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6167-8809; e-mail: olena-cherniak@ukr.net.

**Трищ Роман Михайлович** – доктор технічних наук, професор, Українська інженерно-педагогічна академія, завідувач кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-3074-9736; e-mail: trich\_@ukr.net.

**Roman Trishch** – doctor of technical sciences, professor, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, завідувач кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації»; Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3074-9736; e-mail: trich\_@ukr.net.

**Денисенко Андрій Миколайович** – Українська інженерно-педагогічна академія, здобувач кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-3179-2376; e-mail: denisenko-m2012@mail.ru.

**Andriy Denysenko** – applicant Department of Labour Safety, Standardization and Certification, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3179-2376; e-mail: denisenko-m2012@mail.ru.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Черняк, О. М.** Методика оцінювання шкідливих чинників, які впливають на здоров'я робітників машинобудівного підприємства / **О. М. Черняк, Р. М. Трищ, А. М. Денисенко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 70-76. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.09.

*Please cite this article as:*

**Cherniak, O., Trishch, R., Denysenko, A.** Methods of assessing the harmful factors affecting the health of workers of a machine-building enterprise. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 70-76, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.09.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Черняк, Е. Н.** Методика оценки вредных факторов, влияющих на здоровье работников машиностроительного предприятия / **Е. Н. Черняк, Р. М. Трищ, А. Н. Денисенко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 70-76. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.09.

**АННОТАЦИЯ** Показатели опасных и вредных факторов, влияющих на здоровье человека, имеют разную природу, то есть их показатели разные и они имеют разные шкалы оценивания, но на сегодняшний день не существует единой методики их оценки, кроме того разнообразие квалиметрических методов оценки требует глубокого научного исследования в части оптимальности и эффективности. В статье предложено для оценки показателей вредных факторов применять зависимости, учитывающие максимальные, минимальные и оптимальные значения и параметр формы, изменяя который можно получать различные оценки на безразмерной шкале. Определены три группы показателей вредных факторов и построены для каждой группы зависимости, что позволило унифицировать систему зависимостей для оценки показателей вредных факторов. Проанализированы преимущества и недостатки системы зависимостей. Существенным недостатком является неопределенность выбора параметра формы, поскольку от него зависит оценка показателя на безразмерной шкале. Для определения параметра формы предложен метод анализа иерархий, основанный на попарном сравнении факторов, позволит получать достоверные значения. Отмечено, что преимуществом применения метода анализа иерархий для выбора параметра формы является малое количество экспертов, что дает возможность его применения на производстве при оценке показателей вредных факторов. Применяя предложенные коэффициенты в качестве параметра формы системы зависимости, позволяют в каждом отдельном случае, в зависимости от показателя вредного фактора, рекомендовать жесткие или слабее требования к показателям. Проанализированы опасные и вредные факторы в горячем цехе машиностроительного предприятия и определены их допустимые нормы в соответствии с нормативными документами. Предложена апробация методики оценки показателей вредных факторов. Графически построено оценку показателей вредных факторов. На шкалы нанесены максимально допустимые и минимально допустимые значения показателей вредных факторов. Определен обобщенный показатель вредных факторов для основания принимать решение относительно дальнейших действий по улучшению условий труда.

**Ключевые слова:** показатель вредных факторов; параметр формы; метод анализа иерархии; обобщенный показатель; шкала измерений; система зависимости.

Поступила 20.02.19



УДК 622.24.051.55

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.10

## ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТА КРИТЕРІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВСТАВНОГО ПОРОДОРУЙНІВНОГО ОСНАЩЕННЯ ТРИШАРОШКОВИХ БУРОВИХ ДОЛІТ ДЛЯ БУРІННЯ ОСОБЛИВО МІЦНИХ ПОРІД

**Р. С. ЯКИМ, А. М. СЛІПЧУК\***

*Кафедра технологічної та професійної освіти, Дрогобицький державний педагогічний університет ім. І.Франка, м. Дрогобич, УКРАЇНА*

*Кафедра технології машинобудування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА*

*\*e-mail: andsl@ukr.net*

**АНОТАЦІЯ** У роботі запропоновано один із напрямів вирішення задачі - комплексного підвищення якості долота. Проаналізовано найбільш поширені пошкодження, які викликають передчасний вихід з ладу породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт при бурінні особливо міцних гірських порід. Основна ідея цієї роботи полягає в розробці східчасто-логічної моделі. Така модель створюється на основі причин, що призводять до відмови тришарошкове бурових доліт з шарошками, які оснащені твердосплавними породоруйнівними вставними зубками. Встановлено, що відмова породоруйнівного оснащення долота є причиною логічної послідовності ймовірних подій, а критерієм відмови є мінімальні перерізи в моделі відмов. В даній статті показано ступенево-логічний аналіз, який дає можливість встановити характер взаємозв'язків між базовими факторами, які враховуються при прийнятті рішень. Дослідження проводилися на основі математичного планування експериментів в умовах реального виробництва бурових доліт. Показаний один із прикладів застосування модулів, що описують одну з можливих причин виходу з ладу вставного породоруйнівного оснащення долота. Аналізом встановлено, що у всіх випадках в моделях відмов елементів долота, базовими подіями виступають три основні фактори: вихідні властивості матеріалу і параметри конструкції, які задаються на стадії проектування і конструювання, а також технологічні фактори, які формуються на стадіях проектування і реалізації технологічних процесів виготовлення. Ступенево-логічний аналіз виходу з ладу тришарошкових доліт дозволяє показати взаємозв'язок між підконтрольними факторами і відмовами з позиції параметрів технічного стану елементів долота. Запропонована схема визначення параметрів елементів технологічної системи, на якій можна встановити якісні показники вставного породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт. Вибір оптимального варіанту параметрів здійснюється відповідно до критерію максимальної ефективності. Таким чином, застосування ступенево-логічних моделей дає можливість не тільки виявляти причини відмов породоруйнівного оснащення бурових доліт, а й приймати коректні і обґрунтовані рішення щодо забезпечення якості процесів на основних етапах життєвого циклу виготовлення доліт.

**Ключові слова:** ступенево-логічний аналіз; критерій відмови; зубок; шарошка; функціонально-орієнтована технологія; тришарошкове бурове долото; життєвий цикл

## ASSESSMENT OF RELIABILITY AND CRITERIA FOR IMPROVING THE QUALITY OF ROCK CUTTING EQUIPMENT OF TRICONE DRILLING BITS FOR WELL-BORING ESPECIALLY HARD ROCK

**R. JAKYM, A. SLIPCHUK**

*Department of Technological and Professional Education, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, Drohobych, UKRAINE*

*Department of Mechanical Engineering, Lviv Polytechnic National University, L'viv, UKRAINE*

**ABSTRACT** One of the options for solving the problem - a comprehensive improvement in the quality of the bit was proposed. The most widespread damages that are caused by premature failure of the rock cutting equipment of tricone rock drilling bit when we have been process well-boring by especially hard rocks are analyzed. The main idea is to develop a step-logical model. Such model is created on the basis of reasons that bring to a failure of tricone drilling bit, which are rock cutting equipment. It is prescribed that the failure of rock cutting equipment is the reason of the logical sequence of the most probable events, and the criterion of failure is the minimum cross-section in the failure model. This article presents a stepwise logical analysis, which makes it possible to establish the nature of the relationship between the basic factors that are taken into account when making decisions. Researches were conducted on the basis of mathematical planning of experiments in the real production of drill bits. One example is shown of how modules can be used that describe one of the possible reasons for the failure of a rock cutting equipment's tricone drilling bit. The three main factors are the basic events. This is determined by the analysis that in all cases, in the failure models of the bit. These main factors are the initial material properties and design parameters set at the design and construction stage, as well as technological factors that are formed at the stages of design and implementation of manufacturing processes. A step-by-step analysis makes it possible to detect the relationship between under control factors and failures. A scheme is proposed for determining the

*parameters of technological system element, with the help of which it is possible to establish quality indicators of insert rock cutting equipment of tricone drilling bits. The choice of the optimal variant of parameters is carried out in accordance with the criterion of maximum efficiency. Thus, the application of step-logic models makes it possible not only to find out the reasons for the failure of rock cutting equipment for tricone drilling bit, but also to make correct and substantiated decisions for quality assurance of processes at the main stages of the lifecycle for manufacturing tricone drilling bit.*

**Keywords:** *step-logic analysis; failure criterion; inset cutter; roller cutter; function-oriented technology; tricone drilling bit; lifecycle*

## Вступ

Однією з найскладніших задач сучасного долотобудування є забезпечення нафтогазової та гірничої промисловості високоякісними тришарошковими буровими долотами для буріння особливо міцних порід. Такі бурові долота виготовляють з породоруйнівним оснащенням шарошок на основі вставних твердосплавних вставок. Особливості конструкції породоруйнівного оснащення та надзвичайно важкі умови експлуатації доліт висувають комплекс вимог, які досить важко задовольнити в умовах реального виробництва. Тому розробка надійних критеріїв щодо підходів у вдосконаленні технології виготовлення тришарошкових бурових доліт є актуальною проблемою та має важливе практичне значення для вітчизняного долотобудування [1-3].

Отримані експериментальні результати підтвердили ефективність розробленого комплексного підходу на основі системного забезпечення якості й економії матеріалів на основних етапах життєвого циклу доліт [4-6]. Для реалізації такого підходу було розроблено структуру єдиної інформаційної системи підтримки процесів створення доліт [7], що дало можливість об'єднати усі процеси, починаючи від проектування, підготовки виробництва і виготовлення доліт, а також системи комплексного підвищення якості доліт на довиробничому та виробничому етапах життєвого циклу тришарошкових бурових доліт. Це відкрило можливості для застосування функціонально-орієнтованої технології та забезпечувати заданий рівень якості усіх процесів виробництва доліт.

У долотобудуванні широко застосовується імітаційне моделювання на основі математичних моделей які запропоновано в [8]. Проте, застосування сучасних положень функціонально-орієнтованої технології та реалізації комп'ютерно-інтегрованих систем, CALS тощо, вимагає розробки та впровадження узагальнених моделей. Вони легко інтегруються в інформаційну систему управління процесами виробництва доліт [9-11].

Одним з перспективних шляхів вирішення окресленої проблеми є розробка ступенево-логічних моделей. Вони створюються на основі причин, які призводять до відмови тришарошкових бурових доліт з шарошками, які оснащені твердосплавним породоруйнівним вставним оснащенням [5,12,13]. Важливим моментом у цьому є формулювання критеріїв мінімізації мінімальних перерізів для вибору шляхів підвищення довговічності бурових

доліт. Тут залишається відкрите питання про формальне представлення критеріїв, а саме мінімального шляху та мінімального перерізу, яке частково розв'язано в [13]. Однак, тут не враховується елемент ризику. Це, як виявилось, спричинює низку проблем у коректності прийняття однозначних рішень, які складають кореневі події в деревах чи матрицях рішень при побудові процесів на основних етапах життєвого циклу бурових доліт.

## Мета роботи

Проаналізуємо характерні причини, що спричинили відмови породоруйнівного оснащення шарошкових доліт. Застосуємо ступенево-логічний аналіз, що дасть можливість встановити характер взаємозв'язків між базовими чинниками, які враховуються при прийнятті рішень. При цьому такий комплекс враховує якісні показники (металознавчі, фізико-механічні, конструкторсько-технологічні, експлуатаційні та економічні), які визначають параметри технічного стану елементів долота. Оцінкою є відмова.

## Основна частина

Дослідження проводились в умовах реального виробництва бурових доліт, за умов математичного планування експериментів, комплексним застосуванням експериментальних лабораторних та натурних випробовувань.

На етапі проектування бурових доліт використовується інформація про експлуатаційні показники. Така інформація отримана з даних напрацювання аналогічних конструкцій в реальних чи стендових умовах буріння [14,15]. Також із статистики відмов деталей доліт, через які долото втратило працездатність, можна оцінити ймовірність виникнення аналогічних ситуацій із запроєктованим долотом [16].

Після проведеного аналізу можна виділити декілька типових пошкоджень долота [13] через які породоруйнівне оснащення виходить з ладу (рис. 1). Характерні пошкодження долота, яке воно отримало у перші години роботи на вибої, веде до неприпустимих економічних збитків та ускладнень бурових робіт. Особливо небезпечними серед пошкоджень є втрата фрагментів шарошки, тіл кочення (рис. 1, а) чи цілої секції (рис. 1, б). Це веде до аварійних робіт і вимагає видалення з вибою фрагментів металу. Заклинювання опор є причиною зупинки обертання шарошок (рис. 1, в). При цьому прохід долота зупиняється, а шарошки

інтенсивно стираються об вибій. Не менш небезпечним є руйнування вставного породоруйнівного оснащення шарошок (рис. 1, г). При цьому прохід долота різко зменшується і швидкість буріння падає. Також небезпеку становить твердий сплав, який накопичується на вибої.

Якісна оцінка тришарошкових доліт, як і будь-якого складного і відповідального виробу, здійснюється через призму комплексної множини параметрів якості з оцінки характеристик процесів на усіх етапах створення доліт. Оскільки всі елементи долота працюють у вкрай важких умовах, то якість долота повинна гарантувати задану безвідмовність роботи. Тому в долотобудуванні прийнято, що якість окремих елементів конструкції деталей долота визначає якісні показники цілого долота. При цьому в структурі конструкції елементів опори та поророруйнівного оснащення застосовується принцип резервування, що дає можливість розвантажити найбільш навантажені та відповідальні елементи.

Загалом, аналізом пошкоджень елементів тришарошкових бурових доліт призначених для буріння особливо міцних гірських порід виявлено, що проблема підвищення надійності вставного породоруйнівного оснащення вимагає комплексного розв'язання низки задач з підвищення довговічності усіх деталей і вузлів. А саме, тіла шарошки та лапи, опорних вузлів, твердосплавних вставок тощо.

Відомо, що одним з основних параметрів у встановленні довговічності породоруйнівного оснащення тришарошкового бурового долота є питання формулювання поняття відмови. При цьому, суттєвим є виявлення тих елементів і вузлів, відмова яких спричинює повну чи часткову втрату працездатності долота із заданою ймовірністю чи ризиком. Для цього необхідно встановити причини відмов та взаємозв'язок між найбільш імовірною причиною відмови та імовірним наслідком, що спричинив вихід із ладу елемента долота.

Імовірність виникнення відмови і-того елемента долота представимо імовірністю технічного стану елемента системи [12].

$$p_i = P[X_i = 1] = EX_i \quad (1)$$

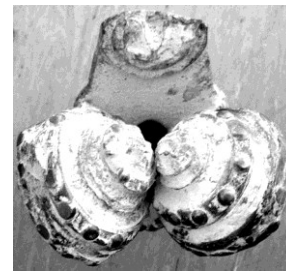
де  $X_i$  – двійкова випадкова величина, що приймає значення 1 і 0 та означає однозначність технічного стану і-того елемента долота.

Тоді для системи елементів долота можна ввести структурну функцію  $\varphi(x)$ , яка є двійковою випадковою величиною із розподілом імовірності, що визначається сумісним розподілом ймовірностей величин  $X_1, X_2, \dots, X_n$ :

$$p_s = P[\varphi(X) = 1] = E\varphi(X) \quad (2)$$



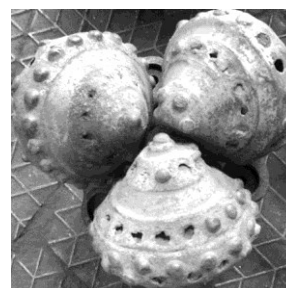
а



б



в



г

- а – розколювання тіла шарошки,
- б – відламування цапфи лапи,
- в – заклинювання опор і зупинення обертання шарошок,
- г – розколювання, зношування, випадання вставного породоруйнівного оснащення шарошок

Рис. 1 – Найбільш поширені пошкодження, які спричинюють передчасний вихід з ладу породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт, призначених для буріння особливо міцних гірських порід

Оскільки базові події, що спричинюють конкретний стан елемента системи, є незалежними, сумісний розподіл ймовірностей величин

$X_1, X_2, \dots, X_n$  визначаться значеннями  $P_1, P_2, \dots$ , тоді функція надійності долота як системи, в якій стаються визначені події, буде мати вигляд

$$P_s = P_s(p), \quad (3)$$

при цьому

$$p = (p_1, p_2, \dots, p_n). \quad (4)$$

Формально деталі і елементи долота можуть знаходитись у двох станах: подія (відмова) яка відбулася, чи відсутність події (відмови) [12]:

$$P_s(0) = E[\varphi(X) | p_1 = 0, \dots, p_n = 0] = \varphi(0) = 0, \\ P_s(1) = E[\varphi(X) | p_1 = 1, \dots, p_n = 1] = \varphi(1) = 1. \quad (5)$$

Тоді можна описати аналіз відмов, які реалізуються в умовах експлуатації, за допомогою ступеневих логіко-імітаційних моделей. Побудова дерев відмов і їх аналіз дає можливість виявити імовірні шляхи, які ведуть до відмови долота.

Маючи за основу викладки подані в [17], побудовано низку структурно-логічних модулів які входять в цільну модель, що описує взаємозв'язок між базовими, початковими чинниками, що контролюються та відмовою бурових тришарошкових доліт з твердосплавним вставним оснащенням, відкритою опорою Р-К-Р осьовими підшипниками ковзання [12].

Встановлено [12,13], що для виникнення послідовності відмов у єдиній моделі структури відмови долота кореневими чинниками є:

- якісні показники та відповідність чинним вимогам фізико-механічних, технологічних експлуатаційних показників матеріалів деталей долота;

- якісні показники та відповідність необхідних вимог параметрів конструкції елементів долота;

- якісні показники та відповідність чинним вимогам параметрів технологічних процесів виготовлення деталей та елементів долота.

Відтак, відмова породоруйнівного оснащення долота є причиною логічної послідовності найімовірніших подій, а критерієм відмови є мінімальні перерізи в моделі відмов. Ці мінімальні перерізи є мінімальною множиною варіантів послідовностей логічних подій, що ведуть до кінцевого результату – відмови породоруйнівного оснащення тришарошкового бурового долота.

#### Обробка результатів дослідження

Наприклад, розглянемо представлений на рис. 2 один з розроблених модулів, що описує одну з

імовірних причин виходу з ладу вставного породоруйнівного оснащення долота. В колах вписано базові підконтрольні фактори, в прямокутниках – проміжні логічні стани. В ромбах представлено базові стани, які для зручності та компактності описуються окремими модулями. У окремих випадках базові стани в ромбах можуть виступати окремими причинами відмови долота, наприклад: розколювання тіла шарошки та утворення недопустимих люфтів в опорі.

Базовими подіями чи факторами є [12, 13]: властивості матеріалів оснащення та конструкційні параметри, які вибираються при проектуванні, конструюванні, а також множина технологічних факторів, які слугують базою для проектування технологічних процесів, підготовки виробництва й виготовлення.

Визначити ймовірності (P) цих подій (A) можна з формули:

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x}{n}, \quad (6)$$

де  $x$  – число випадків виникнення подій A, що відбулися з числа  $n$ , повторених дослідів.

На рис. 2 прямокутниками позначено проміжні найімовірніші логічні стани. Для зручності та компактності побудов моделей, а також для застосування тиражування логічних станів ромбами обведено базові стани, для яких існують окремі модулі. Інколи базові стани позначені ромбами можуть рахуватися як окремі причини відмови породоруйнівного оснащення долота, наприклад, як розколювання тіла шарошки чи люфти в опорі.

Для кожного стану долота, як системи  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , можна виділити дві підмножини:

$$A = \{i : x_i = 1\}, \\ B = \{i : x_i = 0\}. \quad (7)$$

Якщо  $f(x)=1$  і  $f(y)=0$  для довільного  $y \leq x$ , але не тотожнорівного  $x$ , то A є мінімальний шлях у дереві відмов тришарошкового бурового долота.

Якщо  $f(x)=0$  і  $f(y)=1$  для довільного  $y \geq x$ , але не тотожнорівного  $x$ , то B є мінімальний переріз у дереві відмов тришарошкового бурового долота.

Мінімальний шлях є мінімально можлива множина елементів, які забезпечують нормальне функціонування породоруйнівного оснащення долота.

Мінімальний переріз – це мінімальна множина елементів тришарошкового бурового долота, відмова яких веде до відмови породоруйнівного оснащення долота.

Розмір мінімального шляху (мінімального перерізу) визначається числом елементів, які належать цьому шляху (перерізу) у дереві відмов. З

кожним мінімальним шляхом  $A_j$  (де  $j=1, 2, \dots, \kappa$ ), можна зв'язати двійкову функцію

$$\delta_j(x) = \prod_{i \in A_j} x_i$$

Ця функція приймає значення 1, якщо всі елементи в мініальному шляху нормально функціонують, і 0 коли навпаки. Відтак функція  $\delta_j$

описує структуру системи у якій всі елементи, які належать  $j$ -му мініальному шляху, з'єднані послідовно. Аналогічним чином, для кожного мінімального перерізу  $B_\varepsilon$  (де  $\varepsilon=1, 2, \dots, \lambda$ ), можна взяти двійкову функцію

$$\theta_\varepsilon(x) = 1 - \prod_{i \in B_\varepsilon} (1 - x_i)$$

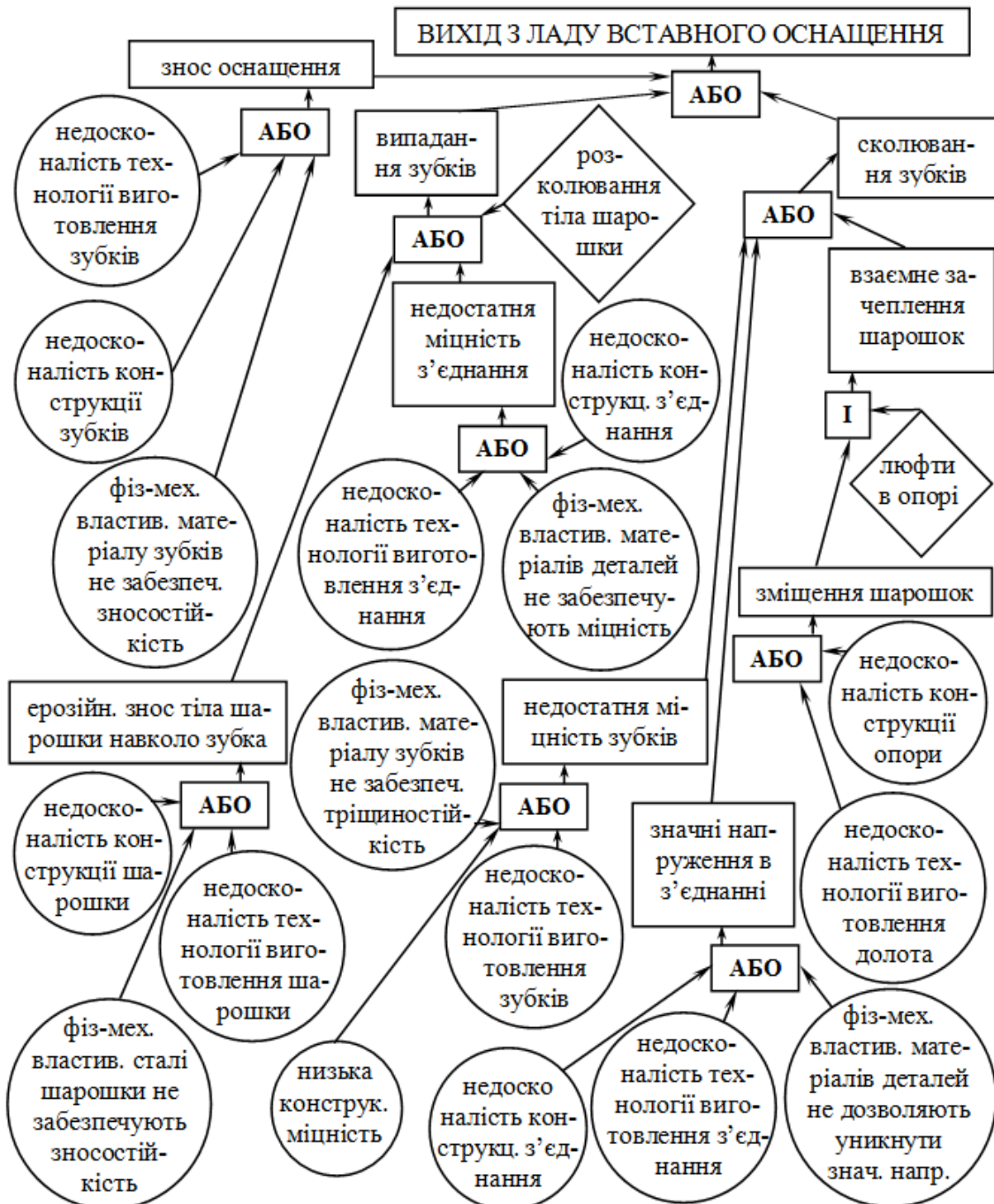


Рис.2 – Ступенево-логічний модуль виходу з ладу вставного твердосплавного оснащення на шарошці бурового долота

Дана функція приймає значення 0, якщо всі елементи в мінімальному шляху несправні і 1 коли навпаки. Тобто, функція  $\theta_\varepsilon$  описує структуру системи у якій всі елементи, які належать  $\varepsilon$ -му мінімальному перерізу, з'єднані паралельно.

Мінімальні (небезпечні) перерізи у деревах відмов породоруйнівного оснащення доліт є тільки такі, які є ланцюгами послідовності найбільш імовірних відмов. Наприклад, у розглядуваному випадку, що ілюструється на рис. 2, можуть бути такі варіанти послідовностей подій:

1) недосконалість технології виготовлення шарошки  $\rightarrow$  ерозійний знос тіла шарошки навколо зубка  $\rightarrow$  випадання зубків;

2) недосконалість технології виготовлення з'єднання «зубок-шарошка»  $\rightarrow$  недостатня міцність з'єднання «зубок-шарошка»  $\rightarrow$  випадання зубків;

3) розколювання тіла шарошки  $\rightarrow$  випадання зубків.

Генерація таких варіантів логічних послідовностей дає усесторонній аналіз причин відмов та дає можливість розробити шляхи та способи попередження, усунення чи суттєвого відтермінування в часі.

Небезпечний переріз дерева відмов може мати два кроки в дереві відмов і більше. Однак аналіз починається з тих послідовностей, які мають найменшу кількість кроків.

Зауважимо, що спочатку аналізують ті послідовності подій, де зафіксовані найвищі значення імовірності відмов.

Аналізом встановлено, що у всіх випадках в моделях відмов елементів долота базовими подіями виступають три основні чинники [12,13]: вихідні властивості матеріалу та параметри конструкції, що задаються на стадії проектування та конструювання, а також технологічні фактори, які формуються на стадіях проектування і реалізації технологічних процесів виготовлення.

Отже, ступенево-логічний аналіз виходу з ладу шарошкових доліт дає можливість виявити взаємозв'язок між підконтрольними чинниками та відмовами з позиції параметрів технічного стану елементів долота. Використовуючи критерій мінімізації мінімальних перерізів, можна формулювати відповідні вимоги до якості всіх засобів і заходів на всіх етапах створення бурових доліт, що сприяє підвищенню їх надійності.

Вибір оптимального варіанта параметрів здійснюється відповідно до критерію максимальної ефективності. При цьому рішення щодо тих чи тих параметрів не може бути однозначним, оскільки максимальний результат може досягатися багатократно за різних обставин. Тоді вибирають одне з декількох приблизно однаково виграних рішень. В іншому випадку, з альтернативного вибирається те, що можна реалізувати за мінімальних затрат. Наприклад, коли довговічність породоруйнівного оснащення спрогнозувати

неможливо, а відомі навантаження на його елементи. Необхідно вирішити, які параметри необхідно призначити при вирішенні конструкторсько-технологічних задач з виготовлення з'єднання «зубок-шарошка».

Одними з варіантів вирішення такої проблеми може бути:

$E_1$  – вибір розмірів, що забезпечили б максимальну надійність, тобто виготовлення з'єднання з мінімальними затратами за умов, що матеріали зубка і шарошки будуть забезпечувати свої фізико-механічні та експлуатаційні показники протягом заданого часу;

$E_m$  – вибір розмірів за умов мінімальної надійності з'єднання;

$E_i$  – проміжне рішення;

Для прийняття рішення необхідні умови, яких необхідно дотримуватися:

$F_1$  – умови, що забезпечують максимальну надійність;

$F_n$  – умови, що забезпечують мінімальну надійність;

$F_j$  – проміжні рішення.

Під результатом рішення  $e_{ij}$  можна вважати таку оцінку, яка відповідає варіанту  $E_i$  і умовам  $F_j$  та характеризує ефективність, надійність з'єднання «зубок-шарошка». Отримані у ході аналізу математичні сімейства рішень складають у вигляді матриць.

Оцінюючи варіанти, необхідно вибрати рішення з найкращим результатом, але приймати до уваги всі оцінки  $e_{ij}$ , що відповідають варіанту  $E_i$ .

Відтак задача щодо максимізації  $\max_i e_i$  згідно критерію

$$E_0 = \left\{ E_{i0} \mid E_{i0} \in E \wedge e_{i0} = \max_i e_i \right\}$$

де  $E_0$  – множина оптимальних варіантів рішення,

$E_{i0}$  – варіанти рішення, у яких оцінка є максимальна,

$E$  – множина усіх варіантів рішення,

$e_{i0}$  – максимальні оцінки варіантів рішень,

$e_i$  – оцінки варіантів рішень.

має бути замінена такою, яка має якнайкраще враховувати всі наслідки будь-якого з варіантів рішення  $E_i$ . При цьому слід орієнтуватися на найбільш сприятливий випадок з числа альтернативних варіантів. Після цього вибирається найкращий варіант, тобто очікується найкращий результат у найгіршому випадку.



## Висновки

Досліджено характер пошкодження та основні причини низької довговічності породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт призначених для розбурювання особливо міцних гірських порід. Запропоновано схему виявлення параметрів елементів технологічної системи, які визначають якісні показники вставного породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт. Застосовуючи ступенево-логічний аналіз для виявлення причин відмов долота досліджено характер взаємозв'язків між кореневими чинниками (як подіями, що формуються на етапах проектування доліт та технології їхнього виготовлення) та відмовами з позиції параметрів технічного стану елементів долота. Застосування ступенево-логічних моделей дає можливість не тільки виявляти причини відмов породоруйнівного оснащення бурових доліт, а й приймати коректні й обґрунтовані рішення щодо забезпечення якості процесів на основних етапах життєвого циклу виготовлення доліт. Формалізація критеріїв визначення умов мінімальних шляхів та мінімальних перерізів для ступенево-логічних моделей відмов породоруйнівного оснащення доліт дає можливість застосовувати інтегровані інформаційні технології в управлінні процесами виробництва.

Надалі перспективним є розробка комплексного підходу у оцінці технологічних операцій виготовлення породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт для реалізації функціонально-орієнтованих інтегрованих технологій виробництва доліт.

## Список літератури

1. **Deng, Y.** Theoretical and experimental study on the penetration rate for roller cone bits based on the rock dynamic strength and drilling parameters / **Y. Deng, M. Chen, Y. Jin, Y. Zhang, D. Zou, Y. Lu** // *Journal of natural gas science and engineering*. – 2016. – Vol. 36. – P. 117-123. – doi: 10.1016/j.jngse.2016.10.019.
2. **Schroder, J.** Bearing innovations extend roller-cone bit life / **J. Schroder, M. Di Pasquale, A. Richards, J. Yorty** // *Oil & gas journal*. – 2016. – Vol. 114. – № 6. – P. 50-55.
3. **Naganawa, S.** Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration / **S. Naganawa** // *Journal of petroleum science and engineering*. – 2012. – Vol. 82. – P. 140-150. – doi: 10.1016/j.petrol.2012.01.014.
4. **Schroder, J.** Extending Bit Life Through Bearing Innovations / **J. Schroder, A. AlDarwaish, J. W. Richards, M. Di Pasquale, M. Mohamed, J. Yorty** // *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. – London, England, UK. Publisher Society of Petroleum Engineers. – 2015. – doi: 10.2118/173031-MS.
5. **Zhiqiang, H.** Optimization of cone bit bearing seal based on failure analysis / **H. Zhiqiang, Li Gang** // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 10, issue 3. – doi: 10.1177/1687814018767485.
6. **Huang, Z.** Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on

- the failure analysis / **Z. Huang, Q. Z. Li, S. Jing, Y. Ma, W. Hu, Y. Fan** // *Engineering failure analysis*. – 2013. – Vol. 29. – P. 12-26. – doi: 10.1016/j.engfailanal.2012.08.018.
7. **Portwood, G.** Development of Improved Performance Roller Cone Bits for Middle Eastern Carbonate Drilling Applications / **G. Portwood, B. Boktor, R. Munger et al.** // *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference*. – Bahrain. – 2001. – SPE-72298-MS. – doi: 10.2118/72298-MS.
  8. **Неупокоев, В. Г.** Вопросы теории и практики проектирования, производства и эксплуатации буровых шарошечных долот / **В. Г. Неупокоев** – Самара: Издательство Самарского научного центра Российской академии наук, 2000. – 376 с.
  9. **Chen, S. L.** A Study of Drilling Performance of Energy Balanced Roller Cone Bit / **S. L. Chen, J. Dahlem, C. Rayburn** // *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. – Jakarta, Indonesia. – 2003. – 80493-MS.
  10. **Bybee, K.** Drilling Performance of an Energy-Balanced Roller-Cone Bit / **K. Bybee** // *Journal of Petroleum Technology*. – 2003. – № 12. – P. 49-50. – doi: 10.2118/1203-0049-JPT.
  11. **Zhou, R. S.** A Contact Stress Model for Predicting Rolling Contact Fatigue / **R. S. Zhou, H. Nixon** // *SAE Technical Transactions Journal*. – 1992. – Vol. 101, № 2. – 921720.
  12. **Крижанівський, Є. І.** Теоретичні основи обґрунтованого вибору критеріїв відмов і шляхів підвищення довговічності тришарошкових бурових доліт / **Є. І. Крижанівський, Р. С. Яким, Л. Є. Шмандровський, Ю. Д. Петрина** // *Вісник Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”. Машинобудування*. – К.: КТУУ „КПІ”. – 2009. – Вип. 56. – С. 6 – 13.
  13. **Яким, Р. С.** Оцінка надійності та критерії підвищення якості тришарошкових бурових доліт для буріння особливо міцних порід / **Р. С. Яким** // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2014. – № 4 (53). – С. 43 – 51.
  14. **Sonowal, K.** How Continuous Improvement Lead to the Longest Horizontal Well in the World / **K. Sonowal** // *2009 SPE/IADC Drilling Conference & Exhibition, Amsterdam, Netherlands*. – 2009. – SPE-119506-MS. – doi: 10.2118/119506-MS.
  15. **Сліпчук, А. М.** Покращення якості технології процесу запресовування зубків у шарошки бурових доліт / **А. М. Сліпчук, Р. С. Яким** // *Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць*. – Харків, НТУ “ХПІ”, 2017. – Вип. 1 (27). – 186 с. – С. 134-143. – doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.15.
  16. **Schroder, J.** Cone Retention and Tapered Bearing Preload System for Roller Cone Bit. US. Patent Application US 13/287,792, filed November 2, 2011.
  17. **Бегун, В. В.** Вероятностный анализ безопасности атомных станций / **В. В. Бегун, О. В. Горбунов, И. Н. Каденко [и др.]**. – К.: НТУУ КПІ, „Віпол” 2000. – 568 с.

## References (transliterated)

1. **Deng, Y., Chen, M., Jin, Y., Zhang, Y., Zou, D., Lu, Y.** Theoretical and experimental study on the penetration rate for roller cone bits based on the rock dynamic strength and drilling parameters. *Journal of natural gas science and engineering*, 2016, **36**, 117-123, doi: 10.1016/j.jngse.2016.10.019.

2. **Schroder, J., Di Pasquale, M., Richards, A., Yorty, J.** Bearing innovations extend roller-cone bit life. *Oil & gas journal*, 2016, **114**, 6, 50-55.
3. **Naganawa, S.** Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration. *Journal of petroleum science and engineering*, 2012, **82**, 140-150, doi: 10.1016/j.petrol.2012.01.014.
4. **Schroder, J., AlDarwaish, A., Richards, J. W., Di Pasquale, M., Mohamed, M., Yorty, J.** Extending Bit Life Through Bearing Innovations. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, 2015, London, England, UK. Publisher Society of Petroleum Engineers, doi: 10.2118/173031-MS.
5. **Zhiqiang, H., Gang, Li.** Optimization of cone bit bearing seal based on failure analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, **10**, 3, doi: 10.1177/1687814018767485.
6. **Huang, Z., Li, Q. Z., Jing, S., Ma, Y., Hu, W., Fan, Y.** Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on the failure analysis. *Engineering failure analysis*, 2013, **29**, 12-26, doi: 10.1016/j.engfailanal.2012.08.018.
7. **Portwood, G., Boktor, B., Munger, R. et al.** Development of Improved Performance Roller Cone Bits for Middle Eastern Carbonate Drilling Applications. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference*, Bahrain, 2001, SPE-72298-MS, doi: 10.2118/72298-MS.
8. **Neupokoev, V. G.** Voprosi teorii i praktiki proektirovaniya, proizvodstva i ekspluatatsii burovyyih sharoshechnykh dolot. Samara: Izdatelstvo Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk, 2000, 376.
9. **Chen, S. L., Dahlem, J., Rayburn, C.** A Study of Drilling Performance of Energy Balanced Roller Cone Bit. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, 2003, Jakarta, Indonesia, 80493-MS.
10. **Bybee, K.** Drilling Performance of an Energy-Balanced Roller-Cone Bit. *Journal of Petroleum Technology*, 2003, **12**, 49-50, doi: 10.2118/1203-0049-JPT.
11. **Zhou, R. S., Nixon, H.** A Contact Stress Model for Predicting Rolling Contact Fatigue. *SAE Technical Paper 921720 in SEA Transactions Journal*, 1992, **101**, 2, doi: 10.2118/1203-0049-JPT.
12. **Kryzhanivsky, Ye. I., Yakom, R. S., Shmandrovsky, L. E., Petrin, Yu D.** Teoretychni osnovy obgruntovanoho vyboru kryteriyiv vidmov i shlyakhiv pidvyshchennya dovhovichnosti trysharoshkovykh burovyykh dolit [Theoretical bases of the reasoned choice of criteria of failures and ways of increasing the durability of tricone drill bits]. *Bulletin of the National Technical University „Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”*. Publ. – K.: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2009, **56**, 6 – 13.
13. **Yakim, R. S.** Otsinka nadiynosti ta kryteriyi pidvyshchennya yakosti trysharoshkovykh burovyykh dolit dlya burinnya osoblyvo mitsnykh porid [Estimation of the criteria and criteria for the development of drilled bits for the borer, especially hard rock]. *Exploration and development of oil and gas fields*, 2014, **4** (53), 43 – 51.
14. **Sonowal, K.** How Continuous Improvement Lead to the Longest Horizontal Well in the World. *Paper SPE 119506 presented at the 2009 SPE/IADC Drilling Conference & Exhibition*, Amsterdam, Netherlands, 2009, doi: 10.2118/119506-MS.
15. **Yashkym, R. Slipchuk, A.** Refinement technology pressing of tungsten carbide inset cutter in roller cone bit. *Bulletin of NTU KhPI. Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU KhPI, 2017, 7(1229), 110–117, doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.15.
16. **Schroder, J.** Cone Retention and Tapered Bearing Preload System for Roller Cone Bit. US. Patent Application US 13/287,792, filed November 2, 2011.
17. **Begun, V. V., Gorbunov, O. V., Kadenko, I. N. et al.** Veroyatnostnyy analiz bezopasnosti atomnykh stantsiy [Probabilistic analysis of the safety of nuclear power plants] – *National Technical University „Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”*. K., Publ. „Vipol”, 2000, 568.

#### Відомості про авторів (About the Authors)

**Яким Роман Степанович** – док. техн. наук, проф. Дрогобицький державний педагогічний університет ім. І.Франка, проф. Кафедра технологічної та професійної освіти; м. Дрогобич, Україна, e-mail: Jakym.r@online.ua.

**Roman Yashkym** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, Professor of Department of Technological and Professional Education. c. Drohobych, Ukraine, e-mail: Jakym.r@online.ua.

**Сліпчук Андрій Миколайович** – канд. техн. наук, Національний університет «Львівська політехніка», доц. кафедри технології машинобудування м. Львів, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0584-6104>, тел.: , e-mail: andsl@ukr.net.

**Andrey Slipchuk** - Candidate of Technical Sciences, PhD, Lviv Polytechnic National University Docent of the Department of Technology of Mechanical Engineering, c. Lviv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0584-6104>, e-mail: andsl@ukr.net.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Яким, Р. С.** Оцінка надійності та критерії підвищення якості вставного породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт для буріння особливо міцних порід / **Р. С. Яким, А. М. Сліпчук** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 77-85. – doi: 10.20998/2413-4295.2019.05.10

*Please cite this article as:*

**Яким, Р., Slipchuk, A.** Assessment of reliability and criteria for improving the quality of rock cutting equipment of tricone drilling bits for well-boring especially hard rock. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 77-85, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.10.

*Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Якым, Р. С.** Оценка надежности и критерий повышения качества вставного породоразрушающего оснащение трёхшарошечных буровых долот для бурения особо крепких пород / **Р. С. Якым, А. М. Слипчук** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 77-85. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.10.

**АННОТАЦИЯ** Предложено одно из направлений решения задачи - комплексного повышения качества долота. Проанализированы наиболее распространенные повреждения, которые вызывают преждевременный выход из строя породоразрушающего оснащение трёхшарошечных буровых долот при бурении особо прочных горных пород. Основная идея этой работы заключается в разработке ступенчато-логической модели. Такая модель создается на основе причин, приводящих к отказу трёхшарошечных буровых долот с шарошками, которые оснащены твердосплавными породоразрушающими вставными зубками. Установлено, что отказ породоразрушающего оснащение долота является причиной логической последовательности вероятных событий, а критерием отказа является минимальные сечения в модели отказов. В данной статье показано ступенчато-логический анализ, который дает возможность установить характер взаимосвязей между базовыми факторами, которые учитываются при принятии решений. Исследования проводились на основе математического планирования экспериментов в условиях реального производства буровых долот. Показан один из примеров применения модулей, описывающих одну из возможных причин выхода из строя вставного породоразрушающего оснащение долота. Анализом установлено, что во всех случаях в моделях отказов элементов долота базовыми событиями выступают три основных фактора: исходные свойства материала и параметры конструкции, которые задаются на стадии проектирования и конструирования, а также технологические факторы, которые формируются на стадиях проектирования и реализации технологических процессов изготовления. Ступенчато-логический анализ выхода из строя шарошечных долот позволяет показать взаимосвязь между подконтрольными факторами и отказами с позиции параметров технического состояния элементов долота. Предложенная схема определения параметров элементов технологической системы, на которой можно установить качественные показатели вставного породоразрушающего оснащение тришарошечных буровых долот. Выбор оптимального варианта параметров осуществляется в соответствии с критерием максимальной эффективности. Таким образом, применение ступенчато-логических моделей дает возможность не только выявлять причины отказов породоразрушающего оснащение буровых долот, но и принимать корректные и обоснованные решения по обеспечению качества процессов на основных этапах жизненного цикла изготовления долот.

**Ключевые слова:** ступенчато-логический анализ; критерий отказа; зубок; шарошка; функционально-ориентированная технология; трёхшарошечное буровое долото; жизненный цикл

Надійшла (received) 18.02.2019

УДК 004.93

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.11

## АЛГОРИТМ ПОИСКА УСТОЙЧИВЫХ СООТВЕТСТВИЙ ПАР КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ И КАРТАХ ГЛУБИНЫ

А. А. ДАШКЕВИЧ\*, Д. В. ВОРОНЦОВА, Н. В. СКОРОБОГАТЬКО

кафедра геометрического моделирования и компьютерной графики, НТУ «ХПИ», Харьков, УКРАИНА

\*e-mail: dashkewich.a@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** Развитие эффективных методов компьютерного зрения постоянно находится в центре исследований многих учёных, так как они дают возможность повысить скорость и эффективность решения задач в различных отраслях промышленности: картография, робототехника, системы виртуальной и дополненной реальности, системы автоматизированного проектирования. Значительную перспективу имеют современные исследования, методы и алгоритмы решения задач стереозрения, распознавания образов, в том числе те, которые работают в режиме реального времени. Одной из важных задач стереозрения является задача сопоставления карт глубины для получения трёхмерной модели сцены, но есть некоторые нерешенные вопросы процесса сопоставления карт глубин для крупномасштабных сцен окружающей среды, полученных беспилотными летательными аппаратами, а именно: низкое разрешение по глубине из-за большого расстояния сцены от камеры, и проблема наличия шума вследствие дефектов камеры. Указанные проблемы затрудняют обнаружение ключевых точек на изображениях для их дальнейшего сопоставления. В представленной работе предлагается подход к определению ключевых точек на смежных картах глубин на основе поиска ключевых точек, находящихся в близких областях пространства параметров. Подход базируется на поиске множества ключевых точек в двух последовательных видеокдрах и нахождении среди них пар точек таких, что каждая точка пары соответствует одной и той же точке сцены на входном изображении. Соответствующие пары ключевых точек, которые локализованы детектором признаков, могут быть ложно-положительными. Предложенный алгоритм может устранить такие пары точек путём определения преобладающего направления движения ключевых точек в локальных участках изображения, а также алгоритм даёт возможность определения центра смещение точки обзора камеры, чем обеспечивает лучшую оценку положения съёмочного оборудования. Результаты работы реализованы в виде программного приложения и протестированы на видеоматериалах, полученных беспилотным летательным средством

**Ключевые слова:** компьютерное зрение; стереозрение; распознавание образов; карта глубины; трёхмерная модель сцены; сопоставление ключевых точек; детектор признаков; беспилотный летательный аппарат

## AN ALGORITHM OF SEARCH OF KEY POINT PAIRS STORNG CORRESPONDENCES IN IMAGES AND DEPTH MAPS

A. DASHKEVICH, D. VORONTSOVA, N. SKOROBOGATKO

Geometrical modeling and computer graphics department, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The development of effective computer vision methods resides at the center of many scholars, as they can increase the speed and efficiency of many tasks in various industries - cartography, robotics, in systems of virtual and additional reality, computer-aided design systems. Modern research, methods and algorithms of solving stereovision problems, image recognition, including those that work realtime, have significant perspective. One of the important tasks of the stereo vision is the task of depth maps matching into a three-dimensional model of the scene, but there are some unresolved issues regarding the process of mapping depth maps of large-scale environmental scenes obtained by unmanned aerial vehicles namely: low resolution in depth due to a large distance from the scene to the camera and the noise problem because of camera defects. Depicted problems make harder the search of key points in images for their further registration. The approach for the determination of key points on adjacent depth maps based on the search for key points, which locate in close-range areas of the parameter space. The approach is based on a search of key points set from two sequential video frames and a search from that set of pairs of points, that every point from each pair match to the same point in the scene. The corresponding pairs of key points that are localized by the feature detector may be false-positive. The above algorithm can eliminate these pairs of points by determining the preferred direction of movement of key points in the local areas of the image, and also the algorithm makes it possible to determine the displacement center of the camera's point of view, which provides a better estimate of the camera pose estimation. The method is implemented as a program application and tested on video materials, obtained by an unmanned aerial vehicle

**Keywords:** computer vision; stereovision; pattern recognition; depth map; three-dimensional model of scene; key point registration; feature detector; unmanned aerial vehicle

### Введение

Одной из ключевых задач в области компьютерного зрения является задача

восстановления трехмерной модели сцены по набору изображений. Важным этапом задачи восстановления является поиск и сопоставление ключевых точек на смежных изображениях для получения карт глубины,

и, на полученных картах глубины, для восстановления трехмерного облака точек. При этом, точность поиска и сопоставления ключевых точек оказывает существенное влияние на точность результирующего облака точек. Существующие подходы к решению проблемы точности сопоставления можно разделить на методы поиска ключевых точек на исходных изображениях на основе детекторов устойчивых признаков, таких как SIFT, SURF или ORB [1-3] и методы сопоставления карт глубин [4]. В свою очередь, для решения задачи сопоставления карт глубин используются вариации итеративного поиска ближайших точек (ICP) [5], алгоритмы сопоставления устойчивых точек [6], методы теории вероятностей и статистики [7,8], методы глубокого обучения на основе нейронных сетей [9].

В силу простоты реализации и наглядности наибольшее распространение для решения задачи восстановления точечных множеств из карт глубин получили алгоритмы на основе итеративного поиска ближайших точек [5,10,11]. В работе [12] приведен детальный сравнительный обзор методов ICP и пути повышения точности таких алгоритмов. В работе [13] рассматривается вопрос выбора точек для сопоставления в алгоритмах ICP.

Одним из недостатков предложенных подходов является необходимость поиска и сопоставления ключевых точек сначала в пространстве исходных изображений, а затем в пространстве карт глубин, что повышает стоимость вычислений для решения данной задачи. При этом, относительные положения ключевых точек на изображениях и соответствующих им картах глубины в существенной степени совпадают. В представленной работе предлагается подход к решению задачи поиска ключевых точек в пространстве изображений и переноса их на карты глубин.

### Цель работы

Разработка метода нахождения устойчивых пар ключевых точек на изображениях и картах глубин для решения задачи восстановления трёхмерной структуры сцены.

### Изложение основного материала

Пусть задан набор изображений  $F = \{f_1, \dots, f_N\}$  из  $N$  последовательных кадров. Предполагается, что ключевые точки в малой области двух смежных изображений  $f_i$  и  $f_{i+1}$  будут иметь близкие значения вектора  $V$  направления движения. Соответственно, угол наклона  $\Theta$  и модуль  $L = |V|$  данного вектора формируют двумерное пространство параметров. Таким образом, вектора движения близких ключевых точек будут иметь близкие значения  $\Theta$  и  $L$ , а

корректно найденные пары ключевых точек могут быть отобраны на основе весов  $w$ , назначаемых каждой точке в пространстве параметров  $\Theta-L$ .

В работе предлагается следующий метод определения устойчивых пар соответствий в пространстве признаков, который основан на методе пространственного хеширования и разбиения на регулярную сетку [14]:

1) для каждой пары изображений найдем множество ключевых точек  $K = \{k_1, \dots, k_M\}$ ;

2) для определения пар ключевых точек, соответствующей одной и той же точке сцены произведем начальное сопоставление ключевых точек  $k_j \in f_i$  и  $k_t \in f_{i+1}$ ,  $j \neq t$ ,  $(j, t) = 1 \dots M$ . При этом многие пары точек на данном этапе будут представлять собой ложно-положительные срабатывания;

3) для удаления ложно-положительных пар предлагается разбить пространство  $\Theta-L$  на регулярную сетку с размером ячейки  $(c_a, c_l)$  вдоль соответствующих осей, при этом каждой ячейке назначается весовой коэффициент  $w$ , для этого формируем двумерный массив-аккумулятор  $A$ , каждую ячейку которого инициализируем значением  $w = 0$ , также формируем хеш-таблицу  $H$ , в которой будут содержаться индексы точек, находящихся в ячейках пространства параметров;

4) для каждой пары  $(k_j, k_t)$  ключевых точек вычисляется вектор движения  $V = k_t - k_j$ ;

5) для каждого  $V$  вычисляются дискретизированные значение угла и модуля вектора

$$a = \Theta / c_a, \\ l = L / c_l.$$

6) в каждой ячейке  $\Theta-L$ -пространства с индексами  $(a, l)$  увеличиваем значение веса:

$$w = w + 1;$$

7) вычисляем значение ключа хеш-таблицы:

$$h = a \cdot c_l + l;$$

8) в ячейку хеш-таблицы  $H[h]$  вносим индексы точек, попавших в ячейку пространства  $\Theta-L$  с индексами  $(a, l)$ ;

9) после обработки всех пар точек в ячейка массива  $A$ , содержащая самое большое значение  $w$  будет отвечать главному направлению движения пар ключевых точек в данной локальной области изображения, а в соответствующей ячейке хеш-таблицы будут содержаться индексы пар ключевых точек, формирующих указанные вектора. При этом, ложно-положительные пары будут иметь направление и модуль вектора движения преимущественно отличный от главного направления, что дает возможность удалять такие пары из дальнейшего рассмотрения.

### Обсуждение результатов

В соответствии с предложенным подходом была проведена тестовая оценка на данных полученных аэрофотосъемкой с беспилотного летательного аппарата. На рис. 1 приведен результат начального сопоставления ключевых точек, найденных с помощью дескриптора ORB. Для начального сопоставления была применена библиотека приближительного поиска ближайших соседей FLANN [15].

После удаления некорректно сопоставленных пар точек по предложенному алгоритму большая часть ложно-положительных пар была удалена, итоговые пары ключевых точек приведены на рис. 2. Перенос полученных пар точек на карту глубин, построенную на основе пары исходных изображений возможен на основе пространственной близости точек одного изображения из пары (определяется методом построения карт глубин) и точек карты.

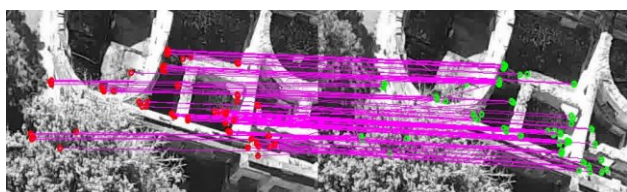


Рис. 1 – Результат начального сопоставления ключевых точек на изображениях

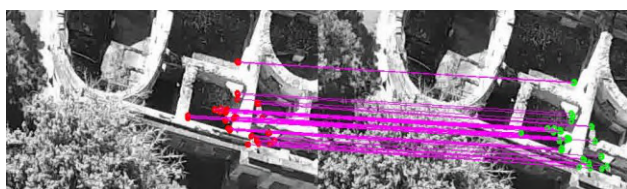


Рис. 2 – Результат работы алгоритма

Предложенный алгоритм реализован в виде программного приложения на языке программирования Python с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV.

### Выводы

В результате работы разработан метод нахождения устойчивых пар ключевых точек на смежных изображениях, полученных из видео.

Предложенный алгоритм может быть применен для нахождения ключевых точек в задаче восстановления трехмерных моделей сцен на основе двумерных изображений. Так как в результате работы выявляются наиболее точные сочетания ключевых точек, алгоритм позволяет повысить точность как при решении задачи

стереосопоставления изображений, так и при выборе точек для алгоритмов ICP.

К ограничениям подхода следует отнести то, что алгоритм способен находить только пары ключевых точек, полученные в результате относительного движения сцены между кадрами.

### Список литературы

1. Lowe, D. G. Object recognition from local scale-invariant features / D. G. Lowe // *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999. – 2. – P. 1150–1157.
2. Bay, H. SURF: Speeded Up Robust Features / H. Bay, T. Tuytelaars, L. Van Gool // Leonardis, A., Bischof, H., and Pinz, A. (eds.). *Computer Vision – ECCV 2006*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006. – P. 404–417.
3. Rublee, E. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF / E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, G. Bradski // *2011 International Conference on Computer Vision*, Barcelona, Spain, 2011. – P. 2564–2571.
4. Romanoni, A. Multi-view Stereo with Single-View Semantic Mesh Refinement / A. Romanoni, M. Ciccone, F. Visin, M. Matteucci // *2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, IEEE, Venice, 2017. – P. 706–715.
5. Bouaziz, S. Sparse Iterative Closest Point / S. Bouaziz, A. Tagliasacchi, M. Pauly // *Computer Graphics Forum*. – 2013. – 32. – P. 113–123. – doi:10.1111/cgf.12178.
6. Gold, S. New algorithms for 2d and 3d point matching: pose estimation and correspondence / S. Gold, A. Rangarajan, C.-P. Lu, P. Suguna, E. Mjølness // *Pattern Recognition*. – 1998. – 38 (8). – P. 1019–1031.
7. Lawin, F. J. Density Adaptive Point Set Registration / F. J. Lawin, M. Danelljan, F. S. Khan, P.-E. Forssen, M. Felsberg // *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, Salt Lake City, UT, USA, 2018. – P. 3829–3837.
8. Evangelidis, G. D. Joint Alignment of Multiple Point Sets with Batch and Incremental Expectation-Maximization / G. D. Evangelidis, R. Horaud // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2018. – 40. – P. 1397–1410. – doi:10.1109/TPAMI.2017.2717829.
9. Riegler, G. OctNetFusion: Learning Depth Fusion from Data / G. Riegler, A. O. Ulusoy, H. Bischof, A. Geiger // *2017 International Conference on 3D Vision (3DV)*, IEEE, Qingdao, 2017. – P. 57–66.
10. Park, S.-Y. An accurate and fast point-to-plane registration technique / S.-Y. Park, M. Subbarao // *Pattern Recognition Letters*. – 2003. – 24. – P. 2967–2976. – doi:10.1016/S0167-8655(03)00157-0.
11. Chetverikov, D. The Trimmed Iterative Closest Point Algorithm / D. Chetverikov, D. Svirko, D. Stepanov, P. Krsek // *In International Conference on Pattern Recognition*. – 2002. – P. 545–548.
12. Rusinkiewicz, S. Efficient variants of the ICP algorithm / S. Rusinkiewicz, M. Levoy // *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, IEEE Comput. Soc, Quebec City, Que., Canada, 2001. – P. 145–152.



13. **Gelfand, N.** Geometrically stable sampling for the ICP algorithm / **N. Gelfand, L. Ikemoto, S. Rusinkiewicz, M. Levoy** // *Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2003. 3DIM 2003. Proceedings, IEEE, Banff, Alberta, Canada, 2003. – P. 260–267.
14. **Дашкевич, А. А.** Алгоритм пространственного хеширования для решения задач приближительного поиска ближайших соседей / **А. А. Дашкевич** // *Науковий вісник ТДАТУ*. – 2018. – Вип. 8. –Т. 1. – С. 79–86.
15. **Muja, M.** Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration / **M. Muja, D. G. Lowe** // *International Conference on Computer Vision Theory and Application VISSAPP'09*, INSTICC Press, 2009. – P. 331–340.
7. **Lawin, F. J., Danelljan, M., Khan, F. S., Forssen, P.-E., Felsberg, M.** Density Adaptive Point Set Registration. *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, Salt Lake City, UT, USA, 2018, 3829–3837.
8. **Evangelidis, G. D., Horaud, R.** Joint Alignment of Multiple Point Sets with Batch and Incremental Expectation-Maximization. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018, **40**, 1397–1410, doi: 10.1109/TPAMI.2017.2717829.
9. **Riegler, G., Ulusoy, A. O., Bischof, H., Geiger, A.** OctNetFusion: Learning Depth Fusion from Data. *2017 International Conference on 3D Vision (3DV)*, IEEE, Qingdao, 2017, 57–66.
10. **Park, S.-Y., Subbarao, M.** An accurate and fast point-to-plane registration technique. *Pattern Recognition Letters*, 2003, **24**, 2967–2976, doi:10.1016/S0167-8655(03)00157-0.

#### References (transliterated)

1. **Lowe, D. G.** Object recognition from local scale-invariant features. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999, **2**, 1150–1157.
2. **Bay, H., Tuytelaars, T., Van Gool, L.** SURF: Speeded Up Robust Features. *Leonardis, A., Bischof, H., and Pinz, A. (eds.). Computer Vision – ECCV 2006*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006, 404–417.
3. **Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., Bradski, G.** ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. *2011 International Conference on Computer Vision*, IEEE, Barcelona, Spain, 2011, 2564–2571.
4. **Romanoni, A., Ciccone, M., Visin, F., Matteucci, M.** Multi-view Stereo with Single-View Semantic Mesh Refinement. *2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, IEEE, Venice, 2017, 706–715.
5. **Bouaziz, S., Tagliasacchi, A., Pauly, M.** Sparse Iterative Closest Point. *Computer Graphics Forum*, 2013, **32**, 113–123, doi:10.1111/cgf.12178.
6. **Gold, S., Rangarajan, A., Lu, C.-P., Suguna, P., Mjolsness, E.** New algorithms for 2d and 3d point matching: pose estimation and correspondence. *Pattern Recognition*, 1998, **38** (8), 1019–1031.
11. **Chetverikov, D., Svirko, D., Stepanov, D., Krsek, P.** The Trimmed Iterative Closest Point Algorithm. *In International Conference on Pattern Recognition*, 2002, 545–548.
12. **Rusinkiewicz, S., Levoy, M.** Efficient variants of the ICP algorithm. *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, IEEE Comput. Soc, Quebec City, Que., Canada, 2001, 145–152.
13. **Gelfand, N., Ikemoto, L., Rusinkiewicz, S., Levoy, M.** Geometrically stable sampling for the ICP algorithm. *Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2003. 3DIM 2003. Proceedings, IEEE, Banff, Alberta, Canada, 2003, 260–267.
14. **Dashkevich, A.** Algoritm prostranstvennogo heshirovaniya dlya resheniya zadach priblizitel'nogo poiska blizhayshih sosedey. *Scientific bulletin of the Tavria agrotechnological state university*, 2018, **8**, 1, 79–86.
15. **Muja, M., Lowe, D. G.** Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration. *International Conference on Computer Vision Theory and Application VISSAPP'09*, INSTICC Press, 2009, 331–340.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Дашкевич Андрей Александрович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», докторант кафедры геометрического моделирования и компьютерной графики; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0002-9963-0998; e-mail: dashkewich.a@gmail.com.

**Andrey Dashkevich** – Ph. D., docent, doctoral student of geometrical modeling and computer graphics department, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9963-0998; e-mail: dashkewich.a@gmail.com.

**Воронцова Дарья Владимировна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры геометрического моделирования и компьютерной графики; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0001-7868-0067; e-mail: davorontso@gmail.com.

**Darya Vorontsova** – Ph. D., docent of geometrical modeling and computer graphics department, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7868-0067; e-mail: davorontso@gmail.com.

**Скоробогатко Никита Валентинович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры геометрического моделирования и компьютерной графики; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0001-5189-7637; e-mail: drskorik@gmail.com.

**Nikita Skorobogatko** – Ph. D. student, geometrical modeling and computer graphics department, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-5189-7637; e-mail: drskorik@gmail.com.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Дашкевич, А. А.** Алгоритм поиска устойчивых соответствий пар ключевых точек на изображениях и картах глубины / **А. А. Дашкевич, Д. В. Воронцова, Н. В. Скоробогатко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 86-90. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.11.

*Please cite this article as:*

**Dashkevich, A., Vorontsova, D., Skorobogatko, N.** An algorithm of search of key point pairs strong correspondences in images and depth maps. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), 86-90, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.11.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Дашкевич, А. О.** Алгоритм пошуку стійких відповідностей пар ключових точок на зображеннях та картах глибини / **А. О. Дашкевич, Д. В. Воронцова, М. В. Скоробогатко** // *Вісник НТУ «ХПИ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 86-90. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.11.

**АНОТАЦІЯ** Розвиток ефективних методів комп'ютерного зору постійно перебуває у центрі багатьох науковців, адже вони можуть підвищити швидкість і ефективність багатьох задач у різних галузях промисловості - картографія, робототехніка, системи віртуальної і доповненої реальності, системи автоматизованого проектування. Значну перспективу мають сучасні дослідження, методи і алгоритми вирішення задач стереозору, розпізнавання образів, в тому числі ті, які працюють в режимі реального часу. Однією з важливих задач стереозору є задача поєднання карт глибини у тривимірну модель сцени, але є деякі не вирішені питання процесу зіставлення карт глибин для великомасштабних сцен зовнішнього середовища, які отримані безпілотними літаками а саме: низька роздільна здатність по глибині завдяки великій відстані від сцени до камери та проблема наявності шуму внаслідок дефектів камери. Зазначені проблеми створюють труднощі в процесі пошуку ключових точок на зображеннях для їх подальшого зіставлення. В представленій роботі пропонується підхід до визначення ключових точок на суміжних картах глибини на основі пошуку ключових точок, що знаходяться в близьких областях простору параметрів. Підхід базується на пошуку множини ключових точок в двох послідовних відеокадрах та знаходженні серед них пар точок таких, що кожна точка пари відповідає одному й тому ж об'єкту на вхідному зображенні. Відповідні пари ключових точок, які локалізовані детектором ознак, можуть бути хибно-позитивними. Вищезазначений алгоритм може усунути такі пари точок шляхом визначення переважного напрямку руху ключових точок в локальних ділянках зображення, також алгоритм надає змогу визначення центру зміщення точки огляду камери, що забезпечує кращу оцінку положення для знімального оснащення. Результати роботи реалізовано у вигляді програмного додатку та протестовано на відео-матеріалах, що отримано безпілотним літаком

**Ключові слова:** комп'ютерний зір; стереозір; розпізнавання образів; карта глибини; тривимірна модель сцени; зіставлення ключових точок; детектор ознак; безпілотний літак

Поступила (received) 14.02.2019

УДК 004.415.532

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.12

## АВТОМАТИЗОВАНЕ ТЕСТУВАННЯ ВЕБ-ДОДАТКІВ З РІЗНОРІВНЕВОЮ АРХІТЕКТУРОЮ

Г. М. КОДОЛА\*, Н. С. ВОЛИНЕЦЬ, І. В. СЕРБУЛОВА

кафедра інформаційних систем, ДВНЗ УДХТУ, Дніпро, УКРАЇНА  
\*e-mail: gkodola@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Веб-додатки відіграють важливу роль в житті нашого суспільства. Вони застосовуються в таких секторах, як бізнес, охорона здоров'я та державне управління. Від якості таких додатків може залежати не лише зручність користувачів, але і функціонування організацій. Тестування є найбільш широко використовуваним і ефективним підходом для забезпечення якості та надійності програмного забезпечення, включаючи веб-додатки. Однак веб-додатки дуже відрізняються від традиційного програмного забезпечення, оскільки вони включають в себе динамічне створення та інтерпретацію коду, а також реалізацію конкретного режиму взаємодії на основі навігаційної структури веб-програми. Автоматизоване тестування – це автоматичне виконання набору тестів. Створивши цей набір один раз, його можна використовувати кожного разу після внесення деяких змін у веб-додаток. Крім того, сучасні веб-додатки побудовані на основі багаторівневої архітектури. Тому, щоб перевірити загальну поведінку веб-додатків, потрібно скласти комплекс методів тестування. Автоматизація тестування не може бути реалізована без відповідних інструментів. Саме вони визначають, як буде здійснюватися тестування та чи можуть бути досягнуті переваги автоматизації. Інструменти автоматизації тестування є найважливішим компонентом у інструментальному ланцюжку розробки. В статті було проаналізовано існуючі програмні засоби, які використовуються для автоматизованого тестування, та обрано серед них для кожного рівня веб-додатку ті, які зможуть забезпечити високий рівень безпеки і мінімізувати ймовірність помилок або збоїв в роботі програми. Для досягнення цієї цілі були розглянуті такі види програмних засобів: системи управління версіями; системи відстежування помилок; засоби автоматичного тестування; засоби для автоматизованого тестування навантаження; програмне забезпечення безперервної інтеграції. На їх основі було складено комплекс автоматизації тестування веб-додатку, який дозволить без зайвих складнощів проводити індивідуальні модифікації системи і значно зменшити кількість помилок в процесі доробки системи іншими спеціалістами. В результаті реалізації автоматизованого тестування веб-проєкту був отриманий практичний досвід створення автоматизованої системи тестування веб-додатків за допомогою системи контролю версій (GIT) Bitbucket і системи безперервної інтеграції (CI) Jenkins.

**Ключові слова:** автоматизоване тестування веб-додатків; різнорівнева архітектура; безпека даних; інтеграція коду; мінімізація помилок

## AUTOMATED TESTING OF WEB APPLICATIONS WITH MULTILEVEL ARCHITECTURE

G. KODOLA\*, N. VOLYNETS, I. SERBULOVA

Information Control Systems and Technology, The Ukrainian State Chemical-Technological University, Dnipro, UKRAINE

**ABSTRACT** Web applications play an important role in the life of our society. They are applied in sectors such as business, health care and public administration. The quality of such applications can depend not only on user convenience but also on the functioning of organizations. Testing is the most widely used and effective approach to ensuring the quality and reliability of software, including web applications. However, web applications are very different from traditional software because they include dynamic creation and interpretation of the code, as well as the implementation of a specific interaction mode based on the navigation structure of the web application. Automated testing is an automatic execution of a set of tests. Having created this set once, you can use it every time after making some changes to the web application. In addition, modern web applications are built on the basis of multi-level architecture. Therefore, to test the overall behavior of web applications, you need to complete a set of testing methods. Automation testing cannot be implemented without the appropriate tools. It determines how they will be tested and whether the benefits of automation can be achieved. Test automation tools are the most important component in the development toolchain. The purpose of the work was to analyze the existing software tools used for automated testing, to apply among them for each level of the web application those that can provide a high level of security and minimize the likelihood of errors or failures in the program. To achieve this goal, the following kinds of software were considered: version control systems; error tracking systems; automatic testing tools; tools for automated load testing; continuous integration software. On their basis, a complex of testing automation of the web application was made, which would allow without any extra complexity to carry out individual modifications of the system and significantly reduce the number of errors in the process of updating the system by other specialists. As a result of the automated testing of the web project, practical experience was gained with the creation of an automated web application testing system using the Bitbucket version control system (GIT) and the Jenkins Continuous Integration System (CI).

**Keywords:** automated testing of web applications; multi-level architecture; data security; code integration; minimize errors

### Вступ

Важливість автоматизації тестування у веб-розробках походить від широкого використання веб-

додатків та пов'язаної з нею потреби у якості коду. Автоматизація тестування вважається вирішальною для забезпечення рівня якості, що очікується

користувачами, оскільки вона може заощадити багато часу в тестуванні, а також допомагає розробникам випускати веб-програми з меншою кількістю дефектів. Основною перевагою автоматизації тестування є швидке, автоматичне виконання набору тестів після внесення деяких змін у веб-додаток. Крім того, сучасні веб-додатки використовують багаторівневу архітектуру, де реалізація розподіляється по різних шарах і запускається на різних машинах. З цієї причини, щоб перевірити загальну поведінку веб-додатків, потрібні наскрізні методи тестування.

Тестування веб-проектів необхідно застосовувати на всіх етапах життєвого циклу проекту (рис. 1). Набір методів тестування залежить від специфіки структури та призначення веб-проекту.



Рис. 1 – Схема життєвого циклу веб-додатку

Таким чином, комплекс автоматизації тестування веб-додатку дозволить без зайвих складнощів проводити індивідуальні модифікації системи і дозволить мінімізувати кількість помилок в процесі доробки системи іншими спеціалістами.

#### Мета роботи

Розробити методику автоматизованого тестування веб-додатків з різнорівневою архітектурою для забезпечення високого рівня безпеки і мінімізації ймовірності помилок або збоїв в роботі програми, що базується на використанні сучасних засобів і технологій розробки і супроводу веб-проектів, які розробляються командою розробників з розподіленою спільною роботою.

#### Викладення основного матеріалу

Тестування веб-додатків – це складний процес, тому що його труднощі примножені усіма розподіленими компонентами системи, що взаємодіють з додатком.

Огляд літератури виявив велику кількість досліджень та розробок присвячених автоматизованому тестуванню веб-додатків. Універсальність веб-додатків є переважною особливістю, яка робить тестування веб-додатків

складною задачею [1]. Основною особливістю тестування веб-додатків, що відрізняє його від традиційного тестування десктопних програм, є те, що веб-програми абсолютно різномірні за природою на різних рівнях [2]. В роботах [3,4] наведено переваги автоматизованого тестування. Огляд сучасних методів та видів тестування веб-додатків детально розглянуто в роботах [5,6]. Також запропоновано використання системних сценаріїв для оптимізації процесу тестування в [7] і розглянуто питання тестування безпеки та наявності вразливостей веб-додатків [8]. В роботах [6,9] докладно розглянуто існуючі на ринку програмні засоби для автоматизації тестування. Проаналізовано методики створення тестів окремих модулів, їх відтворення та автоматизація в [10,11]. Однак цілий ряд питань, пов'язаних з практичною реалізацією зазначених підходів, як і раніше залишається актуальним.

Розглянемо складнощі, що можуть виникнути в ході розробки проекту, та способи їх вирішення за допомогою тестів [6,12]:

- безпека персональних даних і даних яка оброблює і зберігає програмний продукт. Тестування дозволяє здійснювати додаткові перевірки в можливих вразливих місцях в кодї програми, запускати тестові сценарії роботи користувача і спроби отримати закриті інформацію;

- вірогідність відмови в роботі певних компонентів програми при роботі різних спеціалістів над однаковими фрагментами коду – коли штат спеціалістів великий, існує велика вірогідність що інший програміст, який вносить зміни в існуючий код може змінити логіку роботи таким чином, що цей код буде працювати некоректно, або буде негативно впливати на роботу інших програмних вузлів. Тестування допомагає додатково перевіряти чи не змінився тип оброблюваних даних, призначення методу і в цілому механізм роботи функції, особливо якщо компонент активно взаємодіє з іншими частинами програми;

- вірогідність збоїв при навантаженні додатку. Перевірка програми на стійкість до навантажень особливо важлива у випадку якщо проектом буде користуватись велика кількість людей. При розробці всі компоненти можуть працювати без помилок і досить швидко, але стрес-тести допомагають виявити слабкі і неоптимізовані місця проекту і уникнути труднощів в експлуатації великою кількістю користувачів;

- обробка документації тестів і оцінка ефективності роботи програми з урахуванням змін. По тестовим сценаріям можливо оцінювати глибину та ефективність тестів. У випадку ручного тестування неможливо оцінити ефективність роботи і дати точну гарантію стабільної роботи після оновлення веб-додатку;

- розходження функціоналу і можливостей фінального релізу програмного продукту і умов

вказаних в технічному завданні до проекту. Якщо проект складний і дуже об'ємний, можливі ситуації коли виникає різниця між технічним завданням і самим проектом. Написання тестів дозволяє заздалегідь спроектувати найважливіші аспекти проекту і уникнути при його подальшому розвитку серйозних розходжень в плані функціоналу і роботи продукту.

Для покриття різних варіантів сценаріїв збоїв і складнощів при розширенні можливостей веб-додатку з різнорівневою архітектурою (рис. 2), зазвичай використовують наступні види тестування програмного забезпечення [6,13]:

- Unit-тести (одиничне тестування, або модульне тестування) – це автоматичний вид тестування програмного забезпечення (виконується скриптом) тест для певної частини програми. Автоматичні тести дозволяють значно збільшити обсяг тестування порівняно з ручним тестуванням компонентів;

- тести сумісності – подібні тести дозволяють впевнитись що інтерфейс додатку буде сумісний з відповідними версіями браузерів. Можливо перевірити коректність роботи CSS-стилів, HTML-розмітки, Java Script коду в різних браузерах та їх версіях;

- тести бази даних – цей вид тестування надає можливість контролювати стабільну роботу бази даних додатку, цілісності даних таблиць, індексів і функцій;

- функціональне тестування – це тестування програмного забезпечення для перевірки реалізації функціональних вимог, тобто можливості в певних умовах вирішувати певні задачі які необхідні користувачам програми;

- стрес-тести – це тестування веб-додатку в умовах перевищення кордонів для нормального функціонування додатку. Стрес-тест призначений для визначення продуктивності системи і передбачення поведінки системи в умовах стресових навантажень.

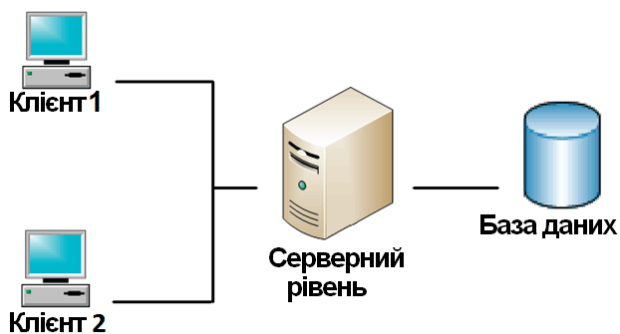


Рис. 2 – Схема трьохрівневої архітектури

Таким чином, на кожному із рівнів архітектури проводиться свій вид тестів. На серверному рівні проводяться стрес-тести, тести на навантаження серверу і додаткового програмного забезпечення яке

його обслуговує. Клієнтський рівень це безпосередньо робота самого додатку – на цьому рівні проводяться функціональні і модульні тести, а також тести на сумісність. На рівні бази даних проводиться окремо тестування бази даних додатку, перевірка цілісності даних, їх зміна, видалення або збереження.

Функціональні, модульні тести і тести бази даних тісно пов'язані один з одним, і разом використовуються при тестуванні окремих компонентів додатку.

Розглянемо етапи автоматизації тестування з використанням систем підтримки процесу розробки веб-проектів.

Контроль за змінами, що вносяться в проект допомагають забезпечити системи управління версіями (Version Control System – VCS), які зберігають попередні версії вихідних файлів проекту, відстежують вироблені в файлах зміни, забезпечують спільну командну роботу над проектом та ін. До найбільш популярних на поточний момент VCS відносяться: SVN, GIT, Microsoft VSS. Використання системи контролю версій піднімає загальний рівень якості розробки.

Для управління супроводу проекту, внесення в нього змін, виправлення помилок та іншими аспектами розробки та поліпшення якості менеджменту використовуються системи відстежування помилок (Bug Tracking System – BTS). Головний компонент BTS являє собою базу даних з віддаленим доступом, що забезпечує централізований доступ до всіх необхідних файлів, специфікаціям, графіками, планам, зауважень та ін. Існує широке розмаїття систем стеження за вадами: Basecamp, Bugzilla, Trac, MantisBT, Redmine, Jenkins тощо.

По завершенні етапу активного програмування починається етап тестування коректності функціонування створеного веб-додатку: перевірки на наявність граматичних помилок, пропущених картинок, непрацюючих посилань та ін., а також перевірки функціонування сайту в різних веб-браузерах. Даний етап може бути автоматизований за допомогою засобів автоматичного тестування таких, як IBM Rational AppScan, Empirix E-TEST Suite, XSpider, WAS, Selenium WebDriver і ін.

Таким чином, основні етапи автоматизації тестування з використанням систем підтримки процесу розробки веб-проектів можна представити у вигляді наступної схеми (рис. 3).



Рис. 3 – Схема етапів автоматизації тестування з використанням систем підтримки процесу розробки



Проведений аналіз сучасних засобів для автоматизованого тестування навантаження серед інструментів Apache JMeter, АВ (Apache Benchmark) і HP LoadRunner [14] показав, що:

– АВ (Apache Benchmark) – однопоточна програма для командного рядка, що використовується для вимірювання продуктивності HTTP веб-серверів. Спочатку розроблена для тестування HTTP-сервера Apache, в основному підходить для тестування будь-якого веб-сервера. Утиліта ab поставляється разом зі стандартною дистрибуцією Apache, і як сам Apache, є вільним програмним забезпеченням і розповсюджується під Ліцензією Apache. Недоліком цієї програми є обмежений функціонал і можливість повноцінно працювати лише при використанні веб-серверу Apache.

– HP LoadRunner (також HPE LoadRunner) – програма для автоматизованого тестування навантаження. Програма може виконувати тестування як різних додатків, так і сайтів різного рівня складності. При тестуванні емулює паралельну роботу великої кількості так названих віртуальних користувачів (у вигляді процесів або потоків), що виконують різні скрипти (дії) за різними сценаріями. Програма має відповідні набори інструментів для проведення тестування. Також до складу HP LoadRunner входить набір інструментів для роботи з додатком по різних протоколах (віддалено, через проксі-сервер та ін.). В порівнянні з Apache Benchmark має більший функціонал але не поширюється безкоштовно.

Якщо порівняти Apache JMeter і HP LoadRunner проаналізувавши статистику використання, то як результат JMeter використовується набагато частіше ніж HP LoadRunner. Процентне порівняння зображено на рисунку 4.

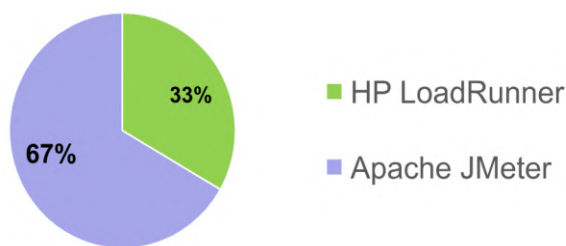


Рис. 4 – Порівняння програм тестування навантаження за популярністю

Також був проведений аналіз ефективності роботи програм і їх можливостях в імітації навантаження. Тестування проводилось на одному сервері, для імітації навантаження виконувались SQL-запити select, insert і update в базу даних додатку. По результатам, HP LoadRunner має більші можливості для здійснення великого навантаження за певний обсяг часу. Результати тестування зображені на рисунку 5.

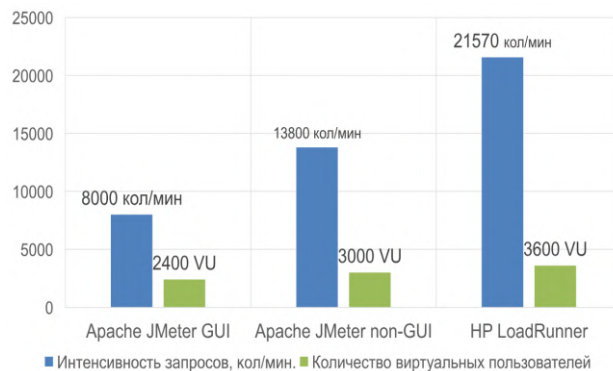


Рис. 5 – Результат порівняння програм по максимальному навантаженню сервера за обмежений обсяг часу

Як результат, HP LoadRunner є лідером враховуючи його функціональні можливості і більшу ефективність при тестах навантаження. Але, враховуючи що це платний продукт, і функціональних можливостей і ефективності навантаження Apache JMeter вистачає для проекту, був обраний саме Apache JMeter.

Враховуючи що велика кількість спеціалістів працює над одним проектом, використовується система контролю версій GIT – подібна система дозволяє контролювати процес розробки і надає можливість клонувати проект для кожного працівника у цілях організації окремого простору для створення нового і редагування старого функціоналу програми без шкоди для основного проекту. На рисунку 6 зображений механізм роботи системи контролю версій.



Рис. 6 – Схема роботи з GIT

Розглянуті веб-сервіси Bitbucket, GitHub і GitLab – це основні конкуренти подібних систем [15]. Основна перевага Bitbucket – це безкоштовні приватні репозиторії. На інших платформах безкоштовно можливо розмістити тільки відкритий проект, вихідний код якого буде доступний всім користувачам. Також у порівнянні з GitLab, Bitbucket



працює більш стабільно, з мінімальним відсотком відмов у роботі і завантаженні змін на сервер.

Оптимальний варіант роботи з проектом – це повна автоматизація тестових та зборочних процесів програми, використання інструментів для безперервної інтеграції, яке необхідне для можливості зручної і більш швидкої розробки. За допомогою Bitbucket можливо провести інтеграцію з системами стеження за помилками (Jira, Trello, Slack), що дозволяє оптимізувати роботу між керівниками розробки і спеціалістами які займаються написанням коду, тестуванням і написанням тестів.

Безперервна інтеграція і розгортання (CI) – це стратегії, які допомагають збільшити швидкість розробки і прискорити випуск добре протестованих, готових до використання програмних продуктів. Безперервна інтеграція дозволяє розробникам тестувати і інтегрувати свої зміни в загальну кодову базу для мінімізації конфліктів інтеграції [14]. Безперервна доставка усуває труднощі розгортання або випуску програмного забезпечення. Безперервне розгортання – ще один крок, він розгортає кожен збірку, яка автоматично проходить тестування. На рисунку 7 представлена детальна схема роботи CI.

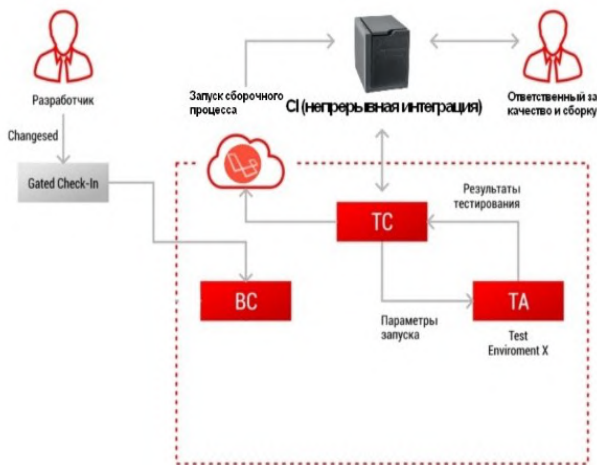


Рис. 7 – Схема роботи механізму безперервної інтеграції

Програмні засоби відіграють велику роль в тому, наскільки швидко і успішно будуть виконуватися перераховані вище етапи. Програмне забезпечення безперервної інтеграції може допомогти розробникам автоматично вносити зміни, щоб скоротити час зворотного зв'язку.

Перед вибором подібної системи, був проведений аналіз найпопулярніших засобів безперервної інтеграції, доставки і розгортання: Jenkins, GitLab CI, Buildbot, Drone і Concourse [14]:

– Jenkins є одним з перших серверів безперервної інтеграції з відкритим вихідним кодом і залишається найбільш поширеним на сьогодні варіантом. Спочатку входить в проект Hudson співтовариство і кодова база розділилися в ході

конфліктів з Oracle після придбання ними Sun Microsystems, початкових розробників. Hudson був випущений в 2005 році, а перший реліз Jenkins – в 2011 році.

Згодом сервер Jenkins перетворився в потужну і гнучку систему автоматизації завдань, пов'язаних з програмним забезпеченням. Сам Jenkins використовується в основному як фреймворк автоматизації, а більшість логіки реалізується через бібліотеки і плагіни. Все – від прослуховування вебхуків і перегляду репозиторіїв до створення середовища і підтримки мов – обробляється плагінами. Процес безперервної інтеграції може залежати від численних сторонніх плагінів, що з одного боку забезпечує гнучкість, з іншого – робить середу занадто крихкою.

Робочий процес конвеєра Jenkins, який також доступний через плагін, є відносно новою функцією, доступною з 2016 року. Процес безперервної інтеграції можна декларувати або використовувати мову Groovy в файлах сховища або текстових полях в веб-інтерфейсі Jenkins. Одним із загальних зауважень до Jenkins є те, що заснована на плагінах модель конфігурації і можливість визначати процеси конвеєра або збірки поза репозиторіїв іноді ускладнює реплікацію на іншому екземплярі Jenkins. Система Jenkins написана на Java і випущена під ліцензією MIT [16].

– GitLab CI – це інструмент безперервної інтеграції, вбудований в GitLab, платформу для розміщення сховищ і засобів розробки git. Спочатку випущений як самостійний проект, GitLab CI був інтегрований в основне програмне забезпечення GitLab з випуском GitLab 8.0 в 2015 році.

Процес CI в GitLab CI визначається всередині файлу в самому репозиторії коду за допомогою синтаксису YAML. Потім робота передається на машини під назвою runners, які легко настраюються і можуть використовувати різні ОС. При налаштуванні runner-серверів можна вибрати Docker, shell, VirtualBox або Kubernetes, щоб визначити, як виконуються завдання.

Тісний зв'язок GitLab CI з платформою GitLab має певні наслідки для використання програмного забезпечення. GitLab CI не підходить розробникам, які використовують інші платформи для розміщення сховищ. З одного боку, інтегрована функціональність дозволяє користувачам GitLab настраювати середовище безп, не встановлюючи додаткових інструментів. Автоматичне тестування можна запустити за допомогою веб-інтерфейсу, реєстрації runner-машин і додати файл визначення конвеєра в репозиторій. Тісний взаємозв'язок також дозволяє розподіляти runner-сервери між проектами, автоматично переглядати поточний статус збірки в репозиторії і зберігати артефакти збірки з кодом, який їх створив. GitLab і GitLab CI написані на Ruby і Go і випущені під ліцензією MIT.

– Buildbot – це гнучкий фреймворк безперервної інтеграції. Випущений в 2003 році в якості альтернативи проекту Tinderbox від Mozilla, Buildbot розроблявся в основному як спосіб автоматизації тестування збірки на широкому спектрі платформ.

Buildbot випускається за ліцензією GPL і написаний на Python з бібліотекою Twisted. Конфігурація Buildbot повністю написана на Python. Це означає, що конфігурація значно складніше, ніж в інших системах, але це дає адміністраторам можливість для розробки свого ідеального робочого процесу і конвеєра. Кожен етап збірки чітко розділяється. Buildbot позиціонує себе як структуру з інструментами для створення призначених для користувача процесів, подібно до того, як веб-фреймворки дозволяють створювати призначені для користувача сайти.

Платформа тестування збірки Buildbot підтримує безліч різних операційних систем і систем управління версіями. Оскільки Buildbot розроблений з урахуванням тестування відкритого виходячи коду, його архітектура дозволяє користувачам легко створювати робочі процеси з індивідуальними платформами і розширювати базу проекту. Користувачеві потрібно тільки встановити кілька пакетів Python, а потім надати облікові дані.

– Drone – це сучасна платформа безперервної інтеграції з архітектурою на основі контейнерів.

Хоча розглянуті вище інструменти теж дозволяють запускати збірку за допомогою Docker, контейнери лежать в основі конструкції Drone. Drone написаний на Go і був вперше випущений в 2014 році під ліцензією Apache.

Drone працює як середній рівень між Docker і провайдером сховища. Замість того, щоб запускати сервер безперервної інтеграції і підключатися до системи управління версіями, Drone вимагає інформацію облікового запису для завантаження власних моделей перевірки автентичності, користувача і дозволів. Drone запускається як контейнер. Він підтримує кілька баз даних і провайдерів репозиторіїв і має вбудовану підтримку для налаштування сертифікатів TLS / SSL.

Drone шукає в репозиторіях спеціальні файли YAML для визначення конвеєра. Синтаксис чіткий і простий, щоб будь-хто, хто використовує репозиторій, міг зрозуміти процес безперервної інтеграції. Drone надає плагинову систему, але вона працює не так, як в Jenkins. У Drone плагіни є спеціальними контейнерами Docker, які використовуються для додавання попередньо налаштованих завдань в звичайний робочий процес. Це спрощує виконання спільних завдань, адже немає необхідності обробляти весь процес вручну. У цьому сенсі плагіни Drone дещо схожі з командами Unix, які призначені для обробки вузькопрофільних завдань.

– Concourse – відносно нова платформа безперервної інтеграції, випущена в 2014 році. Підхід

Concourse до системи безперервної інтеграції значно відрізняється від інших інструментів тим, що Concourse намагається абстрагувати все зовнішні чинники за допомогою так званих ресурсів. Мета цього підходу полягає в підвищенні доступності сервера інтеграції. Це дозволяє запускати одні і ті ж процеси на будь-якому сервері Concourse.

Кожна частина процесу безперервної інтеграції складається з основних примітивів, які моделюють різні елементи системи. Залежно кожного етапу визначаються явно. Наприклад, для першого завдання може знадобитися останній Комміт в репозиторії VCS, а на наступних етапах процесу може знадобитися останній Комміт, що пройшов попередні етапи. Цей метод побудови конвеєрів шляхом зіставлення точних залежностей кожного кроку призводить до строго певної поведінки.

Concourse не бере участь в передачі даних між завданнями і не надає ніякого внутрішнього способу зберігання артефактів збірки. Вся інформація, необхідна для наступного етапу, повинна бути явно визначена і потенційно перенесена у зовнішнє сховище. За допомогою явних визначень Concourse намагається мінімізувати кількість невідомих змінних, які повинна враховувати система. Система Concourse написана на Go і доступна за ліцензією Apache.

Програмне забезпечення безперервної інтеграції, доставки і розгортання – це складні системи автоматизації, призначені для забезпечення адаптованості і повторюваності процесів. Існує безліч різних ідей і підходів до автоматичного тестування.

### Обговорення результатів

Для реалізації автоматизації сценаріїв тестування використовувалась розроблена веб-базована підсистема підтримки електронної торгівлі. Відповідно розвитку програмної частини було необхідно реалізувати систему контролю написання нових функціональних можливостей і безпеки та стабільності роботи панелі керування для всіх працівників проекту. Для цього було прийнято рішення описати існуючий функціонал різними видами тестів і виконати подальшу автоматизацію цього процесу.

З урахуванням того що проект базується як веб-додаток і реалізований на мові програмування PHP за допомогою фреймворку Laravel, а також з використанням JavaScript, JQuery, HTML і CSS, для реалізації комплексу тестування використаний PHP-фреймворк спеціально створений для організації тестового процесу – PHPUnit. Цей фреймворк дозволяє здійснити модульне і функціональне тестування додатку, а також тестування роботи бази даних. Додатково необхідно враховувати можливі навантаження на сервер, і його стійкість до непередбачуваних ситуацій – великий вплив користувачів, робота неоптимізованих компонентів

системи, навантаження на базу даних в майбутньому, з ростом обсягів даних які зберігаються в базі даних.

В даний час PHPUnit найбільш популярний фреймворк для юніт-тестування в PHP. Крім наявності таких можливостей, як підробки (mocking) об'єктів, він також може аналізувати покриття коду, логування даних і надає тисячі інших можливостей. Враховуючи те, що Laravel побудований з урахуванням тестування, то фактично, підтримка PHPUnit доступна за замовчуванням. Проект містить в собі всі необхідні бібліотеки, конфігураційні файли і команди для успішного запуску тестування. Також Laravel надає дуже зручний API для створення HTTP-запитів до додатка, перевірки виведення, і навіть заповнення форм, і надає кілька допоміжних функцій для тестування JSON API і їх відгуків. Наприклад, методи `get()`, `post()`, `put()`, `patch()` і `delete()` використовуються для виконання різних HTTP-запитів.

PHPUnit дозволяє створювати необмежену кількість тестів, і надає можливість запускати перед внесенням змін до проекту як один із тестів, так і певну кількість або повністю всі тести додатку. Це дозволяє насамперед впевнитись в тому, що після внесення змін, система надалі буде працювати стабільно і не виникнуть непередбачувані складнощі в роботі, в першу чергу для користувачів додатку. При запуску тестів, через інтерфейс командної строки відображається процес тестування, і його результат. У випадку якщо запускається більше одного тесту, і один із тестів не пройшов, команда виводить звіт про помилку і автоматично завершить роботу тестів (рис. 8).

```
$ phpunit -c app
PHPUnit 4.3.5 by Sebastian Bergmann.

Configuration read from /Users/javier/Desktop/symfony_demo_2/app/phpunit.xml.dist
.....

Time: 3.44 seconds, Memory: 49.75Mb

OK (17 tests, 21 assertions)

Remaining deprecation notices (2)

getManager is deprecated since Symfony 2.1. Use getManager instead: 2x
  1x in DefaultControllerTest::testPublicUrls from AppBundle\Tests\Controller
  1x in BlogControllerTest::testIndex from AppBundle\Tests\Controller
```

Рис. 8 – Звіт з помилками в одному із тестів

У випадку, коли всі тести були успішно пройдені, то буде сформований звіт з врахуванням часу, який був потрібний для повного тестування і повідомлення про успішне проходження всіх тестів (рис. 9).

За допомогою фреймворку PHPUnit можливо проводити окремих аналіз покриття коду (code coverage, tests coverage) – це міра, яка використовується при тестуванні програмного забезпечення. Вона визначається відсотком тестованого вихідного коду (сирцевий код) програми. Це дозволяє розуміти, який відсоток додатку перевіряється – чим вищий відсоток покриття, тим

більша вірогідність мінімізації помилок при внесенні змін, так як повне покриття дозволяє виключити майже будь-які непередбачувані збої і порушення логіки роботи компонентів.

```
[root@alvin-CentOS6 trio]# ./vendor/bin/phpunit --coverage-text tests/AppBundle\Entity\ClientTest.php
PHPUnit 6.1.1 by Sebastian Bergmann and contributors.

..                                                                 2 / 2 (100%)

Time: 67 ms, Memory: 4.00MB

OK (12 tests, 8 assertions)

Code Coverage Report
2017-04-21 14:14:37

Summary:
Classes:  0.00% (0/30)
Methods:  2.65% (6/226)
Lines:    0.23% (0/4133)

AppBundle\Entity\Client
  AppBundle\Entity\ClientTest
    [root@alvin-CentOS6 trio]#
```

Рис. 9 – Звіт про успішне проходження всіх тестів

За допомогою цього фреймворку і набору бібліотек до нього можливо повноцінно провести функціональне, модульне тестування і тести бази даних.

Для стрес-тестів був використаний інструмент Apache JMeter – це інструмент для проведення навантажувального тестування, що розробляється Apache Software Foundation. Хоча спочатку JMeter розроблявся як засіб тестування веб-додатків, тепер він здатний проводити навантажувальні тести для JDBC-з'єднань, FTP, LDAP, SOAP, JMS, POP3, IMAP, HTTP і TCP. Це дозволяє здійснити тестування на серверному рівні і отримати детальну інформацію наскільки стабільно сервер буде працювати враховуючи різні фактори навантаження.

Для зручного аналізу і проектування для всіх працівників і зокрема спеціалістів які відповідальні за контроль якості коду і внесенням нових змін в програму використовується веб-сервіс Bitbucket – для сумісної розробки на основі системи контролю версій GIT. Bitbucket дозволяє створити репозиторій у якому буде зберігатись вихідний код проекту, і також гілки проекту кожного працівника, який задіяний в розробці.

Враховуючи дослідження і аналіз існуючих рішень для систем безперервної інтеграції, було прийнято рішення використовувати Jenkins – так як він розповсюджується безкоштовно, є дуже гнучким у налаштуваннях, має велику кількість додаткових плагінів які значно можуть розширити роботу системи, а також дозволяє отримати повний контроль над всією системою проекту, у порівнянні з конкурентними продуктами. На рис. 10 зображена конфігурація системи безперервної інтеграції, яка налаштована для комплексу, що реалізується.

Інформаційна система орієнтована виключно на працівників відділу розробки. Доступ до системи контролю версій мають всі програмісти, спеціалісти з тестування і керівник відділу. Кожний працівник має в Bitbucket свої права доступу. Наприклад керівник має можливість повністю контролювати всі гілки і весь проект загалом. А певний програміст має доступ лише до своєї гілки і може передивлятись зміст основної гілки додатку. Кожному користувачеві

можливо призначити права доступу як на перегляд, так і на запис даних по певній гілці, а також надати або зняти певні функціональні можливості. Це дозволяє здійснити точне та індивідуальне налаштування кожного користувача, що забезпечує покращення безпеки роботи сервісу і виключає можливості отримання несанкціонованих даних.

```

1 common_credentials {
2   exclude {
3     tyris-jenkins
4   }
5   data {
6     jenkins_service_user = [
7       username: 'jenkins_service_user',
8       password: '{with secret := secret "secret/jenkins/jenkins_service_user"}{{ secret.Data.value }}{{end}}',
9       description: 'for automated jenkins jobs'
10    ]
11    slack = [
12      username: '{with secret := secret "secret/slack/user"}{{ secret.Data.value }}{{end}}',
13      password: '{with secret := secret "secret/slack/pass"}{{ secret.Data.value }}{{end}}',
14      description: 'slack credentials'
15    ]
16  ]
17 }
18
19 custom_credentials {
20   include {
21     john-snow-jenkins
22     arap-jenkins
23     samir-jenkins
24   }
25   data {
26     artifactory = [
27       username: 'artii',
28       password: '{with secret := secret "secret/jenkins/artifactory"}{{ secret.Data.artifactory_password }}{{end}}',
29       description: 'Artifactory credentials'
30     ]
31   }
32 }
33
34 tyris-jenkins_credentials {
35   data {
36     nexus = [
37       username: 'deployment',
38       password: '{with secret := secret "secret/jenkins/nexus"}{{ secret.Data.nexus_password }}{{end}}',
39       description: 'Nexus credentials'
40     ]
41   }
42 }
43 }

```

Рис. 10 – Приклад конфігурації системи безперервної інтеграції

Тестовий комплекс реалізований за допомогою фреймворків Laravel і PHPUnit має файлову архітектуру зображену на рис. 11. По спеціалізованим директоріям розподілені різнопланові тести під певний компонент і функціонал додатку.

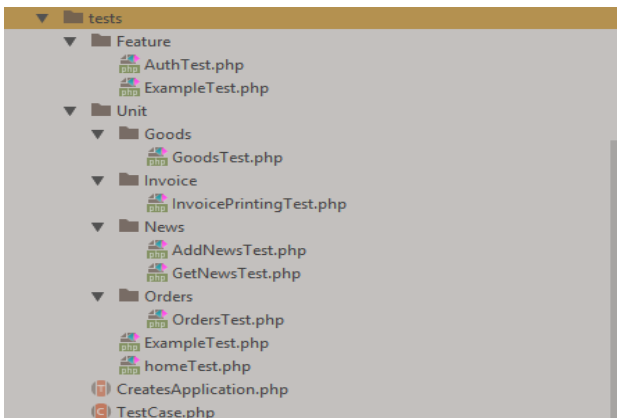


Рис. 11 – Приклад архітектури тестів компонентів і функцій додатку

Самі тести представляють функції в яких виконуються певні дії – одна функція за стандартом має здійснювати одну дію, наприклад отримання одного товару. Інша функція може вже отримувати наприклад 10 товарів. Це необхідно для більшої деталізації тестування і можливості описати максимально велику кількість ситуацій які можуть виникнути в реальних умовах використання. Приклад

реалізації тесту на отримання одного товару із бази даних показаний на рис. 12.

```

public function testGetOneIsActiveGood()
{
    $mockedGoodsCategoryCount = 10;
    $mockedCategoryGoodsData = [];
    $faker = Factory::create();
    for($i = 1; $i <= $mockedGoodsCategoryCount; $i++ ) {
        $mockedCategoryGoodsData[] = Factory(\App\Models\GoodsCategoriesModel::class)->create();
    }
    if(empty($mockedCategoryGoodsData) ) {
        self::fail();
    }
    $mockedCategoryGoodsData = array_reverse($mockedCategoryGoodsData);
    $mockedGoodsData = Factory(\App\Models\GoodsModel::class)->create(['categoryId' => collect($mockedCategoryGoodsData)->random()->id]);
    if(empty($mockedCategoryGoodsData) ) {
        self::fail();
    }
    $user = \App\Models\StaffModel::query()->find(8);
    $session = $this->actingAs($user);
    $this->actingAs($user)
    ->withSession(['user' => $user])
    ->visit('/goods')
    ->see($mockedGoodsData->name);
}

```

Рис. 12 – Приклад тесту на отримання одного товару із бази даних системи

## Висновки

В результаті реалізації автоматизованого тестування веб-проекту був отриманий практичний досвід створення автоматизованої системи тестування веб-додатків за допомогою системи контролю версій (GIT) Bitbucket і системи безперервної інтеграції (CI) Jenkins.

Розроблена система тестування дозволяє швидко і ефективно адмініструвати всі компоненти системи, отримувати інформаційні повідомлення і здійснювати аналіз змін, помилок, ресурсів серверної частини і загалом оптимізувати роботу розробників проекту.

Система створювалась з розрахунком на подальший швидкий розвиток веб-проекту у різних напрямках, що дозволить проводити оновлення стабільно і без зайвих ризиків в роботі програми.

В запропонований підхід, по можливості, були включені переваги розповсюджених підходів та інструментів, призначених для автоматизованого тестування веб-додатків.

Одним з найбільш важливих напрямків розвитку проекту є автоматизація підтримки тестового набору в актуальному стані при зміні веб-додатку, а також розширення видів тестування.

## Список літератури

1. **Arora, A.** Web Application Testing: A Review on Techniques, Tools and State of Art / **A. Arora, M. Sinha** // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. – 2012. – Vol. 3, Issue 2. – P. 1-5.
2. **Girgis, Moheb R.** An Automated Web Application Testing System / **Moheb R. Girgis, Tarek M. Mahmoud, Bahgat A. Abdullatif, Alaa M. Zaki** // *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887). – 2014. – Vol. 99, No.7. – P. 37-44. – doi: 10.5120/17387-7926.
3. **Троян, А. М.** Доцільність автоматизованого тестування для забезпечення якості програмних продуктів / **А. М. Троян, Ю. Б. Моденов** // *Проблеми*

- інформатизації та управління.* – Київ: НДІ ІТТ НАУ, 2017. – Т. 1, № 57-58. – С. 86-89. – doi: 10.18372/2073-4751.1.12798.
4. **Янгунаева, Е. А.** Сравнение автоматизированного и ручного подхода в тестировании веб-приложений / **Е. А. Янгунаева, В. М. Янгунаев** // *Научный альманах.* – Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2016. – № 1-1 (15). – С. 546-549. – doi: 10.17117/na.2016.01.01.546.
  5. **Shakti Kundu.** Web Testing: Tool, Challenges and Methods / **Shakti Kundu** // *IJCSI International Journal of Computer Science Issues.* – 2012. – Vol. 9, Issue 2, No 3. – P. 481-486.
  6. **Lakshmi, D. Rajya.** A Review on Web Application Testing and its Current Research Directions / **D. Rajya Lakshmi, S. Suguna Mallika** // *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE).* – 2017. – Vol. 7, No. 4. – P. 2132-2141. – doi: 10.11591/ijece.v7i4.pp2132-2141.
  7. **Животова, А. А.** Методи та засоби тестування веб-додатків / **А. А. Животова, Ю. Б. Моденов** // *Проблеми інформатизації та управління.* – Київ: НДІ ІТТ НАУ, 2014. – Т. 2 № 46. – С. 27-30. – doi: 10.18372/2073-4751.2.7711.
  8. **Лапонина, О. Р.** Использование сканера уязвимостей ZAP для тестирования веб-приложений / **О. Р. Лапонина, С. А. Малаховский** // *International Journal of Open Information Technologies.* – 2017. – Vol. 5, №8. – P. 18-26.
  9. Comparing Automated Testing Tools: Selenium, TestComplete, Ranorex, and more. URL: <https://www.altexsoft.com/blog/engineering/comparing-automated-testing-tools-selenium-testcomplete-ranorex-and-more/> 04.02.2019.
  10. **Soni, P.** Testing Web Applications Using UIO with GA / **Poonam Soni, Dr. Sanjay Tyagi** // *The International Journal of Soft Computing and Software Engineering.* – 2013. – Vol. 3, Issue 5. – P. 636-640.
  11. **Silva, R. A.** A Systematic Review on Search Based Mutation Testing / **Rodolfo Adamshuk Silva, Simone do Rocio Senger de Souza, Paulo Sergio Lopes de Souza** // *Information and Software Technology.* – 2017. – Vol. 81, Issue C. – P. 19-35. – doi: 10.1016/j.infsof.2016.01.017.
  12. **Myers, G. J.** The Art Of Software Testing. / **G. J. Myers.** – Wiley & Sons, Inc. 2004. – 254 p.
  13. **Burns, D.** Selenium 1.0 Testing Tools / **D. Burns.** – London: Packt Publishing, 2011. – 248 p.
  14. **Хамбл, Д.** Непрерывное развертывание ПО: автоматизация процессов сборки, тестирования и внедрения новых версий / **Д. Хамбл, Д. Фарли.** – М.: Диалектика-Вильямс, 2018. – 432 с.
  15. **Штрауб, Б.** Git для профессионального программиста / **Б. Штрауб, С. Чакоп.** – М.: Питер, 2016. – 496 с.
  16. **Laster, B.** Jenkins 2: Up and Running: Evolve Your Deployment Pipeline for Next Generation Automation 1st Edition / **B. Laster.** – М.: O'ReillyMedia, 2018. – 600 p.
- (0975 – 8887), 2014, **99**(7), 37-44, doi: 10.5120/17387-7926.
3. **Troyan, A. M., Modenov, Yu. B.** Dotsil'nist' avtomatyzovanooho testuvannya dlya zabezpechennya yakosti prohrannykh produktiv [The expediency of automated testing to ensure the quality of software products]. *Problemy informatyzatsiyi ta upravlinnya [Problems of informatization and management].* – Kyiv: Research Institute of ITT NAU, 2017, **1**(57-58), 86-89, doi: 10.18372/2073-4751.1.12798.
  4. **Yanhunaeva, E. A., Yanhunaev, V. M.** Sravneniye avtomatizirovannogo i ruchnogo podkhoda v testirovaniy veb-prilozheniy [Comparison of automated and manual approach to testing web applications]. *Nauchnyy al'manakh [Scientific Almanac].* Tambov: Consulting Company Ucom LLC, 2016, **1-1** (15), 546-549, doi: 10.17117/na.2016.01.01.546.
  5. **Kundu, Shakti.** Web Testing: Tool, Challenges and Methods. *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, 2012, **9**(2), 481-486.
  6. **Lakshmi, D. Rajya, Mallika, S. S.** A Review on Web Application Testing and its Current Research Directions. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2017, **7**(4), 2132-2141, doi: 10.11591/ijece.v7i4.pp2132-2141.
  7. **Zhivotova, A. A., Modenov, Yu. B.** Metody ta zasoby testuvannya veb-dodatktiv [Methods and tools for testing web-applications] *Problemy informatyzatsiyi ta upravlinnya [Problems of informatization and management].* – Kyiv: Research Institute of ITT NAU, 2014, **2**(46), 27-30, doi: 10.18372/2073-4751.2.7711.
  8. **Laponina, O. R., Malakhovskiy, S. A.** Ispol'zovaniye skanera uyazvimostey ZAP dlya testirovaniya veb-prilozheniy [Using ZAP Vulnerability Scanner to test web applications]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2017, **5**(8), 18-26.
  9. Comparing Automated Testing Tools: Selenium, TestComplete, Ranorex, and more. Available at: <https://www.altexsoft.com/blog/engineering/comparing-automated-testing-tools-selenium-testcomplete-ranorex-and-more/>
  10. **Soni, P. Dr. Tyagi, S.** Testing Web Applications Using UIO with GA. *The International Journal of Soft Computing and Software Engineering*, 2013, **3**(5), 636-640.
  11. **Silva, R. A., Senger de Souza, S. R., Lopes de Souza, P. S.** A Systematic Review on Search Based Mutation Testing. *Information and Software Technology*, 2017, **81**(C), 19-35, doi: 10.1016/j.infsof.2016.01.017.
  12. **Myers, G. J.** The Art Of Software Testing. Wiley & Sons, Inc. 2004, 254.
  13. **Burns, D.** Selenium 1.0 Testing Tools. London: Packt Publishing, 2011, 248.
  14. **Khambl, D., Farly, D.** Nepreryvnoye razvertyvaniye PO: avtomatizatsiya protsessov sborki, testirovaniya i vnedreniya novykh versiy [Continuous software deployment: automate the build process, test and implement new versions] Moscow: Dialectics-Williams, 2018, 432.
  15. **Shtraub, B., Chakon, S.** Git dlya professional'nogo programmista [Git for a professional programmer]. Moscow.: Piter, 2016, 496.
  16. **Laster, B.** Jenkins 2: Up and Running: Evolve Your Deployment Pipeline for Next Generation Automation 1st Edition. Moscow: O'ReillyMedia, 2018, 600.
  - 17.

#### References (transliterated)

1. **Agora, A., Sinha, M.** Web Application Testing: A Review on Techniques, Tools and State of Art. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2012, **3**(2), 1-5.
2. **Girgis, M. R., Mahmoud, T. M., Abdullatif, B. A., Zaki, A. M.** An Automated Web Application Testing System. *International Journal of Computer Applications*



**Відомості про авторів (About authors)**

**Кодола Галина Миколаївна** – Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», викладач кафедри Інформаційних систем; м. Дніпро, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9403-1462>; e-mail: [galina\\_kodola@udhtu.edu.ua](mailto:galina_kodola@udhtu.edu.ua).

**Galyna Kodola** – The Ukrainian State Chemical-Technological University, Information Control Systems and Technology, Dnipro, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9403-1462>; e-mail: [galina\\_kodola@udhtu.edu.ua](mailto:galina_kodola@udhtu.edu.ua).

**Волинець Наталія Сергіївна** – Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», викладач кафедри Інформаційних систем; м. Дніпро, Україна; e-mail: [natalia.wolynec@gmail.com](mailto:natalia.wolynec@gmail.com).

**Natalia Volynets** – The Ukrainian State Chemical-Technological University, Information Control Systems and Technology, Dnipro, Ukraine; e-mail: [natalia.wolynec@gmail.com](mailto:natalia.wolynec@gmail.com).

**Сербулова Інна Валеріївна** – Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», старший викладач кафедри Інформаційних систем; м. Дніпро, Україна; e-mail: [innasrb20@gmail.com](mailto:innasrb20@gmail.com).

**Inna Serbulova** – The Ukrainian State Chemical-Technological University, Information Control Systems and Technology, Dnipro, Ukraine; e-mail: [innasrb20@gmail.com](mailto:innasrb20@gmail.com).

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Кодола, Г. М.** Автоматизоване тестування веб-додатків з різнорівневою архітектурою / **Г. М. Кодола, Н. С. Волинець, І. В. Сербулова** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 91-100. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.12.

*Please cite this article as:*

**Kodola, G., Volynets, N., Serbulova, I.** Automated testing of web applications with multilevel architecture. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), 91-100, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.12.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Кодола, Г. Н.** Автоматизированное тестирование веб-приложений с разноразной архитектурой / **Г. Н. Кодола, Н. С. Волинец, И. В. Сербулова** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 91-100. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.12.

**АННОТАЦІЯ** Веб-приложения играют важную роль в жизни общества. Они применяются в таких секторах, как бизнес, здравоохранение и государственное управление. От качества таких приложений может зависеть не только удобство пользователей, но и функционирования организаций. Тестирование является наиболее широко используемым и эффективным подходом для обеспечения качества и надежности программного обеспечения, включая веб-приложения. Однако веб-приложения очень отличаются от традиционного программного обеспечения, поскольку они включают в себя динамическое создание и интерпретацию кода, а также реализацию конкретного режима взаимодействия на основе навигационной структуры веб-приложения. Автоматизированное тестирование - это автоматическое выполнение набора тестов. Создав этот набор один раз, его можно использовать каждый раз после внесения некоторых изменений в веб-приложение. Кроме того, современные веб-приложения построены на основе многоуровневой архитектуры. Поэтому, чтобы проверить общее поведение веб-приложений, нужно составить комплекс методов тестирования. Автоматизация тестирования не может быть реализована без соответствующих инструментов. Именно они определяют, как будет осуществляться тестирование и могут быть достигнуты преимущества автоматизации. Инструменты автоматизации тестирования являются важнейшим компонентом в инструментальной цепочке разработки. В статье было проанализировано существующие программные средства, используемые для автоматизированного тестирования, и выбраны среди них для каждого уровня веб-приложения те, которые смогут обеспечить высокий уровень безопасности и минимизировать вероятность ошибок или сбоев в работе программы. Для достижения этой цели были рассмотрены такие виды программных средств: системы управления версиями; системы отслеживания ошибок; средства автоматического тестирования; средства для автоматизированного тестирования нагрузки; программное обеспечение непрерывной интеграции. На их основе был составлен комплекс автоматизации тестирования веб-приложения, которое позволит без лишних сложностей проводить индивидуальные модификации системы и значительно уменьшит количество ошибок в процессе доработки системы другими специалистами. В результате реализации автоматизированного тестирования веб-проекта был получен практический опыт создания автоматизированной системы тестирования веб-приложений с помощью системы контроля версий (GIT) Vitbucket и системы непрерывной интеграции (CI) Jenkins.

**Ключевые слова:** автоматизированное тестирование веб-приложений; разноразневая архитектура; безопасность данных; интеграция кода минимизация ошибок

*Надійшла (received) 27.02.2019*



УДК 65.012.3: 316.422

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.13

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАВАНТАЖЕНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ МЕРЕЖІ ПРИДОРОЖНІХ ВАГОВИХ КОМПЛЕКСІВ

I. I. СТАНОВСЬКА<sup>1\*</sup>, M. Л. ГЕРГАНОВ<sup>2</sup>, I. М. ГУР'ЄВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>кафедра вищої математики та моделювання систем, Одеський національний політехнічний університет, Одеса, УКРАЇНА

<sup>2</sup>кафедра інформаційних технологій, Одеський національний політехнічний університет, Одеса, УКРАЇНА

<sup>3</sup>відділ правового забезпечення юридичного управління апарату Одеської обласної ради, Одеса, УКРАЇНА

\*e-mail: stanovskairaida@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** У дорожньому будівництві якість продукції часто оцінювали спрощено з урахуванням лише технічного аспекту ототожнюючи, як правило, з якістю матеріалів, які використовували або закінчених конструктивних елементів. У той же час, кінцевою продукцією – є автомобільна дорога, що призначена для здійснення безпечних вантажних і пасажирських перевезень протягом строку її служби. До того ж існуючі мережі вагових комплексів просто не встигають ефективно обробити потоки вантажів: їх найчастіше взагалі недостатньо для зростаючих трафіків перевезень, крім того, місця їхнього розташування неоптимальні з точки зору переважних напрямків пересування відповідного транспорту. Реконструкцію вагової мережі необхідно робити або надзвичайно швидко (що реально мало ймовірно), або частинами (що вкрай ускладнює планування проекту), щоб не залишати транспортну ділянку без вагового контролю транспорту взагалі. Метою роботи було створення ефективної системи підтримки прийняття оптимальних проектних рішень в процесі управління проектами та програмами реконструкції вагових автошляхових комплексів, які засновані на гнучкому використанні рухомих тимчасових елементів та покликані здійснити революцію в продуктивності перевезень без одночасної руйнації доріг. На жаль, єдиний метод боротьби з цією проблемою є жорсткий контроль ваги безпосередньо на автошляхах за допомогою мережі вагових комплексів. Це означає, що така мережа повинна постійно підлаштовуватися під напрямки та завантаженість транспортних засобів, а також під поточний стан окремих ділянок дороги, для чого необхідно постійно реалізовувати послідовні проекти реконструкції вагових комплексів. Показано, що така реконструкція супроводжується великими ризиками та проблемами, які випливають із багатofакторності та малопередбачуваності процесів, які таку реконструкцію супроводжують, а отже вони потребують нових підходів, моделей та методів проектного управління. Насамперед це торкається цілеположення при плануванні проектів, структури проектної діяльності та обрання компетентних проектних організацій.

**Ключові слова:** автомобільна дорога; потік вантажів; мережа вагових комплексів; проект навантаженої реконструкції

## MODELING OF THE NETWORK TRACKED WEIGHT COMPLEXES LOADED RECONSTRUCTION PROCESSES

I. STANOVSKA<sup>1\*</sup>, M. GERGANOV<sup>2</sup>, I. HURIEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Higher Mathematics and Systems Modeling, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Information Technology, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

<sup>3</sup> Legal Support Department of the Legal Department of the Odessa Regional Council, Odessa, UKRAINE

**ABSTRACT** In the road construction, product quality has often been evaluated simplified, taking into account only the technical aspect, identifying, as a rule, the quality of materials used or completed constructional elements. At the same time, the final product is a road that is designed to carry out safe cargo and passenger transportation during its term of service. In addition, existing networks of weighing complexes simply do not have time to effectively handle cargo flows: they are often not enough for increasing traffic; in addition, their location is not optimal in terms of preferred directions of the transport movement. The reconstruction of the weighbridge must be done either extremely fast (which is really unlikely) or parts (which complicates the planning of the project) so as not to leave the transport area without weight control at all. The purpose of the work was to create an effective system of optimal design solutions support for the adoption in the management of projects and programs for the reconstruction of heavy-duty road systems, based on the flexible use of moving temporary elements and designed to revolutionize the productivity of transportation without simultaneous roads destruction. Unfortunately, the only way to combat this problem is to strictly control weight directly on the highway through a network of weighing systems. This means that such a network must constantly adapt to the directions and load of vehicles, as well as the current state of the road individual sections, which requires constant implementation of successive projects for the reconstruction of weights. It has been shown that such a reconstruction is accompanied by high risks and problems arising from the multifactority and unpredictability of the processes that accompany such a reconstruction, and therefore they require new approaches, models and methods of project management. First and foremost, it addresses the aim of the project planning, project design and selection of competent design organizations.

**Key words:** motor road; cargo flow; network of weight complexes; project of loaded reconstruction.

### Вступ

В Україні, як і в усьому цивілізованому світі, спостерігається тенденція підвищення відсотку

перевезення вантажів автомобільними шляхами. Але цьому заважає поганий стан наших доріг. За словами глави уряду України, проблему з українськими дорогами реально вирішити за три-п'ять років.

Щоправда, за трьох умов: стабільних фінансових вливань; контролю якості ремонту і будівництва доріг і, нарешті, контролю експлуатації доріг. Ключовим елементом останнього пункту є виконання вагових норм.

Адже основним фактором руйнування доріг є великовантажні автомобілі. Ми витрачаємо мільярди гривень на будівництво, але транспорт навантажують і злочинно перевантажують, руйнуючи таким чином дороги.

У дорожньому будівництві якість продукції часто оцінювали спрощено з урахуванням лише технічного аспекту ототожнюючи, як правило, з якістю матеріалів, які використовували або закінчених конструктивних елементів.

У той же час, кінцевою продукцією – є автомобільна дорога, що призначена для здійснення безпечних вантажних і пасажирських перевезень протягом строку її служби [1].

Статистика говорить, що у 2018 році "Укртрансбезпека" перевірила 458.000 транспортних засобів на предмет виконання габаритно-вагових норм. Зафіксовано 11.345 порушень, що майже на 68 % перевищує показник 2017-го року. Тобто ситуація продовжує погіршуватися.

До того ж, на жаль, існуючі мережі вагових комплексів просто не встигають ефективно обробити потоки вантажів: їх найчастіше взагалі недостатньо для зростаючих трафіків перевезень, крім того, місця їхнього розташування неоптимальні з точки зору переважних напрямків пересування відповідного транспорту.

Реконструкцію вагової мережі необхідно робити або надзвичайно швидко (що реально мало ймовірно), або частинами (що вкрай ускладнює планування проекту), щоб не залишати транспортну ділянку без вагового контролю транспорту взагалі.

Цим загрози процесів реконструкції вагових комплексів на автошляхах нагадують відповідні ризики, які очікують на спеціалістів різного профілю при виконанні надвідповідальних проектів: хірургічних операцій на людині [2] або реконструкції систем аварійного захисту АЕС [3], тощо.

В останні часи з'явилися нові, рухомі вагові комплекси, які можуть бути доставлені в будь-які місця по шляху контролю, швидко розгорнуті та готові до тимчасової заміни постійних елементів мережі, які є новими та монтуються вперше або реконструюються.

Все це потребує створення та розвитку принципово нових моделей та методів управління змістом та середовищем проектів реконструкції, які виконуються в умовах «реконструкції без відриву від виробництва».

### Мета роботи

Метою роботи було створення та впровадження ефективної системи підтримки

прийняття оптимальних проектних рішень в процесі управління проектами та програмами реконструкції вагових автошляхових комплексів, які засновані на гнучкому використанні рухомих тимчасових елементів та покликані здійснити революцію в продуктивності перевезень без одночасної руйнації доріг.

### Викладення основного матеріалу

#### 1. Постановка проблеми.

Дороги – надзвичайно дорогий вид інфраструктури: нова дорога коштує від \$ 1 млн за 1 км. Для того, щоб вона окупилася, згодом по ній потрібно перевозити вантажі протягом 10 – 12 років. Витримує дорога тільки ту вагу, на який розрахована, інакше швидко руйнується. Підприємці – перевізники часто не приймають це до уваги у своїх розрахунках, намагаючись максимізувати свій прибуток вже сьогодні. Тим самим, перевантажений автотранспорт створює надмірне навантаження на дорожнє полотно, що веде до його руйнування [4].

Як сказано вище, важливою особливістю цієї проблеми є необхідність підтримувати деякий мінімум продуктивності мережі вагових комплексів безпосередньо під час здійснення проекту реконструкції, адже результат навіть короткочасного припинення функціонування вагового контролю може призвести до тяжких наслідків з точки зору збереження якості дорожнього покриття та шляхового обладнання. З цього випливає, що проектна діяльність по реконструкції вагових комплексів може здійснюватися виключно в навантаженому або «гарячому» режимі, тобто без перекриття доріг і припинення контролю ваги транспорту (рис. 1).



Рис. 1 – Розподіл робіт при навантаженій («гарячій», без відриву від функціонування) реконструкції мережі вагових комплексів

В таких умовах різко зростає роль управління ризиками проектною діяльністю, ймовірність виникнення яких, а також вартість їхньої компенсації суттєво підвищуються [5]. При цьому іноді додатково з'являється новий вид проектних ризиків – ризики реконструкції, ймовірність настання яких у великій

мірі залежить не тільки від перебігу проектних робіт, але й від щільності трафіку і законослухняності водіїв і власників вантажу.

До умов виникнення ризиків навантаженої реконструкції можуть також відноситися аспекти середовища організації або проекту, що сприяють збільшенню ризику (наприклад, незрілі практики управління подібними проектами, відсутність загальних систем управління, одночасне виконання кількох проектів або залежність від зацікавлених сторін проекту, яких неможливо контролювати безпосередньо).

Ідентифікація ризиків навантаженої реконструкції – це ітеративний процес, оскільки в міру розвитку проекту в рамках його життєвого циклу можуть виникати або ставати відомими нові ризики. Кількісна оцінка таких ризиків змушена рахуватися не тільки з втратами від реалізації проекту реконструкції, а й з множинними «побічними» втратами від подій, які супроводжують таку реконструкцію, втратами, які вимірюються не тільки в грошах або матеріалах, але іноді навіть й в людських життях (рис. 2)!

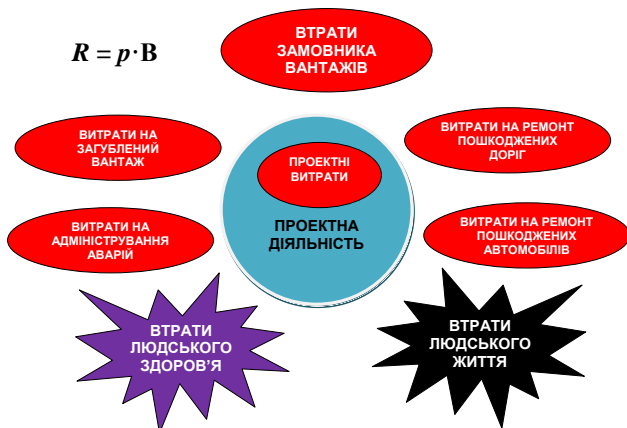


Рис. 2 – Співвідношення витрат на проектну діяльність та на компенсацію її впливу на оточуюче середовище

## 2. Місія, стратегія та результати цілеполагання в проекті навантаженої реконструкції

Планування проектної діяльності починається з візуалізації ділянки, на якій передбачається реконструкція мережі вагових комплексів [6].

Подивимося на карту ділянки, де на автомобільних дорогах розташовані існуючі елементи вагового контролю (кружки на рис. 3).

Очевидно, що продуктом проекту повинна бути нова мережа елементів контролю (зірки на рис. 3). При цьому місія проекту полягає у припиненні руйнування автомобільних доріг, яке відбувається із-за незаконного перевантаження окремих одиниць рухомого транспорту. Зі сказаного вище, а також з

місії проекту безпосередньо впливає стратегія останнього – не припиняючи рух транспорту автошляхами, виконати «гарячу» навантажену реконструкцію існуючої мережі вагових комплексів.

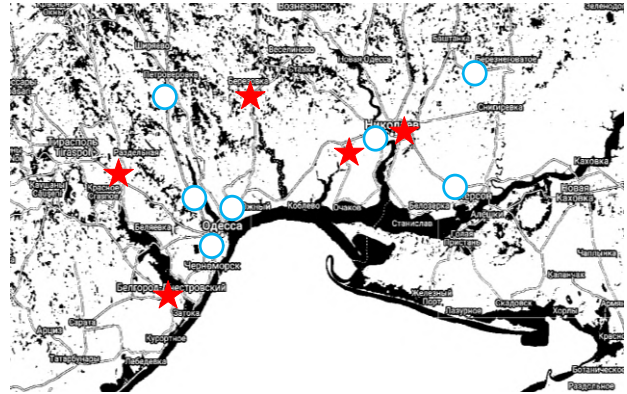


Рис. 3 – Карта ділянки місцевості із нанесеними на неї місцями розташування вагових комплексів

Відповідно, можна сформулювати і генеральну мету проекту реконструкції, а саме – максимально швидко і економічно забезпечити автодороги новими ваговими комплексами, необхідними для повного і ефективного контролю маси окремих одиниць рухомого транспорту [7].

Надалі, згідно із технологією проектної діяльності, замовник реконструкції на її початку звертається в деяку Організацію № 1 (рис. 4), яка проектує вагові комплекси і замовляє їй проект нового комплексу (далі, щоб не плутати, будемо називати його описом).

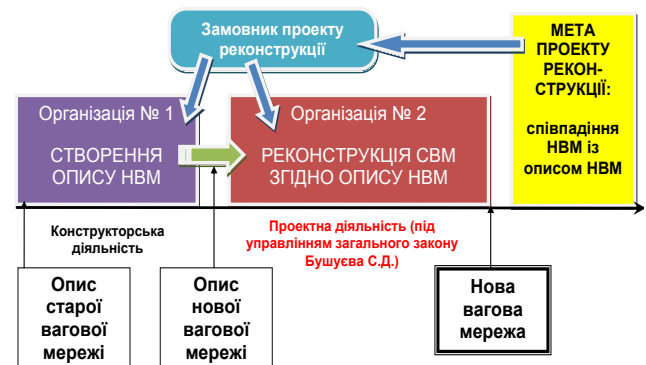


Рис. 4 – Технологія досягнення мети проектної діяльності – відтворення опису нової вагової мережі

Цей опис передається в іншу, виконуючу Організацію № 2 (рис. 4), яка і реалізує, власне, проект реконструкції.

Нова головна мета, запропонована в цій роботі, – максимально швидко і економічно виконати місію проекту – звести до мінімуму наявність перевантажених одиниць рухомого транспорту на автомобільних дорогах.

### 3. Організація проектного управління згідно загального закону Бушуєва С. Д.

Незважаючи на те, що на вході і на виході роботи Організації № 2 знаходяться лише опис і реалізація цього опису (рис. 4), її діяльність завжди буде проектною відповідно закону С. Д. Бушуєва. Назвемо цей варіант закону С. Д. Бушуєва **спеціальним** по аналогії зі спеціальною теорією відносності Ейнштейна: *два і більше подібні проекти, які управляються однією і тією ж командою менеджерів, все одно будуть зберігати унікальність через те, що турбулентне оточення, яке породжує ризики, ніколи не буде для них однаковим* [8].

На жаль, в такому випадку, мета проекту не збігається із його місією, тобто завершення місії при досягненні мети абсолютно не гарантується.

Адже обидві організації «розминають» відповідальність за плин проекту та якість продукту проекту. Організація № 1 видає опис майбутнього комплексу, абсолютно не маючи можливості довести на цьому етапі його працездатність (прокляття процесів проектування): поки об'єкт проектується, його ще нема, і повністю визначити його властивості неможливо.

Організація № 2 також не відповідає за продукт, оскільки вона «просто» реалізує опис, виданий Організацією № 1! Якщо опис реалізовано на 100 %, а місія не досягнута, то претензії нема до кого пред'являти...

Для розв'язання цієї проблеми для таких об'єктів в роботі була запропонована інша технологія проектної діяльності, в якій (при незмінній місії та стратегії проекту) змінюється його мета, яка тепер повністю співпадає із місією (рис. 5).

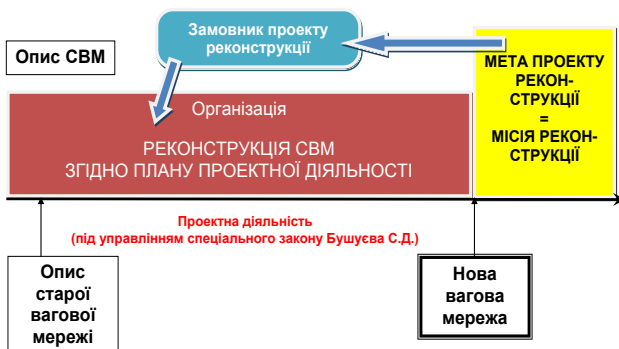


Рис. 5 – Схема нової технології проектної діяльності

Оскільки у цьому випадку мета проекту повністю співпадає з його місією, при досягненні мети, – а це є обов'язком проектної організації, одночасно і «автоматично» завершується і місія проекту!

При цьому варіанті замовник реконструкції на її початку звертається відразу в єдину виконуючу Організацію (рис. 5), яка «одноосібно» реалізує проект реконструкції. Оскільки такий проект

складніше і триваліше за проект в попередньому варіанті, а перелік і зміст ризиків в цьому випадку набагато ширше, то ступінь креативної діяльності тут значно вище.

Будемо вважати, що на це «працює» загальний закон Бушуєва: *два і більше подібні проекти, які управляються однією і тією ж командою менеджерів, будуть зберігати головну проектну особливість – високу унікальність через те, що розширене турбулентне оточення, яке додатково породжує нові ризики, а також методи і види управління всіма ризиками ніколи не будуть для них однаковими*.

Далі змінюємо структуру проектного управління [9] із переходом до нової концептуальної моделі останнього [10]. В новому варіанті Організація № 2 ніби то поглинає Організацію № 1, виконуючи обидві функції одночасно під час проекту.

Об'єднується також і відповідальність за продукт проекту в цілому. Тепер є, з кого спитати за якість продукту проекту реконструкції мережі вагових комплексів, адже досягнення мети практично співпадає із досягненням цілі.

Оскільки місія проекту реконструкції може бути сформульована по-різному, а в нашому методі управління проектом ця місія збігається з головною метою, менеджер проекту за погодженням із замовником повинен цю мету сформулювати. Мета може стосуватися змісту проекту або його вартості, – головних оцінюваних показників проекту реконструкції вагових комплексів [11].

Нами запропонована схема ітераційного процесу еволюційної оптимізації структури вагової придорожньої мережі, що є частиною управління проектом реконструкції (рис. 6).



Рис. 6 – Схема ітераційного процесу еволюційної оптимізації структури вагової мережі

Ядром цієї схеми є блок синтезу оптимальної з деякої точки зору структури мережі. Критеріями оптимізації, в залежності від обраної головної мети, є параметри вартості проекту або працездатності



продукту проекту (рис. 6).

Природно, що при високій складності проекту неможливо отримати найкращі результати за одну ітерацію оптимізації, тим більше, що вихідними даними для неї є інформація, що містить стохастичні і нечіткі елементи. Тому після кожної ітерації оптимізації її результати обов'язково використовуються для оцінки поточного стану працездатності мережі.

Така оцінка може бути проведена з використанням одного з двох видів реалізації отриманої оптимальної структури.

По-перше, вона може бути побудована за узгодженими правилами комп'ютерної моделі. Але, на жаль, при всій привабливості такої реалізації, вона містить всі атрибути «прокляття проектування», – ми не зможемо на моделі підтвердити її адекватність.

Тому в роботі був запропонований експериментальний метод оцінки працездатності, який полягає в тому, що на отриманих точках оптимального розташування елементів вагового комплексу в реальному житті розгортаються їхні мобільні варіанти. Далі комплекс випробується при реальному трафіку вантажів, тому додаткового підтвердження достовірності будь-яких комп'ютерних моделей не потрібно. Якщо отриманий таким чином результат не задовольняє вимогам до продукту проекту по працездатності, то цикл оптимізації повторюється на наступній ітерації, але вже з вихідними даними, відповідними новому поточному стану (рис. 6) [12].

#### 4. Результати практичного використання запропонованого методу.

На основі викладеного була запропонована наступна система «WECOREC» (*Weight complexes reconstruction projects*) підтримки прийняття проектних рішень в проактивному управлінні навантаженої реконструкцією вагових комплексів (рис. 7).



Рис. 7 – Структура системи «WECOREC» підтримки прийняття проектних рішень в проактивному управлінні навантаженої реконструкцією вагових комплексів

Система «WECOREC» складається з наступних учасників та підсистем.

В якості **Замовника** виступає Управління транспортно-комунікаційною інфраструктурою Одеської обласної державної адміністрації.

**Підсистема управління змістом проекту реконструкції вагових комплексів.** До її складу входять підрозділи визначення місії проекту навантаженої реконструкції мережі вагових комплексів, формулювання та підтримки генеральної мети проектної діяльності з навантаженої реконструкції мережі вагових комплексів та моделювання процесу функціонування поточної структури мережі за допомогою комп'ютерної моделі останньої або реальної мережі, складеної із постійних та пересувних вагових елементів.

**Підсистема управління вартістю проекту реконструкції вагових комплексів.** До її складу входять підрозділи управління вартістю, власне, основної частини проекту реконструкції, а також управління вартістю розширеної частини, яка додатково враховує економічні втрати від зруйнованих доріг та економічні позитивні здобутки від недопущення такої руйнації

Крім того, підсистема управління вартістю проекту реконструкції вагових комплексів містить також блок синтезу оптимальної топологічної структури мережі за критеріями її вартості та працездатності.

В Управлінні транспортно-комунікаційною інфраструктурою Одеською обласної державної адміністрації були проведені випробування створеної в Одеському національному політехнічному університеті системи «WECOREC» підтримки прийняття проектних рішень в проактивному управлінні реконструкцією вагових комплексів. Система «WECOREC», була задіяна для управління проектом реконструкції придорожніх вагових комплексів, що містять як стаціонарні, так і пересувні пункти, та дозволила, в підсумку, досягти таких результатів:

– стосовно взаємодії з турбулентним навколишнім середовищем проектної діяльності:

- підтверджена можливість ефективного використання нових проектно-орієнтованих методів і моделей для успішного проактивного управління процесом реконструкції вагових комплексів на дорогах Одеської області;

- розроблені Пропозиції щодо управління змістом та вартістю проектів реконструкції вагових комплексів з метою забезпечення повноцінного виконання обов'язків Укртрансбезпекою в Одеській області;

– стосовно продукту проекту:

- новий ваговий комплекс після реконструкції дозволив підвищити за перші три місяці 2018 року кількість перевірених транспортних засобів в 1,16 рази, при цьому виявити порушень в 1,23 рази більше, та перерахувати до Державного бюджету 1.944.000

грн у порівнянні із 1.397.500 грн за відповідні три місяці минулого року;

- загальне виявлене пошкодження дорожнього покриття в зоні роботи комплексу, яке потребує капітального ремонту, зменшилося за цей же період на 17,5 %.

### Обговорення результатів

В результаті аналізу встановлено, що у зв'язку із підвищенням трафіку вантажів автомобільними шляхами України все нагальнішою постає проблема збереження відповідних доріг, суттєва руйнація яких відбувається із-за злочинного перевищення перевізниками дозволених обмежень навантаження на вісь транспортного засобу в погоні за надприбутками.

На жаль, єдиний метод боротьби з цією проблемою є жорсткий контроль ваги безпосередньо на автошляхах за допомогою мережі вагових комплексів. Це означає, що така мережа повинна постійно підлаштовуватися під напрямки та навантаженість транспортних засобів, а також під поточний стан окремих ділянок дороги, для чого необхідно постійно реалізовувати послідовні проекти реконструкції вагових комплексів.

Показано, що така реконструкція супроводжується великими ризиками та проблемами, які впливають із багатфакторності та малопередбачуваності процесів, які таку реконструкцію супроводжують, а отже вони потребують нових підходів, моделей та методів проектного управління. Насамперед це торкається цілеполювання при плануванні проектів, структури проектної діяльності та обрання компетентних проектних організацій [13].

Дійсно, якщо мета проекту співпадає з його місією, за останню можна не тербуватися: проектна організація повинна досягти цілі, а місія буде при цьому виконана «автоматично».

Для підвищення якості проектної діяльності запропоновані додаткові заходи, насамперед, ітераційний процес проектного менеджменту, використання тимчасових пересувних вагових комплексів, термодинамічну критеріальну підтримку проектних моделей [14], тощо.

Елементи роботи використані при реконструкції вагових комплексів нба автошляхах Одеської області із позитивним техніко-економічним ефектом.

### Список літератури

1. **Мозговий, В. В.** Міцність дорожнього одягу – основа якості автомобільних доріг / **В. В. Мозговий, А. М. Онищенко, О. М. Куцман, С. А. Баран** // *Автомобільні дороги. Дорожно-будівельні матеріали. Науково-виробничий журнал.* – 2013. – № 4 (234). – С. 32 – 35.
2. **Stanovska, I.** Development of the structure and content of SCRUM-technologies of control of fast-flowing medical

- projects with critical risks / **I. Stanovska, I. Heblöv, I. Guriev and S. Koshulan** // *Technology audit and production reserves.* – 2017. – № 6/2 (38). – С. 46–53. – doi: 10.15587/2312-8372.2017.118443.
3. **Савельєва, О. С.** Управління програмою супроводження систем аварійного захисту АЕС / **О. С. Савельєва, І. І. Становська, Е. В. Бібік, К. І. Березовська** // *Восточно-европейский журнал передовых технологий. Процессы управления.* – Харьков. – 2016. – № 2/3 (80). – С. 49 - 56. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.65641.
4. Як перевантаження нищить українські дороги. URL: <http://urbanua.org/dosvid/ukrayinski-pryklady/82>.
5. **Чернов, С. К.** Учет рисков и неопределенностей в организационных проектах / **С. К. Чернов** // *Управління проектами та розвиток виробництва.* – 2006. – № 1 (17). – С. 41–44.
6. **Nesterenko, S.** Transformation of the structure of complex technical systems with partially unusable elements to the visual image / **S. Nesterenko, An. Stanovskyi, A. Toropenko, P. Shvets** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2015. – № 5/3 (77). – P. 30 - 35. – doi: 10.15587/1729-4061.2015.51186.
7. **Kolesnikova, K.** The project management of industrial buildings reengineering (reconstruction and completion) / **K. Kolesnikova, D. Monova, Ye. Naumenko, I. Kheblöv and I. Gurjev** // *Automation of technological and business processes.* 2017. – Vol. 9, Issue 1/2017. – P. 32 – 38. – doi: 10.15673/atbp.v9i1.500.
8. **Гогунский, В. Д.** Закон Бушуева – гарантия неполной трансформации серийных проектов в операционную деятельность / **В. Д. Гогунский, И. И. Становская, И. Н. Гурьев** // *Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии.* – 2013. – № 4/3 (64). – С. 41 – 44.
9. **Становський, О. Л.** Метод управління проектами за допомогою динамічних моделей / **О. Л. Становський, К. В. Колеснікова, О. Ю. Лебедєва, І. Хеблов** // *Восточно-европейский журнал передовых технологий.* – 2015. – № 6/3 (78). – С. 46 – 52. – doi: 10.15587/1729-4061.2015.55665.
10. **Колеснікова, К. В.** Концептуальна модель управління проектами / **К. В. Колеснікова, В. Д. Гогунський, А. О. Негрі, Г. С. Олех** // *Електротехнічні та комп'ютерні системи.* – 2016. – № 23 (99). – С. 175 – 179.
11. **Вайсман, В. А.** Теоретические основы выбора функции цели для проектов систем управления качеством / **В. А. Вайсман** // *Труды Одесского политехнического университета.* – 2005. – Вып. 2 (24). – С. 169 – 172.
12. **Гогунский, В. Д.** Проблемы комплексной оптимизации в управлении программой создания однотипных объектов / **В. Д. Гогунский, И. И. Становская, И. Н. Гурьев** // *Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць.* – 2013. – Вип. 1 (2). – С. 250 – 255.
13. **Бушуев, С. Д.** Основы индивидуальных компетенций для Управления Проектами, Программами и Портфелями. Том 1. Управление проектами / **С. Д. Бушуев, Д. А. Бушуев.** – К.: Саммит-Книга, 2017. – 178 с.
14. **Савельєва, О. С.** Разработка термодинамической критеріальной поддержки когнитивных моделей переноса в управлении проектами и программами / **О. С. Савельєва, И. И. Становская, А. В. Торopenko, И. Н. Щедров, Е. И. Березовская** // *Восточно-*



европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии. – 2015. – № 6/3(78). – С. 53 - 59. – doi: 10.15587/1729-4061.2015.55714.

#### References (transliterated)

1. **Mozgovij, V. V., Onishenko, A. M., Kucman, O. M., Baran, S. A.** Micnist dorozhnogo odyagu – osnova yakosti avtomobilnih dorog. *Avtomobilni dorogi. Dorozhno-budivelni materiali. Naukovo-virobnichij zhurnal*, 2013, **4** (234), 32-35.
2. **Stanovska, I., Heblov, I., Guriev, I., Koshulan, S.** Development of the structure and content of SCRUM-technologies of control of fast-flowing medical projects with critical risks. *Technology audit and production reserves.*, 2017, **6/2** (38), 46-53, doi: 10.15587/2312-8372.2017.118443.
3. **Savelyeva, O. S., Stanovska, I. I., Bibik, E. V., Berezovska, K. I.** Upravlinnya programoyu suprovodzhennya sistem avarijnogo zahistu AES. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **2/3** (8)0, 49-56, doi: 10.15587/1729-4061.2016.65641.
4. Yak perevantazhennya nishit ukrayinski dorogi. Available at: <http://urbanua.org/dosvid/ukrayinski-pryklady/82>.
5. **Chernov, S. K.** Uchet riskov i neopredelennostej v organizaciyonnyh proektah. *Upravlinnya proektami ta rozvitok virobnictva*, 2006, **1** (17), 41-44.
6. **Nesterenko, S., Stanovskiy, An., Toropenko, A., Shvets, P.** Transformation of the structure of complex technical systems with partially unusable elements to the visual image. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, **5/3** (77), 30-35, doi: 10.15587/1729-4061.2015.51186.
7. **Kolesnikova, K., Monova, D., Naumenko, Ye., Kheblov, I., Gurjev, I.** The project management of industrial buildings reengineering (reconstruction and completion). *Automation of technological and business processes*, 2017, **9**, 32-38, doi: 10.15673/atbp.v9i1.500.
8. **Gogunskij, V. D., Stanovskaya, I. I., Gurev I. N.** Zakon Bushueva – garantiya nepolnoj transformacii serijnyh proektov v operacionnuyu deyatelnost. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2013, **4/3** (64), 41-44.
9. **Stanovskij, O. L., Kolesnikova, K. V., Lyebyedyeva, O. Yu., Heblov, I.** Metod upravlinnya proektami za dopomogoyu dinamichnih modelej. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, **6/3** (78), 46-52, doi: 10.15587/1729-4061.2015.55665.
10. **Kolesnikova, K. V., Gogunskij, V. D., Negri, A. O., Oleh G. S.** Konceptualna model upravlinnya proektami. *Elektrotehnicheskie i kompyuternye sistemy*, 2016, **23** (99), 175-179.
11. **Vajsman, V. A.** Teoreticheskie osnovy vybora funkcii celi dlya proektov sistem upravleniya kachestvom. *Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta*, 2005, **2** (24), 169-172.
12. **Gogunskij, V. D., Stanovskaya, I. I., Gurev, I. N.** Problemy kompleksnoj optimizacii v upravlenii programmoj sozdaniya odnotipnyh obektov. *Informacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobnictvi: zbirnik naukovih prac*, 2013, **1** (2), 250-255.
13. **Bushuev, S. D., Bushuev, D. A.** Osnovy individualnyh kompetencij dlya Upravleniya Proektami, Programmami i Portfelyami. *Upravlenie proektami K.: Sammit-Kniga*, 2017, Tom 1, 178 s.
14. **Saveleva, O. S., Stanovskaya, I. I., Toropenko, A. V., Shedrov, I. N., Berezovskaya, E. I.** Razrabotka termodinamicheskoy kriterialnoj podderzhki kognitivnyh modelej perenosa v upravlenii proektami i programmami. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, **6/3**(78), 53-59. doi: 10.15587/1729-4061.2015.55714.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Становська Іраїда Іванівна** – кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри вищої математики та моделювання систем; м. Одеса, Україна; e-mail: stanovskairaida@gmail.com.

**Iraida Stanovska** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Docent of Mathematics and Modeling Systems Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; e-mail: stanovskairaida@gmail.com.

**Герганов Максим Леонідович** – кандидат технічних наук, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри інформаційних технологій; м. Одеса, Україна; e-mail: max.at942@gmail.com.

**Maksym Gerganov** – Candidate of Technical Sciences, Docent of Information Technology Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; e-mail: max.at942@gmail.com.

**Гур'єв Іван Миколайович** – консультант відділу правового забезпечення юридичного управління апарату Одеської обласної ради, м. Одеса, Україна; e-mail: ihuriev@odessa.gov.ua.

**Ivan Huriev** – consultant of the Legal Support Department of the Legal Department of the Odessa Regional Council, Odessa, Ukraine; e-mail: ihuriev@odessa.gov.ua.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Становська, І. І.** Моделювання процесів навантаженої реконструкції мережі придорожніх вагових комплексів / **І. І. Становська, М. Л. Герганов, І. М. Гур'єв** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 101-108. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.13.

*Please cite this article as:*

**Stanovska, I., Gerganov, M., Huriev, I.** Modeling of the network tracked weight complexes loaded reconstruction processes. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 101–108, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.13.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Становская, И. И.** Моделирование процессов нагруженной реконструкции сети придорожных весовых комплексов / **И. И. Становская, М. Л. Герганов, И. Н. Гурьев** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 101-108. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.13.

**АННОТАЦИЯ** В дорожном строительстве качество продукции часто оценивали упрощенно, с учетом только технического аспекта, отождествляя, как правило, с качеством материалов, которые использовали, или законченных конструктивных элементов. В то же время, конечной продукцией есть автомобильная дорога, предназначенная для осуществления безопасных грузовых и пассажирских перевозок в течение срока ее службы. К тому же существующие сети весовых комплексов просто не успевают эффективно обработать потоки грузов, их чаще всего вообще недостаточно для растущих трафиков перевозок, кроме того, места их расположения неоптимальные с точки зрения преобладающих направлений передвижения соответствующего транспорта. Реконструкцию весовой сети необходимо делать или очень быстро (реально мало вероятно), либо частями (что крайне затрудняет планирование проекта), чтобы не оставлять транспортную участок без весового контроля транспорта вообще. Целью работы было создание эффективной системы поддержки принятия оптимальных проектных решений в процессе управления проектами и программами реконструкции весовых автодорожных комплексов, основанных на гибком использовании подвижных временных элементов и призванных совершить революцию в производительности перевозок без одновременного разрушения дорог. К сожалению, единственный метод борьбы с этой проблемой является жесткий контроль веса непосредственно на автодорогах с помощью сети весовых комплексов. Это означает, что такая сеть должна постоянно подстраиваться под направления и загруженность транспортных средств, а также под текущее состояние отдельных участков дороги, для чего необходимо постоянно реализовывать последовательные проекты реконструкции весовых комплексов. Показано, что такая реконструкция сопровождается большими рисками и проблемами, которые вытекают из многофакторности и малопредсказуемости процессов, которые такую реконструкцию сопровождают, а следовательно, они требуют новых подходов, моделей и методов проектного управления. Прежде всего, это касается целесообразности при планировании проектов, структуры проектной деятельности и избрание компетентных проектных организаций.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога; поток грузов; сеть весовых комплексов; проект нагруженной реконструкции

*Поступила (received) 08.02.2019*

УДК 661.664.1:66.094.3.097:66.097.3

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.14

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ВЫХОД ЦИАНИСТОГО ВОДОРОДА

С. И. АВИНА\*, Г. И. ГРИНЬ

кафедра химической технологии неорганических веществ, катализа и экологии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, УКРАИНА

\*e-mail: svetlanaavina@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** Представлены основные результаты исследований по влиянию технологических параметров на образование цианистого водорода окислительным аммонолизом метана. Промышленное производство цианистого водорода является основой производства одного из важных компонентов в золотодобыче - цианида натрия. На сегодняшний день основной способ производства цианистого натрия базируется на нейтрализации синильной кислоты, полученной каталитическим синтезом метана, аммиака и кислорода воздуха на платиноидном катализаторе, раствором щелочи. Этот метод достаточно мало изучен и имеет большие перспективы для дальнейшего его совершенствования. Цель исследования заключалась в установлении оптимального соотношения компонентов начальной газовой смеси и влияние их на выход цианистого водорода, а также исследовать зависимость степени превращения цианистого водорода от температуры процесса. При окислительном аммонолизе метана с учетом неравномерности диффузии газов процесс получения цианистого водорода проводят с небольшим избытком аммиака относительно метана. Установлено, что при пониженном содержании одного из реагентов в начальной газовой смеси после реактора синтеза цианистого водорода в контактном газе присутствует значительное количество непрореагировавших компонентов смеси. Выявлено, что степень превращения реагентов в цианистый водород зависит не только от начальной концентрации, а также и от их соотношения в исходной смеси. Доказано, что максимальная степень превращения аммиака и метана достигается при соотношении компонентов аммиак/метан в реакционной смеси, равном 1-1,1. Максимальный выход цианистого водорода при окислительном аммонолизе метана составляет 7,2 %. Исследовано влияние температуры на процесс образования цианистого водорода методом Андруссова. Установлено, что повышение температуры процесса получения цианистого водорода окислительным аммонолизом метана оказывает положительный эффект на выход целевого продукта. Полученные результаты исследований можно использовать на современных азотно-туковых комбинатах для оптимизации процесса синтеза синильной кислоты.

**Ключевые слова:** цианистый водород; синильная кислота; катализатор; метан; аммиак; синтез

## STUDY OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE OUTPUT OF HYDROGEN CYANIDE

S. AVINA, G. GRYN

Department of chemical technologies of inorganic substances, catalysis and ecology, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The article presents the main results of research on the effect of technological parameters on the formation of hydrogen cyanide by the oxidative ammonolysis of methane. Industrial production of hydrogen cyanide is the basis for the production of one of the important components in gold mining - sodium cyanide. To date, the main method of production of sodium cyanide is based on the neutralization of hydrocyanic acid obtained by the catalytic synthesis of methane, ammonia and oxygen of the air on a platinum catalyst, with an alkali solution. This method has been little studied and has great prospects for its further improvement. The purpose of the study was to establish the optimal ratio of the components of the initial gas mixture and their influence on the output of hydrogen cyanide, as well as to investigate the dependence of the degree of conversion of hydrogen cyanide on the process temperature. In oxidative ammonolysis of methane, taking into account the non-uniformity of gas diffusion, the process of producing hydrogen cyanide is carried out with a small excess of ammonia relative to methane. It has been established that with a reduced content of one of the reagents in the initial gas mixture after the hydrogen cyanide synthesis reactor, a significant amount of unreacted components of the mixture is present in the contact gas. It was revealed that the degree of conversion of reagents into hydrogen cyanide depends not only on the initial concentration, but also on their ratio in the initial mixture. It is proved that the maximum degree of conversion of ammonia and methane is achieved when the ratio of components of ammonia / methane in the reaction mixture is 1-1.1. The maximum yield of hydrogen cyanide in the oxidative ammonolysis of methane is 7.2%. The effect of temperature on the formation of hydrogen cyanide by the method of Andrussov is investigated. It has been established that an increase in the temperature of the process for producing hydrogen cyanide by the oxidative ammonolysis of methane has a positive effect on the yield of the target product. The obtained research results can be used at modern nitrogen-fertilizer plants to optimize the process of synthesis of hydrocyanic acid.

**Keywords:** hydrogen cyanide; hydrocyanic acid; catalyst; methane; ammonia; synthesis

### Введение

Промышленное производство синильной кислоты является основой производства одного из

важных компонентов в золотодобыче - цианида натрия [1-5]. Анализ мирового рынка потребления цианида натрия показал, что спрос на него растет с каждым годом из-за резкого роста добычи

золота и открытия новых месторождений, а также аффинажа золотосодержащих шламов [6-9], поэтому исследования данной технологии является актуальным и своевременным.

На сегодняшний день основной способ производства цианистого натрия базируется на получении цианистого водорода (HCN), его ректификации в синильную кислоту с дальнейшей нейтрализацией раствором щелочи [10,11].

Существует несколько способов производства цианистого водорода: каталитическое окисление метана, аммиака и кислорода воздуха на платиноидном катализаторе при высокой температуре, так званый метод Андрусова [12], прямой синтез метана и аммиака на платиновом катализаторе - метод Дегусса и другие [13].

Получение цианистого водорода по методу Андрусова протекает на поверхности платинового катализатора различного состава и формы [14,15]. Основная реакция получения цианистого водорода:



сопровождается рядом побочных реакций, ведущих к потере исходного сырья и загрязнения реакционного газа. В контактном газе кроме цианистого водорода присутствуют газы, которые не прореагировали (метан, аммиак, кислород) и побочные продукты такие как: оксид углерода (II), оксид углерода (IV), пары воды и водород [16]. Вследствие протекания этих реакций увеличивается расход аммиака и метана, исходных компонентов смеси, что приводит к увеличению себестоимости синильной кислоты.

Если учитывать только основную реакцию (1), то состав исходной смеси должен быть следующим, % об.:  $\text{NH}_3$ –10,95,  $\text{CH}_4$ –10,95,  $\text{O}_2$ –16,4,  $\text{N}$ –61,7 или мольное соотношение компонентов смеси должны относиться как 1:1:1,5 [2,16]. Но на практике это соотношение не соблюдается и может колебаться в различных пределах.

Авторами работы [17] установлено, что максимальная степень превращения реагентов в цианистый водород достигается при начальном составе смеси, близком к стехиометрическому (аммиак - 10,92% об., метан - 10,92% об., остальное воздух), при этом выход цианистого водорода составляет не менее 68%.

Несмотря на то, что процесс получения цианистого водорода методом окислительного аммонолиза метана имеет более высокие показатели по сравнению с другими методами производства [18,19], он мало изучен [20] и имеет большие перспективы для дальнейшего его усовершенствования.

### Цель работы

Цель исследования заключалась в установлении оптимального соотношения компонентов исходной газовой смеси и влияние их на выход цианистого водорода.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

– установить зависимость выхода целевого продукта от соотношения компонентов в исходной газовой смеси,

– исследовать зависимость степени превращения цианистого водорода от температуры процесса,

– определить максимальный выход целевого продукта от продолжительности работы реактора.

### Изложение основного материала

Из практики работы реального производства синильной кислоты известно, что отсутствует какой-либо один технологический параметр, изменение которого определяет эффективность синтеза в целом. Это позволяет предположить, что процесс окислительного аммонолиза метана можно рассматривать как сложную систему, которая характеризуется влиянием всей совокупности технологических параметров на выход цианистого водорода.

В промышленных условиях с учетом неравномерности диффузии газов процесс получения цианистого водорода проводят с небольшим избытком аммиака относительно метана. Существенное повышение концентрации, над стехиометрически необходимым количеством реагентов, нецелесообразно, так как начинается проскок непрореагировавших компонентов, что приводит к образованию углерода на поверхности платиноидного катализатора. Кроме того, при пониженном содержании одного из реагентов в начальной газовой смеси приводит к протеканию побочных реакций, что увеличивает себестоимость целевого продукта. Таким образом, степень превращения реагентов в цианистый водород зависит не только от начальной концентрации, а также и от их соотношения.

Исследования влияния основных технологических параметров на образование цианистого водорода проводились в промышленных условиях на 8 вязаных платиноидных сетках, следующего состава, % масс.: Pt-90, Rh-10. Температура процесса окислительного аммонолиза метана составляла 900-940 °С.

Основным показателем эффективности любого процесса является степень превращения компонентов в целевой продукт. Исследование влияния отношения компонентов (метана и аммиака) реакционной смеси на степень образования цианистого водорода показано на рис. 1.

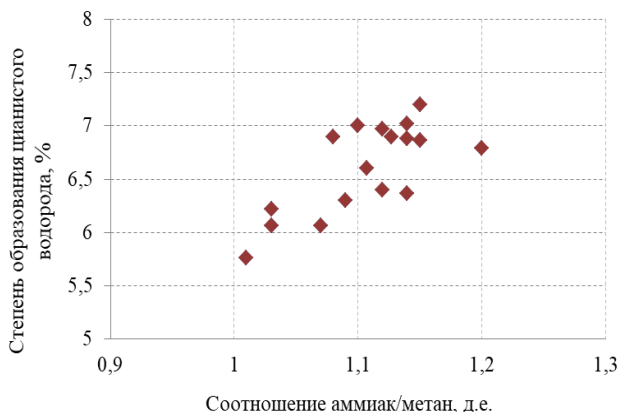


Рис. 1 – Зависимость степени образования цианистого водорода от соотношения аммиак/метан в исходной реакционной смеси

Из рис. 1 видно, что в широком интервале варьирования параметров процесса, а именно влияния соотношения аммиак/метан, просматривается четко общая тенденция, что работа на смесях с избытком аммиака положительно влияет на выход продукта.

В ходе работы исследовано влияние температуры в контактном реакторе производства синильной кислоты на степень превращения цианистого водорода. Данные представлены на рис. 2.

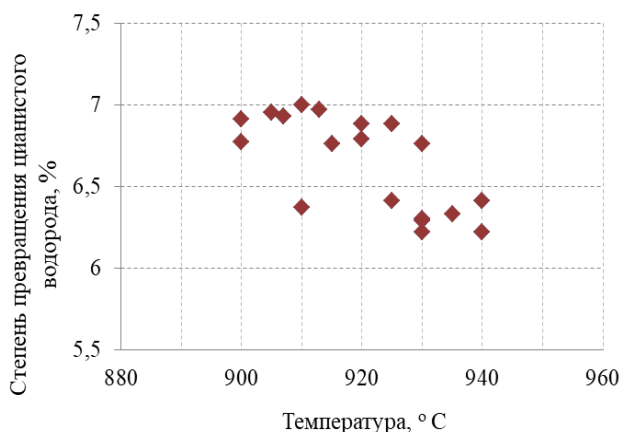


Рис. 2 – Зависимость степени превращения цианистого водорода от температуры процесса

Анализ данных показал, что повышение температуры процесса окислительного аммонолиза метана положительно сказывается на образовании цианистого водорода.

Проанализировано промышленные данные работы контактного реактора производства синильной кислоты, которые представлены на рис. 3.

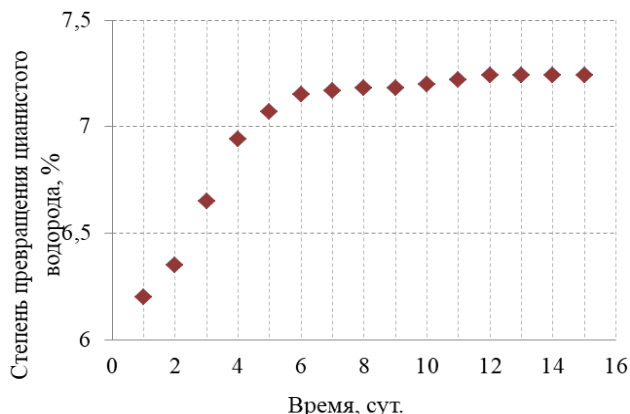


Рис. 3 – Зависимость степени превращения цианистого водорода от времени

Анализ графических данных показал, что максимальная степень превращения цианистого водорода составляет 7,2 % и приходится на 12 сутки работы промышленного реактора.

### Обсуждение результатов

Основные технологические показатели в значительной степени влияют на себестоимость синильной кислоты, поэтому меры по их оптимизации являются важной технологической задачей.

Исследование влияния соотношения компонентов реакционной смеси (метан, аммиак, воздух) на степень образования цианистого водорода показано на рис. 1. Анализ данных позволил не только выявить тенденцию влияния соотношения начальных реагентов, а также установить максимальный выход продукта. Выявлено, что в широком интервале технологических параметров увеличение соотношения аммиак/метан в интервале 1-1,2 приводит к повышению степени образования цианистого водорода до 7-7,2%.

Отметим, что небольшой избыток аммиака практически не сказывается на выходе цианистого водорода, но при этом существенно расширяются взрывобезопасные зоны проведения процесса окислительного аммонолиза метана (действие аммиака превосходит соответствующее влияние азота, способствующего образованию невзрывчатых и невоспламеняющихся метан-аммиак-воздушных смесей).

Результаты исследования влияния температуры процесса окислительного аммонолиза метана на степень образования цианистого водорода (рис. 2) показывают, что при температуре процесса 900-920 °C, степень превращения цианистого водорода составляет порядка 7%, а при увеличении температуры

степень образования цианистого водорода немного снижается и составляет 6,3-6,5%. По нашему мнению это может быть связано с процессом разложения полученного цианистого водорода сразу после каталитического пакета в зоне реакции, что и приводит к снижению выхода цианистого водорода.

Анализ промышленных данных работы цеха синильной кислоты, показал, что со времени пуска контактного реактора уже на 4 сутки степень превращения цианистого водорода составляет приблизительно 7%, а максимальная степень достигается на 10 сутки работы оборудования и становится стабильной.

### Выводы

Проведенные исследования влияния содержания соотношения реагентов в исходной газовой смеси на выходе цианистого водорода показали, что соотношение компонентов аммиак/метан должно быть 1,1 при этом выход целевого продукта цианистого водорода может составлять 7,2%. Установлено, что в промышленных условиях необходимо проводить процесс получения цианистого водорода с небольшим избытком одного из компонентов, а именно аммиака. Процесс получения цианистого водорода проводится с избытком аммиака относительно метана на 10 %.

Выявлено, что оптимальная температура процесса окислительного аммонолиза метана составляет 920 °С при соотношении аммиак/метан в исходной реакционной смеси 1,1.

### Список литературы

1. **Laitos, Jan G.** Cyanide, Mining, and the Environment / **Jan G. Laitos** // *Pace Envtl. L. Rev.* – 2013. – P. 869-949.
2. Технологія зв'язаного азоту: підручник / **Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, О. Я. ЛОБОЙКО, Г. І. ГРИНЬ** та ін. – Харків : НТУ «ХПІ», 2007. – 536 с.
3. **Hilson, G.** Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future / **G. Hilson, A.J. Monhemius** // *Journal of cleaner production.* – 2006. – 14. – I. 12-13. – P. 1158-1167. – doi:10.1016/j.jclepro.2004.09.005.
4. **Позин, М. Е.** Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот) / **М. Е. Позин.** – Ленинград : Химия, 1974. – 768 с.
5. **Авина, С. И.** Пути повышения качества цианистого натрия / **С. И. Авина** // *Збірник тез доповідей I Міжнародної (XI Української) наукової конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Хімічні проблеми сьогодення (ХПС-2018)».* – Вінниця, 2018. – С. 232.
6. **Deschênes, G.** Gold Ore Processing (Second Edition). Project Development and Operation, 2016. – P. 429-445. – doi:10.1016/B978-0-444-63658-4.00026-8.
7. **Asamoaha, R. K.** Alkaline cyanide leaching of refractory gold flotation concentrates and bio-oxidised products: The effect of process variables / **R. K. Asamoaha, W. Skinnera, J. Addai-Mensah** // *Hydrometallurgy.* – 2018. – 179. – P. 79-93. – doi:10.1016/j.hydromet.2018.05.010.
8. **La Torre, E.** Improvements to the cyanidation process for precious metal recovery from WPCBs. / **E. La Torre, S. Gámez, E. Pazmiño** // *Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling.* – 2018. – P. 115-137. –doi:10.1016/B978-0-08-102057-9.00005-6.
9. **Olyaei, Y.** Mercury, and Silver Extraction by Chemical and Physical Separation Methods. / **Y. Olyaei, S. Aghazadeh, M. Gharabaghi, H. Mamghaderi, J. Mansouri** // *Rare Metal Materials and Engineering.* – 2016. – 45. – I. 11. – P. 2784-2789. – doi:10.1016/S1875-5372(17)30040-1.
10. **Бобков, С. С.** Синильная кислота / **С. С. Бобков, С. К. Смирнов.** – Москва : Химия, 1970. – 176 с.
11. **Авина, С. И.** Определение характера и распределения потерь металлов платиновой группы по технологической линии производства азотной и синильной кислот / **С. И. Авина, Г.И. Гринь** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 148-152. – doi:10.20998/2413-4295.2018.12.01.
12. **Bodke, A. S.** Hydrogen addition to the Andrussow process for HCN synthesis / **A. S. Bodke, D. A. Olschki., L. D. Schmidt** // *Applied Catalysis A: General.* – 2000. – 201. – P. 13–22. – doi:10.1016 / S0926-860X (00) 00419-1.
13. **Hasenberg, D.** HCN synthesis from CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, and O<sub>2</sub> on clean Pt / **D. Hasenberg, L. D Schmidt.** // *J. of catalysis.* – 1987. – 104. – P.441-453.
14. **Rdzawski, Z. M.** Microstructure and properties of the new Pt–Rh based alloys for high-temperature applications / **Z. M. Rdzawski, J. P. Stobrawa** // *J. of Materials Processing Technology.* – 2004. – 153-154. – P. 681-687. –doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.130.
15. **Dong, H.** Recovery of platinum group metals from spent catalysts: A review / **H. Dong, J. Zhao, J. Chen, Y. Wu, B. Li** // *International Journal of Mineral Processing.* – 2015. – 145. – P. 108-113. – doi:10.1016/j.minpro.2015.06.009.
16. **Авина, С. И.** Дослідження впливу складу вихідної газової суміші на утворення цианістого водню / **С. І. Авина, Г. І. Гринь, Т. В. Школьнікова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 39 (1315). – С. 27-30. – doi:10.20998/2079-0821.2018.39.05.
17. **Гринь, Г. И.** Влияние состава исходной газовой смеси и нагрузки по ней на выход цианистого водорода образующегося при окислительном аммонолизе метана / **Г. И. Гринь, Н. В. Трусов** // *Журнал прикладной химии.* – 1992. – Т. 65. – №10. – С. 2300–2305.
18. Пат. 2496717 Российская Федерация. Способ получения синильной кислоты / Белинг Р. Заявка № 2010123683/05, заявл. 20.12.2011; опубл. 27.10.2013, Бюл. № 30.



19. **Moehmel, S.** New catalytic materials for the high-temperature synthesis of hydrocyanic acid from methane and ammonia by high-throughput approach / **S. Moehmel, N. Steinfeldt, S. Engelschalt, M. Holena, S. Kolf, M. Baerns, U. Dingerdissen, D. Wolf, R. Weber, M. Bewersdorf** // *Applied Catalysis A: General*. – 2008. – 334(1-2). – P. 73–83. – doi:10.1016/j.apcata.2007.09.035.
20. **Gómez-Díaz, J.** Mechanistic Switch between Oxidative (Andrussow) and Nonoxidative (Degussa) Formation of HCN on Pt(111) by Density Functional Theory / **J. Gómez-Díaz, L. Núria** // *J. Phys. Chem. C*. – 2011. – 115 (13). – P. 5667–5674. – doi: 10.1021/jp1093349.
10. **Bobkov, S. S. Smirnov, S. K.** Sinilnaya kislota. Moskva: Himiya, 1970, 176.
11. **Avina, S., Gryn, G.** Determination of the disposition and distribution of losses of platinum group metals on the technological line of production of nitric and hydrocyanic acids. Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **45** (1321), 148–152, doi:10.20998/2413-4295.2018.45.20.
12. **Bodke, A. S., Olschki, D. A., Schmidt, L. D.** Hydrogen addition to the Andrussow process for HCN synthesis. *Applied Catalysis A: General*, 2000, **201**, 13–22, doi:10.1016/S0926-860X(00)00419-1.
13. **Hasenberg, D., Schmidt, L. D.** HCN synthesis from CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, and O<sub>2</sub> on clean Pt. *J. of catalysis*, 1987, **104**, 441-453.
14. **Rdzawski, Z. M., Stobrawa, J. P.** Microstructure and properties of the new Pt–Rh based alloys for high-temperature applications. *J. of Materials Processing Technology*, 2004, **153-154**, 681-687, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.130.
15. **Dong, H., Zhao, J., Chen, J., Wu, Y., Li, B.** Recovery of platinum group metals from spent catalysts: A review. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, **145**, 108-113, doi:10.1016/j.minpro.2015.06.009.
16. **Avina, S. I. Gryn, G. I., Shkolnikova, T. V.** Doslidzhennya vplivu skladu vihidnoyi gazovoyi sumishi na utvorenniya tsianistogo vodnyu. *Visnik NTU «HPI»*, Seriya: *Himiya, himichna tehnologiya ta ekologiya*, 2018, **39**(1315), 27-30, doi:10.20998/2079-0821.2018.39.05.
17. **Gryn, G. I., Trusov, H. V.** Vliyanie sostava ishodnoy gazovoy smesi i nagruzki po ney na vyihod tsianistogo vodoroda obrazuyuschegosya pri oksilitelnom ammonolize metana. *Zhurnal prikladnoy himii*, 1992, **65**(10), 2300–2305.
18. Pat. 2496717 Rossiyskaya Federatsiya. Sposob polucheniya sinilnoy kislotyi / **Beling R.** Zayavka № 2010123683/05, zayavl. 20.12.2011; opubl. 27.10.2013, Byul. № 30.

#### References (transliterated)

1. **Laitos, Jan G.** Cyanide, Mining, and the Environment, *Pace Env'tl. L. Rev.*, 2013, 869-949.
2. **Tovazhnyanskiy, L. L., Loboyko, O. Ya, Grin, G. I. ta in.** Tehnologiya zvyazanogo azotu. Harkiv: NTU «HPI», 2007, 536.
3. **Hilson, G., Monhemius, A.J.** Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future. *Journal of cleaner production*, 2006, **14** (12-13), 1158-1167, doi:10.1016/j.jclepro. 2004.09.005.
4. **Pozin, M. E.** Tehnologiya mineralnyih soley (udobreniy, pestitsidov, promyishlennyih soley, okislov i kislot). Leningrad: Himiya, 1974, 768.
5. **Avina, S. I.** Puti povyisheniya kachestva tsianistogo natriya. *Zbirnik tez dopovidey I Mizhnarodnoyi naukovoyi konferentsiyi studentiv, asprantiv i molodih uchenih «Himichni problemi sгодennya (HPS-2018)»*, Vinnitsya, 2018, 232.
6. **Deschênes, G.** Gold Ore Processing (Second Edition). Project Development and Operation, 2016, 429-445, doi:10.1016/B978-0-444-63658-4.00026-8.
7. **Asamoaha, R. K., Skinnera, W., Addai-Mensah, J.** Alkaline cyanide leaching of refractory gold flotation concentrates and bio-oxidised products: The effect of process variables. *Hydrometallurgy*, 2018, **179**, 79-93, doi:10.1016/j.hydromet.2018.05.010.
8. **La Torre, E., Gámez, S., Pazmiño, E.** Improvements to the cyanidation process for precious metal recovery from WPCBs. *Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling*, 2018, 115-137, doi:10.1016/B978-0-08-102057-9.00005-6.
9. **Olyaei, Y., Aghazadeh, S., Gharabaghi, M., Mamghaderi, H., Mansouri, J.** Gold, Mercury, and Silver Extraction by Chemical and Physical Separation Methods. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, **45**(11), 2784-2789, doi:10.1016/S1875-5372(17)30040-1.
20. **Gómez-Díaz, J., Núria, L.** Mechanistic Switch between Oxidative (Andrussow) and Nonoxidative (Degussa) Formation of HCN on Pt(111) by Density Functional Theory. *J. Phys. Chem. C*, 2011, **115** (13), 5667–5674, doi: 10.1021/jp1093349.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Авина Светлана Ивановна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры химической технологии неорганических веществ, катализа и экологии; г. Харьков, Украина; e-mail: svetlanaavina@gmail.com.

**Svetlana Avina** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Lecturer, Department of chemical technology of inorganic substances, catalysis and ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: svetlanaavina@gmail.com.

**Гринь Григорій Іванович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри хімічної технології неорганічних речовин, катализа і екології; г. Харків, Україна; e-mail: gryn@kpi.khakov.ua.

**Gregorii Gryn** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of chemical technology of inorganic substances, catalysis and ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: gryn@kpi.khakov.ua.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Авина, С. И.** Исследование влияния технологических параметров на выход цианистого водорода / **С. И. Авина, Г. И. Гринь** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 109-114. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.14.

*Please cite this article as:*

**Avina, S., Gryn, G.** Study of the influence of technological parameters on the output of hydrogen cyanide. *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: New solutions in modern technologies. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), 109-114, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.14.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Авіна, С. І.** Дослідження впливу технологічних параметрів на вихід ціаністого водню / **С. І. Авіна, Г. І. Гринь** // *Вісник НТУ «ХПИ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 109-114. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.14.

**АНОТАЦІЯ** Представлені основні результати досліджень щодо впливу технологічних параметрів на утворення ціаністого водню окислювальним аммонолізом метану. Промислове виробництво ціаністого водню є основою отримання одного з важливих компонентів видобутку золота - ціаніду натрію. На сьогоднішній день основний спосіб виробництва ціаністого натрію базується на нейтралізації синильної кислоти, отриманої каталітичним синтезом метану, аміаку і кисню повітря на платиновідному каталізаторі, розчином луку. Цей метод досить мало вивчений і має великі перспективи для подальшого його вдосконалення. Мета дослідження полягала у встановленні оптимального співвідношення компонентів початкової газової суміші і вплив їх на вихід ціаністого водню, а також у дослідженні залежності ступеня утворення ціаністого водню від температури процесу. При окислювальному аммонолізі метану з урахуванням нерівномірності дифузії газів процес отримання ціаністого водню проводять з невеликим надлишком аміаку щодо метану. Встановлено, що при пониженому вмісті одного із реагентів у початковій газовій суміші після реактора синтезу ціаністого водню в контактному газі присутня значна кількість компонентів суміші, що не прореагували. Виявлено, що ступінь перетворення реагентів у ціаністий водень залежить не тільки від початкової концентрації, а також і від її співвідношення у вихідній суміші. Доведено, що максимальна ступінь перетворення аміаку і метану досягається при співвідношенні компонентів аміак/метан в реакційній суміші, що дорівнює 1-1,1. Максимальний вихід ціаністого водню при окислювальному аммонолізі метану становить 7,2%. Досліджено вплив температури на процес утворення ціаністого водню методом Андрусова. Встановлено, що підвищення температури процесу отримання ціаністого водню окислювальним аммонолізом метану надає позитивний ефект на вихід цільового продукту. Отримані результати досліджень можна використовувати на сучасних азотно-тукових комбінатах для оптимізації процесу синтезу синильної кислоти.

**Ключові слова:** ціаністий водень; синильна кислота; каталізатор; метан; аміак; синтез

Поступила (received) 25.02.2019

УДК 621.793:621.357.7

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.15

## ТЕХНОЛОГІЇ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ СИЛОВИХ УСТАНОВОК АВТОМОБІЛЬНОЇ ТА БРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ

Г. В. КАРАКУРКЧИ<sup>1\*</sup>, М. Д. САХНЕНКО<sup>1</sup>, М. В. ВЕДЬ<sup>2</sup>, Р. О. КАЙДАЛОВ<sup>3</sup>,  
О. М. ШАПОВАЛ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> кафедра фізичної хімії, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра загальної та неорганічної хімії, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

<sup>3</sup> кафедра бойового та логістичного забезпечення, Національна академія Національної гвардії України, Харків, УКРАЇНА

\*e-mail: anyutikukr@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Проведено огляд існуючих підходів використання методів інженерії поверхні деталей поршневої групи двигунів внутрішнього згоряння. Показано, що застосування процесів спрямованого модифікування поверхні дозволяє розширити функціональні властивості оброблюваного матеріалу, зокрема підвищити показники міцності, зносостійкості, корозійної тривкості. Як ефективний метод інженерії поверхні запропоновано використання плазово-електролітичного оксидування в лужних електролітах. Особливості обробки матеріалу у високоенергетичних режимах під дією короткоживучих електричних розрядів полягають у формуванні наноструктурованих оксидних композиційних покриттів під час електрохімічних та термохімічних реакцій. Завдяки особливостям перебігу плазово-електролітична обробка може розглядатися як комбінований метод інженерії поверхні за рахунок поєднання в одному процесі модифікування поверхневого шару оброблюваного матеріалу та формування покриття з інкорпорацією компонентів електроліту та продуктів термохімічного перетворення. Запропоновано спосіб поверхневої обробки поршневого силуміну АК12М2МgN у лужних розчинів електролітів, що містять солі мангану та кобальту, можливо одержувати рівномірні щільні міцноадгезовані з основним металом керамікоподібні покриття, доповані каталітичними компонентами, вміст яких варіюється в межах 25–35 ат.%. Показано, що морфологія та фазова структура поверхневих шарів змінюється із інкорпорацією металів-допантів. Сформовані покриття мають високий ступінь розвинення поверхні, що є передумовою високих функціональних властивостей сформованих керамікоподібних покриттів. Запропонований підхід використано для модифікування поверхні поршня КамАЗ-740. Встановлено, що використання керамікоподібних покриттів поршня двигуна приводить до зниження годинної витрати палива та кількості токсичних речовин з відпрацьованими газами, що робить їх перспективними для використання у внутрішньоциліндровому каталізі.

**Ключові слова:** інженерія поверхні; поверхнева обробка; плазово-електролітичне оксидування; поршневий сплав; силумін

## SURFACE ENGINEERING TECHNOLOGIES OF POWER PLANT ITEMS OF THE AUTOMOTIVE AND ARMORED VEHICLES

A. KARAKURKCHI<sup>1\*</sup>, M. SAKHNENKO<sup>1</sup>, M. VED<sup>2</sup>, R. KAI DALOV<sup>3</sup>, O. SHAPOVAL<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Physical Chemistry National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of General and Inorganic Chemistry National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

<sup>3</sup> Department of Combat and Logistic Support, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** A review of the existing approaches to the use of surface engineering methods for parts of a piston group of internal combustion engines was made. It is shown that the use of processes of directional surface modification allows you to expand the functional properties of the material being processed, in particular, to increase the indicators of strength, wear and corrosion resistance. As an effective method of surface engineering, the use of plasma-electrolytic oxidation in alkaline electrolytes has been proposed. The features of material processing in high-energy modes under the action of short-lived electrical discharges consist in the formation of nanostructured oxide composite coatings during electrochemical and thermochemical reactions. Due to its features, plasma-electrolytic treatment can be considered as a combined method of surface engineering by combining the surface layer of the material being processed in one process and forming coatings with the incorporation of electrolyte components and thermochemical conversion products. A method of treating piston silumin AK12M2MgN in alkaline electrolytes by the method of plasma-electrolytic oxidation is proposed. It is shown that in the galvanostatic mode from alkaline electrolyte solutions containing manganese and cobalt salts, it is possible to obtain uniform dense ceramic adhesives with high base metal adhesion, doped with catalytic components, the content of which varies from 25-35 at.%. It is shown that the morphology and phase structure of the surface layers changes upon incorporation of dopant metals. Formed coatings have a high degree of surface development, which is a prerequisite for enhanced functional properties of ceramic-like coatings. The proposed approach is used to modify the surface of the KamAZ-740 piston. It has been established that the use of ceramic-like coatings of an engine piston leads to a decrease in hourly fuel consumption and the amount of toxic substances with exhaust gases, which makes them promising for use in intra-cylinder catalysis.

**Keywords:** surface engineering; surface treatment; plasma electrolytic oxidation; piston alloy; silumin

### Вступ

Сучасний розвиток машинобудування зумовлює пошук підходів щодо зменшення

масогабаритних характеристик деталей та конструкцій при одночасному підвищенні їх експлуатаційних властивостей. В той же час висока якість та експлуатаційна надійність машин

досягається використанням нових наукоємних технологій та науково-технічних напрямів. Зокрема інженерія поверхні (*surface engineering*) об'єднує методи спрямованих змін фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів конструкційних матеріалів шляхом модифікування, деформування, нанесення захисних шарів, плівок та покриттів різними способами. Це дозволяє формувати поверхневі шари із заданими властивостями безпосередньо на оброблюваному матеріалі та отримувати характеристики, що суттєво переважають показники основного металу [1].

Суттєвий інтерес до поверхневої модифікації обумовлений саме тим, що характеристики поверхневих шарів у поєднанні із властивостями основного металу визначають рівень властивостей виробів в цілому. Такий підхід є безумовно привабливим і з економічної точки зору в порівнянні із відомими способами змін об'ємних характеристик конструкційних матеріалів та готових виробів.

Таким чином, комплексне використання досягнень певних фундаментальних наук забезпечує створення і практичне використання як в основному, так і в ремонтному виробництві нових високоефективних ресурсощадних технологій керування функціональними властивостями деталей машин за рахунок спрямованого формування поверхневих шарів та управління їх властивостями.

З використанням методів інженерії поверхні на даний час вирішуються питання протикорозійного захисту, підвищення зносостійкості, покращення якості деталей машин, особливо під час експлуатації в екстремальних умовах, мінімізації забруднення навколишнього середовища, а також багато інших проблем.

Технологічні методи інженерії поверхні можна розподілити на наступні групи, а саме: методи модифікування (зміна фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів основного матеріалу); нанесення плівок, покриттів та захисних шарів; комбіновані, що поєднують методи модифікування та нанесення покриттів; управління мікротопографією поверхонь.

Останнім часом в інженерії поверхні все найчастіше використовуються методи плазмової обробки, зокрема в електролітах. Електрохімічна обробка поверхні матеріалу у високоенергетичних режимах отримала назву плазмово-електролітичного оксидування (ПЕО), яке ще має назву анодно-іскрового або мікродугового [2].

Під дією короткоживучих електричних розрядів у водних розчинах електролітів при високій напрузі реалізуються електрохімічні та термохімічні реакції, що призводить до формування наноструктурованих оксидних композиційних покриттів, які за багатьма показниками перевершують покриття, сформовані в інший спосіб [2,3]. Модифікована поверхня складається із оксидної матриці основного металу, в яку інкорпоровані компоненти та переплави робочого розчину.

Даному способу поверхневої модифікації притаманні такі переваги, як простота технологічного обладнання, нетоксичність робочих електролітів, відсутність (необов'язковість) етапу попередньої підготовки поверхні деталі, можливість ефективної обробки великогабаритних та складно-профільованих виробів. Перераховані особливості характеризують процес ПЕО-обробки як економічний, екологічний та ресурсощадний.

З урахуванням викладених особливостей, ПЕО-обробка може розглядатися як комбінований метод інженерії поверхні, тому що в одному процесі поєднується модифікування поверхневого шару оброблюваного матеріалу та формування покриття з інкорпорацією компонентів електроліту та продуктів термохімічного перетворення.

На даний час технологія ПЕО достатньо повно опрацьована для групи вентильних металів (алюміній, титан, магній), про що свідчить значна кількість робіт з результатами досліджень іноземних та вітчизняних вчених. Сформовані ПЕО-покриття володіють високими показниками міцності, термічної та зносостійкості, корозійної тривкості, виявляють каталітичні властивості по знешкодженню токсичних компонентів у газовій та рідкій фазах [4].

Отримані результати дозволяють використати переваги ПЕО для підвищення експлуатаційних та ресурсних характеристик деталей автомобільної та бронетанкової техніки, зокрема поршневої групи двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ).

ДВЗ є силовим агрегатом більшості зразків озброєння та військової техніки. Конструкційні матеріали, що використовуються для виготовлення комплектуючих двигунів, повинні мати високу теплопровідність та міцність, зносо- та корозійну стійкість, а також низьку щільність. Найбільш повно зазначеним вимогам відповідають ливарні сплави алюмінію на основі систем Al-Si, Al-Mg, Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg, Al-Cu-Mg-Ni [5]. Оптимальне поєднання масогабаритних показників та експлуатаційних властивостей притаманно системі Al-Si. Матеріали на її основі, носять назву силумінів та найчастіше використовуються для виготовлення деталей поршневої групи силових агрегатів [6].

Слід зазначити, що в процесі експлуатації двигуна поршні піддаються впливу високих температур і тиску газів під час згоряння палива. Тому найбільш розповсюдженою причиною виходу з ладу поршня є дефекти (прогорання) його денця.

Виходячи з цього, актуальним є пошук економічно та технологічно доступних методів інженерії поверхні деталей поршневої групи ДВЗ з метою підвищення їх експлуатаційних властивостей.

#### Мета та задачі роботи

Запропонувати спосіб ПЕО-обробки деталей поршневої групи силових установок автомобільної та бронетанкової техніки із формуванням керамікоподібних покриттів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

провести огляд існуючих підходів використання методів інженерії поверхні деталей поршневої групи ДВЗ;

опрацювати спосіб обробки силумінів методом плазмово-електролітичного оксидування з формуванням кермакоподібних покриттів, допованих додатковими компонентами;

дослідити властивості сформованих оксидних систем.

### Матеріали і методи

Керамікоподібні покриття формували на зразках поршневого сплаву АК12М2МгН (АЛ25) та серійному поршні КамАЗ-740 методом ПЕО в гальваностатичному режимі. Для нанесення кобальто- та мангановмісних покриттів використовували лужні розчини електролітів. Склад робочих розчинів та режими формування наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Склад електролітів та режими формування покриттів на поршневому сплаві АК12М2МгН (АЛ25)

№ розчину	Склад, моль/дм <sup>3</sup>	Густина струму, А/дм <sup>2</sup>	Напруга ПЕО, В
1	KMnO <sub>4</sub> – 0.05	10...20	160...180
	NaOH – 0.005		
2	CoSO <sub>4</sub> – 0.1	3...5	200...240
	K <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> – 0.4		

Для формування покриттів використовували лабораторну установку, яка включала джерело постійного струму Б5-50, електрохімічну комірку з примусовим охолодженням та перемішуванням електроліту, робочі електроди. Температура розчину підтримувалась в інтервалі 20–25°C. Час формування покриттів – 30 хв.

ПЕО-обробку поршня проводили з використанням модифікованої установки підвищеної потужності для забезпечення реалізації технологічних параметрів процесу (рис. 1).



Рис. 1 – Установка для ПЕО-обробки поршня ДВЗ

Морфологію поверхні сформованих покриттів досліджували з використанням сканівного електронного мікроскопа (СЕМ) ZEISS EVO 40XVP (Німеччина). Топографію поверхневих шарів вивчали методом атомно-силової мікроскопії на мікроскопі НТ-206, зонд CSC-37. Хімічний склад покриттів визначали з використанням енерго-дисперсійного спектрометра Oxford INCA Energy 350 (Великобританія) з інтегрованим програмним середовищем SmartSEM.

Рентгенофазовий аналіз проводили на рентгеновському дифрактометрі ДРОН-2 в монохроматизованому Со-К $\alpha$  випромінні ( $\lambda = 1,7902\text{Å}$ ). Визначення фаз проводили шляхом порівняння міжплощинних відстаней та відносних інтенсивностей експериментальної кривої з даними електронної картотеки PCPDFWIN.

Каталітичну активність керамікоподібних покриттів тестували під час стендових випробувань в процесі згоряння і каталітичного перетворення токсичних речовин в циліндрі двигуна внутрішнього згоряння.

### Виклад основного матеріалу

Дослідження процесів спрямованого модифікування поверхні деталей поршневої групи двигунів є актуальною практичною задачею. Відомі різні технології, що використовуються автовиробниками для зміцнення поверхонь деталей із ливарних сплавів алюмінію. Проте кожне таке технічне рішення не є універсальним та має певні обмеження.

У силових установках зразків автомобільної та бронетанкової техніки, що експлуатуються Збройними Силами України та іншими військовими формуваннями, також використовуються додаткові способи обробки деталей поршневої групи. Наприклад, алюмінієві поршні танкових двигунів 5 ТДФ та 6 ТД мають накладки зі сталі з термодифузійним хромуванням з метою підвищення міцності, поршні бензинових двигунів ЗМЗ-4905 та ЗИЛ-131 додатково вкриті шаром олова для підвищення зносостійкості, а поршень дизельного двигуна УТД-20 (5Д20) має одержаний анодуванням оксидний покриття для підвищення показників міцності та термічної стійкості [7].

У 50-ті роки ХХ століття фірмою Mahle (Німеччина) застосовувалось покриття поршнів із алюмінію твердим хромом. Для підвищення адгезії на етапі попередньої обробки наносили м'яке гальванічне залізо, після чого формували безпосередньо шар електролітичного хрому. Покриття отримав комерційну назву Chromal. Основним недоліком цього покриття була можливість розшарування в умовах експлуатації. Наступним комерційним продуктом, що використовувався у двигунах BMW, Ferrari, Citroen, Porsche та VW Group, став металокерамічний покриття Nikasil, розроблений

Mahle у 60-70-ті роки ХХ століття. Покрив “нікель-карбід кремнію” (Ni-SiC) формували гальванічним методом з осадженням шару металевого нікелю із наступним насиченням сформованої матриці карбідом кремнію. Сформовані покриття володіють високими показниками міцності та маслоємності, проте через складний та екологічно небезпечний процес одержання дана технологія не стала масовою.

Наступне покоління покриттів поршневої групи базується на насиченні поверхневих шарів ливарних алюмінієвих сплавів кремнієм. При цьому для виготовлення комплектуючих використовують силуміни із різним вмістом силіцію, піддаючи їх обробці різними способами (хімічне та лазерне травлення, електрохімічна обробка). В результаті на поверхні оброблюваної деталі формується керамічний покриття із підвищеною теплостійкістю, міцністю, зносостійкістю та корозійною тривкістю. Прикладами покриттів цього типу є Lokasil та Alusil (Kolbenschmidt), Silumal (Mahle) або їх варіації. Указані технології використовуються провідними компаніями-виробниками автомобілів, зокрема Mercedes-Benz, Honda, Porsche, Rolls-Royce Group, General Electric, BMW, Volvo, Jaguar. В той же час у відкритих джерелах відсутня інформація щодо складу та технології одержання даних покриттів через комерційну таємницю. Це свідчить про актуальність та перспективність досліджень щодо формування керамікоподібних покриттів на поршневих сплавах.

Як зазначалося вище, нами запропоновано використання технології плазово-електролітичного оксидування для формування функціональних покриттів на поршнях ДВЗ. Можливість реалізації ПЕО-обробки на прикладі деталей поршневої групи двигунів наведено у дослідженнях [8–13]. У роботі [8] надано результати досліджень щодо використання технології ПЕО для зміцнення робочих поверхонь блоку циліндрів ДВЗ. Показано технологічну можливість реалізації ПЕО великогабаритних відливків силумінів з одержанням якісного оксидного шару. Авторами [9] досліджено можливість та перспективи використання технології ПЕО для ремонту та відновлення геометрії робочих поверхонь деталей двигунів із силумінів. В роботі [10] наведено результати експериментальних досліджень щодо зміцнення поверхні поршня ASP80 зі сплавом АК12 методом ПЕО у лужно-силікатному електроліті. Під час стендових випробувань встановлено, що інтенсивність зношування поршня з нанесеним покриттям зменшується у 2.5 рази. В роботах [11,12] експериментально підтверджено підвищення ефективності та економічності ДВЗ при використанні поршнів із теплоізоляційним покриттям оксиду алюмінію, який одержують гальваноплазовою обробкою штатних поршнів двигунів. Авторами [13] встановлено зниження шляхової та транспортної витрати палива на 5-7% під час використання ПЕО-покриттів на поршнях ДВЗ порівняно із типовими поршнями двигуна.

Проведений аналіз свідчить, що найчастіше дослідниками для формування на силумінах оксидних покриттів із підвищеними теплозахисними властивостями використовуються лужні силікатні електроліти [4,14–16]. Також можливо оксидування сплавів алюмінію в електролітах-суспензіях із додаванням в базовий розчин порошків різного ступеню дисперсності [17,18]. Прогнозовано природа компонентів, що інкорпорується до складу поверхневих шарів, буде впливати на властивості сформованих керамікоподібних покриттів. Для надання модифікованій поверхні силуміну додаткових властивостей, зокрема каталітичних, використовують електроліти із додаваннями солей перехідних металів [19,20].

Саме такий підхід було обрано для одержання керамікоподібних покриттів на поршневому силуміні в даній роботі.

### Результати та їх обговорення

Плазово-електролітичним оксидуванням у лужних розчинах електролітів 1 та 2 (табл. 1) на зразках поршневого сплаву АК12М2МгН (АЛ25) одержані рівномірні щільні керамікоподібні покриття.

Використання лужних комплексних електролітів дозволяє здійснювати гомогенізацію поверхні в процесі обробки, що забезпечує високу адгезію утворюваного покриття із основним металом.

Величина робочої густини струму та напруги обробки залежить від типу використовуваного електроліту. Встановлено, що для отримання покриттів достатньої товщини та задовільної якості доцільно використовувати режим падаючої потужності, коли при виході на режим інтенсивного іскріння густину струму обробки знижують для запобігання переходу процесу у дуговий режим [7,21].

Морфологія та колір поверхні оброблюваного матеріалу (рис. 2, а) змінюється із інкорпорацією додаткових компонентів до складу поверхневих шарів. ПЕО-обробка в манганомісному електроліті призводить до утворення рівномірного коричнево-чорного покриття із вмістом мангану до 35 ат.%. Поверхня покриття є мікроглобулярною, на ній візуалізується значна кількість конгломератів, що утворені дрібними сфероїдами (рис. 2, б). Оксидування в електроліті, що містить солі кобальту, дозволяє отримувати синьо-фіолетовий покриття із вмістом кобальту в поверхневих шарах до 24 ат. %. Інкорпорація кобальту відбувається у вигляді сфероїдних острівкових утворень, які в процесі оксидування вкривають всю поверхню зразка та формують мозаїчні структури. (рис. 2, в). Двостадійною послідовною ПЕО-обробкою в електролітах 1 та 2 можливо одержати дрібнодисперсний поруватий керамікоподібний покриття, що містить одночасно обидва каталітичні компоненти. Сумарний вміст кобальту та мангану в поверхневих шарах досягає 25-30 ат. % (рис. 2, з).



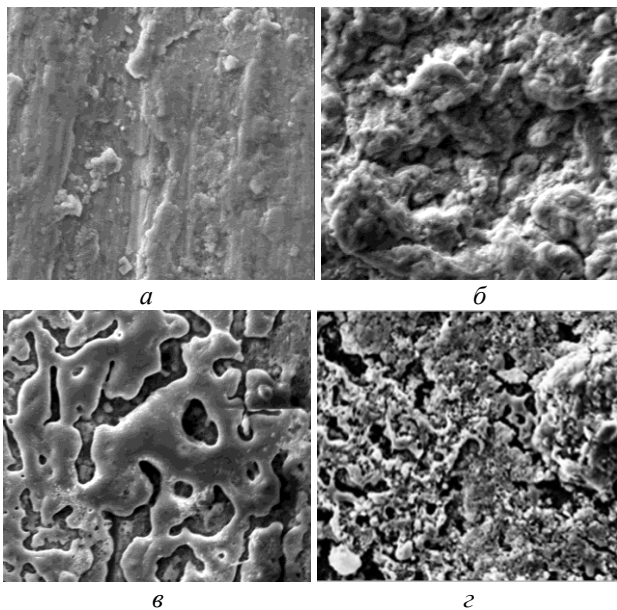


Рис. 2 – СЕМ-зображення поверхні керамікоподібних покриттів, сформованих ПЕО-обробкою на АК12М2МгН (АЛ25): а – Al, б – Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MnO<sub>y</sub>, в – Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CoO<sub>x</sub>, г – Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CoO<sub>x</sub>, MnO<sub>y</sub>. Збільшення × 1000.

За результатами аналізу хімічного складу сформованих покриттів встановлено, що в поверхневих шарах вміст силіцію (Si) складає до 3 ат.%. Це позитивно впливає на теплозахисні властивості утворених керамікоподібних шарів, а також істотно не знижує каталітичну активність інкорпорованих металів-допантів.

Сформовані керамікоподібні покриття мають високий ступінь розвинення поверхні, що підтверджено результатами досліджень топографії поверхневих шарів контактним методом (рис. 3).

Поверхневі керамікоподібні шари складаються з агломератів зерен, розмір яких коливається в межах 100-200 нм та може сягати 400 нм.

Показники шорсткості ( $R_a$  та  $R_q$ ) для розглянутих систем не перевищують: 0.05 – 0.06 мкм для покриттів, допованих манганом, та 0.3 – 0.4 мкм для покриттів, допованих кобальтом.

Результати рентгеноструктурного аналізу модифікованої поверхні поршневого силуміну свідчать, що у поверхневих шарах оксидованого сплаву крім алюмінію присутні фази Si та  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а сформовані покриття містять оксиди металів-допантів (рис. 4). Інтенсивність ліній на дифрактограмах є відображенням кількісного складу сформованих систем.

Формування керамікоподібних ПЕО-структур відбувається у нерівноважних умовах, про що свідчить аморфне гало на кутах  $2\theta \sim 20^\circ$  на рентгенограмах, а також утворення оксидів металів-допантів різної валентності. Одержані результати корелюють з даними для оксидних ПЕО-систем на сплавах алюмінію та інших вентильних металів [22].

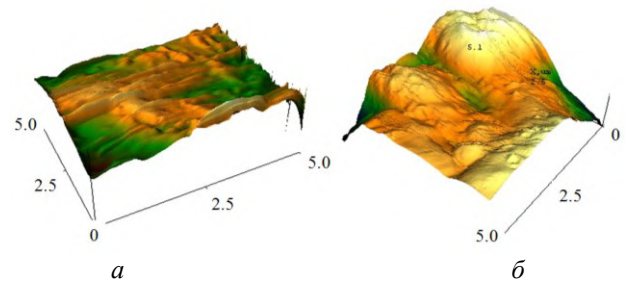


Рис. 3 – 3D-карта поверхні ПЕО-покриттів, на АК12М2МгН (АЛ25): а – Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MnO<sub>y</sub>, б – Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CoO<sub>x</sub>. Область сканування 5мкм×5мкм.

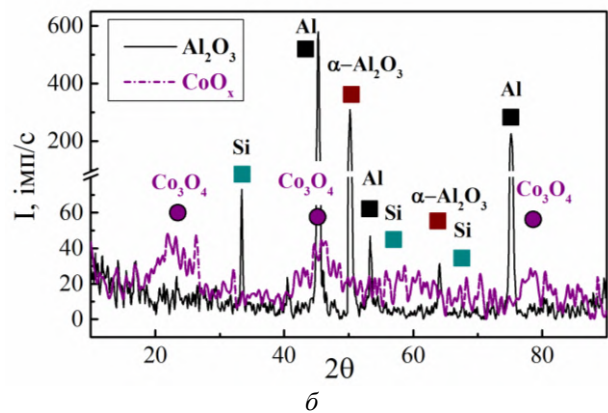
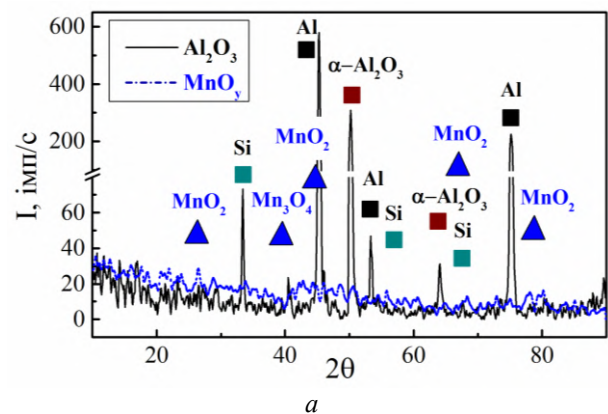


Рис. 4 – Рентгенограми керамікоподібних покриттів, сформованих на АК12М2МгН (АЛ25): а – Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MnO<sub>y</sub>, б – Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CoO<sub>x</sub>.

Особливості фазової структури модифікованої поверхні силуміну у сукупності із розвинутою поверхнею та значним вмістом оксидів каталітичних компонентів є передумовою високих функціональних властивостей сформованих керамікоподібних покриттів.

Апробація можливості використання розробленого підходу для модифікування поверхні поршнів ДВЗ здійснювалась шляхом ПЕО поршня двигуна КамАЗ-740, виготовленого зі сплаву АК12М2МгН, з формуванням оксидних покриттів на денці поршня (рис. 5) [23].

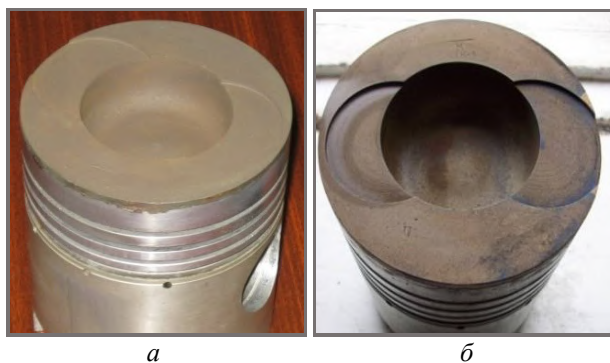


Рис. 5 – Поршень КамАЗ-740 зі сформованим керамікоподібним покритвом:  
а –  $Al_2O_3 \cdot MnO_x$ , б –  $Al_2O_3 \cdot MnO_x \cdot CoO_y$ .

Встановлено, що використання керамікоподібних покриттів поршня ДВЗ приводить до зниження температури запалювання паливної суміші. За рахунок теплоізоляційних властивостей шару каталітичного покриття для всіх досліджених оксидних систем зменшується витрата повітря порівняно з поршнем з необробленою поверхнею.

Завдяки особливостям процесів каталітичного горіння палива у пристінкових зонах камери згорання ДВЗ скорочується фаза некерваного горіння палива і час його згорання. Встановлено зниження годинної витрати палива в межах 1-4%. Найвищі показники паливної економічності демонструє поршень із керамікоподібним шаром нестехіометричних оксидів мангану. Зниження температури горіння виключає можливість участі азоту повітря у газофазових реакціях. Значені особливості процесу горіння та каталітичні процеси на поверхні оксидних покриттів поршня забезпечують зниження кількості токсичних газових викидів двигуна. Найвищу каталітичну дію проявляють змішані оксидні системи з кобальтом. Поршень із покритвом  $Al_2O_3 \cdot CoO_x$  дозволяє знизити викиди  $NO_x$  в межах 10% та  $CO$  – 15-18%, тоді як для манган-вмісних оксидних покриттів ці показники є істотно нижчими.

Таким чином, ПЕО-обробка поршнів ДВЗ дозволяє формувати манган- та кобальтвмісні керамікоподібні покриття із високими каталітичними властивостями. Указані системи можуть знайти застосування в технологіях внутрішньоциліндрового каталізу з метою зниження токсичності викидів двигунів та підвищення їх паливної економічності, зокрема для двигунів В-46 (В-84), УТД-20, КамАЗ-740, ЯМЗ-238, тощо.

Впровадження запропонованого технічного рішення щодо обробки серійних поршнів ДВЗ дозволить підвищити паливну економічність та термін експлуатації поршневих двигунів, знизити кількість токсичних газових викидів.

Перспектива подальших досліджень пов'язані із адаптацією запропонованого підходу для поверхневого модифікування (обробки) інших

конструкційних матеріалів, а також розширення кола металів-допантів. Це дозволить підвищити функціональні властивості оброблюваних матеріалів та розширити сферу використання змішаних оксидних систем.

## Висновки

1. В роботі проведено огляд існуючих підходів використання методів інженерії поверхні деталей поршневої групи двигунів внутрішнього згорання. Показано, що застосування процесів спрямованого модифікування поверхні дозволяє підвищити показники міцності та зносостійкості деталей, розширити їх функціональні властивості.

2. Опрацьовано спосіб поверхневої обробки поршневого силуміну у лужних електролітах методом ПЕО. Показано, що в запропонованих режимах можливо формувати рівномірні щільні міцноадгезовані з основним металом керамікоподібні покриття, доповані додатковими компонентами.

3. Сформовані оксидні системи на поршневих алюмінієвих сплавах мають підвищені механічні властивості. Завдяки інкорпорації оксидів мангану та кобальту до складу поверхневих шарів модифікована поверхня набуває каталітичної активності. Це робить запропонований підхід ПЕО-обробки перспективним для використання у внутрішньоциліндровому каталізі з метою зниження токсичності газових викидів двигунів та підвищення їх паливної економічності.

## Список літератури

1. Суслов, А. Г. Инженерия поверхности деталей: Монография / А. Г. Суслов, В. Ф. Безязычный, Ю. В. Панфилов, С. Г. Бишутин. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2 т. / под общ. ред. И. В. Суминова. – М.: Техносфера, 2011. – Т. 2. – 512 с.
3. Gupta, P. Electrolytic plasma technology: Science and engineering – An overview / P. Gupta, G. Tenhundfeld, E. O. Daigle, D. Ryabkov // *Surface and Coatings Technology*. – 2007. – Vol. 201, Issue 21. – P. 8746–8760. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.023.
4. Rudnev, V. S. Aluminum- and titanium-supported plasma electrolytic multicomponent coatings with magnetic, catalytic, biocide or biocompatible properties / V. S. Rudnev, I. V. Lukiyanchuk, M. S. Vasilyeva, M. A. Medkov, M. V. Adigamova, V. I. Sergienko // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 307, Part C. – P. 1219–1235. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.060.
5. Glazoff, M. V. Casting Aluminum Alloys / M. V. Glazoff, V. S. Zolotarevsky, N. A. Belov. – Elsevier, Oxford, 2007. – 544 p.
6. Okada, A. Innovative materials for automotive industry / A. Okada. – New York: Nova Science Publishers, 2010. – 147 p.
7. Каракуркчі, Г. В. Підходи щодо підвищення паливної економічності двигунів внутрішнього згорання бронетанкового озброєння та автомобільної техніки / Г. В. Каракуркчі, М. Д. Сахненко, М. В. Вель, А. С.

- Горохівський, В. М. Щокін** // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2016. – № 2(46). – С. 26-31.
8. **Криштал, М. М.** О применении технологии микродугового оксидирования для ремонта и восстановления изделий из силуминов / **М. М. Криштал, И. С. Ясников, П. В. Ивашин, А. В. Полунин** // *Авиационная и ракетно-космическая техника*. – 2012. – № 3 (34). – С. 225–228.
9. **Криштал, М. М.** Использование технологии микродугового оксидирования при разработке ДВС с блоком цилиндров из алюминиевого сплава / **М. М. Криштал, П. В. Ивашин, П. В. Коломиец** // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2012. – Т. 12, № 4. – С. 242–246.
10. **Бутусов, И. А.** Исследование влияния микродугового оксидирования на износостойкость поршня ДВС / **И. А. Бутусов, Н. Ю. Дударева** // *Наука и образование*. – 2013. – № 9. – С. 127 – 144.
11. **Марченко, А. П.** Влияние корундового слоя на рабочих поверхностях поршней на процесс сгорания в ДВС / **А. П. Марченко, В. В. Шпаковский** // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2011. – № 2. – С. 24 – 28.
12. **Марченко, А. П.** Підвищення економічності бензинового двигуна на різних режимах роботи при застосуванні частково-динамічної теплоізоляції поршнів / **А. П. Марченко, В. В. Шпаковский, В. В. Пильов** // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2013. – № 32 (1005). – С. 106 – 110.
13. **Степанов, В. А.** Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей микродуговым оксидированием днищ поршней двигателей / **В. А. Степанов** // *Science and world*. – 2014. – № 1 (5). – С. 115 – 117.
14. **Dudareva, N. Yu.** The Structure of Plasma-Electrolytic Coating Formed on Al-Si alloys by the Micro-Arc Oxidation Method / **N. Yu. Dudareva, M. M. Abramova** // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2016. – Vol. 52, Issue 1. – P. 128–132. – doi:10.1134/S2070205116010093.
15. **Ivashin, P. V.** The influence of SiO<sub>2</sub> nanoparticles addition into electrolyte on the thermal conductivity of oxide layer formed on eutectic aluminum-silicon alloy by PEO / **P. V. Ivashin, A. V. Polunin, A. Y. Tverdokhlebov, E. D. Borgardt, M. M. Krishtal** // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1121*. – 2018. – P. 012014. – doi: 10.1088/1742-6596/1121/1/012014.
16. **Rogov, A. B.** Plasma electrolytic oxidation of A1050 aluminium alloy in homogeneous silicate-alkaline electrolytes with edta4-complexes of Fe, Co, Ni, Cu, La and Ba under alternating polarization conditions / **A. B. Rogov** // *Materials Chemistry and Physics*. – 2015. – Vol. 167. – P. 136–144. – doi: 10.1016/j.matchemphys.2015.10.020.
17. **Malyshev, V. N.** Features of Microarc Oxidation Coatings Formation Technology in Slurry Electrolytes / **V. N. Malyshev, K. M. Zorin** // *Applied Surface Science*. – 2007. – Vol. 254, Issue 5. – P. 1511–1516. – doi: 10.1016/j.apsusc.2007.07.079.
18. **Borisov, A. M.** Microarc oxidation in slurry electrolytes: A review / **A. M. Borisov, B. L. Krit, V. B. Lyudin, N. V. Morozova, I. V. Suminov, A. V. Apelfeld** // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2016. – Vol. 52, Issue 1. – P. 50–78. – doi:10.3103/S106837551601004X.
19. **Rudnev, V. S.** Iron- and Nickel-Containing Oxide-Phosphate Layers on Aluminum and Titanium / **V. S. Rudnev, V. P. Morozova, T. A. Kaidalova, P. M. Nedozorov** // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. – 2007. – Vol. 52. – №9. – P. 1350–1354. – doi: 10.1134/S0036023607090069.
20. **Lukiyanchuk, I. V.** Plasma electrolytic oxide layers as promising systems for catalysis / **I. V. Lukiyanchuk, V. S. Rudnev, L. M. Tyrina** // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 307, Part C. – P. 1183–1193. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.06.076.
21. **Ved', M. V.** Functional mixed cobalt and aluminum oxide coatings for environmental safety / **M. V. Ved', N. D. Sakhnenko, A. V. Karakurkchi, T. Yu. Myrna** // *Functional Materials*. – 2017. – Vol. 24, No. 2. – P. 303–310. – doi: 10.15407/fm24.02.303.
22. **Karakurkchi, A.** Application of oxide-metallic catalysts on valve metals for ecological catalysis / **A. Karakurkchi, M. Sakhnenko, M. Ved, A. Galak, S. Petrukhin** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol. 5/10 (89). – P. 12 – 18. – doi: 10.15587/1729-4061.2017.109885.
23. **Parsadanov, I. V.** Increasing the efficiency of intra-cylinder catalysis in diesel engines / **I. V. Parsadanov, N. D. Sakhnenko, M. V. Ved', I. V. Rykova, V. O. Khyzhniak, A. V. Karakurkchi, A. S. Gorohivskiy** // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2017. – Vol. 52, No 6. – P. 145–151.

#### References (transliterated)

1. **Suslov, A. G., Bezjazychnyj, V. F., Panfilov, Ju. V. Bishutin, S. G.** *Inzhenerija poverhnosti detalej: Monografija [Surface engineering of details: Monograph]*. M.: Mashinostroenie, 2008, 320 p.
1. *Plazmenno-elektroliticheskoe modifitsirovanie poverkhnosti metallov i splavov: v 2 t.* I. V. Suminov (ed.) [Plasma-electrolytic modification of metals and alloys surface: in 2 vol.]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2011, T. 2, 512 p.
2. **Gupta, P., Tenhundfeld, G., Daigle, E. O., D. Ryabkov** Electrolytic plasma technology: Science and engineering – An overview. *Surface and Coatings Technology*, 2007, **201**(21), 8746–8760, doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.023.
3. **Rudnev, V. S. Lukiyanchuk, I. V., Vasilyeva, M. S., Medkov, M. A., Adigamova, M. V., Sergienko, V. I.** Aluminum- and titanium-supported plasma electrolytic multicomponent coatings with magnetic, catalytic, biocide or biocompatible properties. *Surface and Coatings Technology*, 2016, **307**(Part C), 1219–1235, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.060.
4. **Glazoff, M. V., Zolotarevsky, V. S., Belov, N. A.** Casting Aluminum Alloys. Elsevier, Oxford, 2007, 544 p.
5. **Okada, A.** Innovative materials for automotive industry. New York: Nova Science Publishers, 2010, 147 p.
6. **Karakurkchi, H. V., Sakhnenko, M. D., Ved', M. V., Horokhivskyy, A. S., Shchokin V. M.** Pidkhodny shchodo pidvyshchennya palyvnoyi ekonomichnosti dvyhunitv vnutrishn'oho z'horyannya bronetankovoho ozbroynennya ta avtomobil'noyi tekhniki [Approaches to improve the fuel efficiency of internal combustion engines of armored and automotive machines]. *Systemy ozbroynennya i viyskova tekhnika* [Weapons systems and military equipment]. 2016, **2**, 26–31.
7. **Krishtal, M.M., Yasnikov, I.S., Ivashin, P.V., Polunin, A.V.** О применении технологии микродугового оксидирования для ремонта и восстановления изделий из силуминов [On the application of microarc oxidation technology for the repair and restoration of products from silumins]. *Aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika*

- [Aviation and rocket and space technology]. 2012, 3(34), 225–228.
8. **Krishtal, M. M., Ivashin, P. V., Kolomiets, P. V.** Ispolzovanie tehnologii mikrodogovogo oksidirovaniya pri razrabotke DVS s blokom tsilindrov iz aluminievogo splava [The use of microarc oxidation technology in the development of internal combustion engines with an aluminum alloy cylinder block]. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук [News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*. 2012, 12(4), 242–246.
  9. **Butusov, I. A., Dudareva, N. Yu.** Issledovanie vliyaniya mikrodogovogo oksidirovaniya na iznosostoykost porshnya DVS [Investigation of the effect of microarc oxidation on the wear resistance of an internal combustion engine piston] *Nauka i obrazovanie [Science and education]*. 2013, 9, 127–144.
  10. **Marchenko, A. P., Shpakovskiy, V. V.** Vliyanie korundovogo sloya na rabochih poverhnostyah porshney na protsess sgoraniya v DVS [The effect of corundum on the working surfaces of the pistons on the combustion process in internal combustion engines] *Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engines]*. 2011, 2, 24–28.
  11. **Marchenko, A. P., Shpakovskiy, V. V., Pyl'ov, V. V.** Pidvyshchennya ekonomichnosti benzynovoho dvyhuna na riznykh rezhymakh roboty pry zastosuvanni chastkovodynamichnoyi teploizolyatsiyi porshniv [Increasing the efficiency of the gasoline engine at different operating modes when applying partially dynamic thermal insulation of pistons]. *Visnyk NTU «KhPI» [Bulletin of NTU "KhPI"]*. 2013, 32(1005), 106–110.
  12. **Stepanov, V. A.** Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazately avtomobily mikrodogovym oksidirovaniem dnish porshney dvigateley [Improvement of vehicle performance by microarc oxidation of engine piston bottoms]. *Science and world*, 2014, 1(5), 115–117.
  13. **Dudareva, N. Yu., Abramova, M. M.** The Structure of Plasma-Electrolytic Coating Formed on Al–Si alloys by the Micro-Arc Oxidation Method. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2016, 52(1), 128–132, doi:10.1134/S2070205116010093.
  14. **Ivashin, P. V., Polunin, A. V., Tverdokhlebov, A. Y., Borgardt, E. D., Krishtal, M. M.** The influence of SiO<sub>2</sub> nanoparticles addition into electrolyte on the thermal conductivity of oxide layer formed on eutectic aluminum-silicon alloy by PEO. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1121*, 2018, 012014, doi: 10.1088/1742-6596/1121/1/012014.
  15. **Rogov, A. B.** Plasma electrolytic oxidation of A1050 aluminium alloy in homogeneous silicate-alkaline electrolytes with edta4-complexes of Fe, Co, Ni, Cu, La and Ba under alternating polarization conditions. *Materials Chemistry and Physics*, 2015, 167, 136–144, doi: 10.1016/j.matchemphys.2015.10.020.
  16. **Malyshev, V. N., Zorin, K. M.** Features of Microarc Oxidation Coatings Formation Technology in Slurry Electrolytes. *Applied Surface Science*, 2007, 254(5), 1511–1516, doi: 10.1016/j.apsusc.2007.07.079.
  17. **Borisov, A. M., Krit, B. L., Lyudin, V. B., Morozova, N. V., Suminov, I. V., Apelfeld, A. V.** Microarc oxidation in slurry electrolytes: A review. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2016, 52(1), 50–78, doi:10.3103/S106837551601004X.
  18. **Rudnev, V. S., Morozova, V. P., Kaidalova, T. A., Nedorozov, P. M.** Iron- and Nickel-Containing Oxide-Phosphate Layers on Aluminum and Titanium. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2007, 52(9), 1350–1354, doi: 10.1134/S0036023607090069.
  19. **Lukiyanchuk, I. V., Rudnev, V. S., Tyrina, L. M.** Plasma electrolytic oxide layers as promising systems for catalysis. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 307(C), 1183–1193, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.06.076.
  20. **Ved', M. V., Sakhnenko, N. D., Karakurkchi, A. V., Myrna, T. Yu.** Functional mixed cobalt and aluminum oxide coatings for environmental safety. *Functional Materials*, 2017, 24(2), 303–310, doi: 10.15407/fm24.02.303.
  21. **Karakurkchi, A., Sakhnenko, M., Ved, M., Galak, A., Petrukhin, S.** Application of oxide-metallic catalysts on valve metals for ecological catalysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, 5/10(89), 12–18, doi:10.15587/1729-4061.2017.109885.
  22. **Parsadanov, I. V., Sakhnenko, N. D., Ved', M. V., Rykova, I. V., Khyzhniak, V. O., Karakurkchi, A. V., Gorohivskiy, A. S.** Increasing the efficiency of intra-cylinder catalysis in diesel engines. *Voprosy himii i himicheskoy tehnologii [Issues of Chemistry and Chemical Technology]*, 2017, 52(6), 145–151.

## Відомості про авторів (About authors)

**Каракуркчі Ганна Володимирівна** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1287-3859; e-mail: anyutikukr@gmail.com.

**Ann Karakurkchi** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher of Department of Physical Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1287-3859; e-mail: anyutikukr@gmail.com.

**Сакхненко Микола Дмитрович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

**Mykola Sakhnenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Physical Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

**Ведь Марина Віталіївна** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальної та неорганічної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-5719-6284; e-mail: vmv@kpi.kharkov.ua.

**Maryna Ved'** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of General and Inorganic Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-5719-6284; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.



**Кайдалов Руслан Олегович** – доктор технічних наук, доцент, начальник кафедри бойового та логістичного забезпечення, Національна академія Національної гвардії України; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5131-6246; e-mail: kaidalov.76@ukr.net.

**Ruslan Kaidalov** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Combat and Logistic Support, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5131-6246; e-mail: kaidalov.76@ukr.net.

**Шаповал Олександр Миколайович** – старший викладач кафедри бойового та логістичного забезпечення, Національна академія Національної гвардії України; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2845-5109; e-mail: shapoval.oleksandr@nangu.edu.ua.

**Oleksandr Shapoval** – senior lecturer of the Department of Combat and Logistic Support, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2845-5109; e-mail: shapoval.oleksandr@nangu.edu.ua.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Каракуркчі, Г. В.** Технології інженерії поверхонь деталей силових установок автомобільної та бронетанкової техніки / **Г. В. Каракуркчі, М. Д. Сахненко, М. В. Ведь, Р. О. Кайдалов, О. М. Шаповал** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 115-123. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.15.

*Please cite this article as:*

**Karakurkchi, A., Sakhnenko, M., Ved', M., Kaidalov, R., Shapoval, O.** Surface engineering technologies of power plant items of the automotive and armored vehicles. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), 115-123, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.15.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Каракурчи, А. В.** Технологии инженерии поверхности деталей силовых установок автомобильной и бронетанковой техники / **А. В. Каракурчи, Н. Д. Сахненко, М. В. Ведь, Р. О. Кайдалов, А. Н. Шаповал** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 115-123. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.15.

**АННОТАЦИЯ** Проведен обзор существующих подходов использования методов инженерии поверхности деталей поршневой группы двигателей внутреннего сгорания. Показано, что применение процессов направленного модифицирования поверхности позволяет расширить функциональные свойства обрабатываемого материала, в частности повысить показатели прочности, износостойкости, коррозионной стойкости. Как эффективный метод инженерии поверхности предложено использование плазменно-электролитического оксидирования в щелочных электролитах. Особенности обработки материала в высокоэнергетических режимах под действием короткоживущих электрических разрядов заключаются в формировании наноструктурированных оксидных композиционных покрытий при электрохимических и термохимических реакциях. Благодаря своим особенностям плазменно-электролитическая обработка может рассматриваться как комбинированный метод инженерии поверхности за счет совмещения в одном процессе модифицирования поверхностного слоя обрабатываемого материала и формирования покрытий с инкорпорацией компонентов электролита и продуктов термохимического преобразования.

Предложен способ обработки поршневого силумина АК12М2МгН в щелочных электролитах методом плазменно-электролитического оксидирования. Показано, что в гальваностатическом режиме из щелочных растворов электролитов, содержащих соли марганца и кобальта, возможно получение равномерных плотных с высокой адгезией с основным металлом керамикоподобных покрытий, допированных каталитическими компонентами, содержание которых варьируется в пределах 25-35 ат.%. Показано, что морфология и фазовая структура поверхностных слоев изменяется при инкорпорации металлов-допантов. Сформированные покрытия имеют высокую степень развития поверхности, что является предпосылкой повышенных функциональных свойств керамикоподобных покрытий. Предложенный подход использован для модификации поверхности поршня КамАЗ-740. Установлено, что использование керамикоподобных покрытий поршня двигателя приводит к снижению часового расхода топлива и количества токсичных веществ с отработавшими газами, что делает их перспективными для использования во внутрицилиндровом катализе.

**Ключевые слова:** инженерия поверхности; поверхностная обработка; плазменно-электролитическое оксидирование; поршневой сплав; силумин

*Поступила (received) 15.02.2019*

УДК 691.54:504.5

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.16

## БОРОТЬБА З ПРОМИСЛОВИМ ПИЛОМ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЦЕМЕНТУ ЯК ФАКТОР СУТТЕВОГО ЗНИЖЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ЦЕМЕНТНИХ ЗАВОДІВ НА ДОВКІЛЛЯ

С. П. КРИВІЛЬОВА, В. В. ВЛАСЕНКО\*, Д. О. ЦВІРКУН

кафедра хімічної техніки і промислової екології, НТУ «ХПІ», м. Харків, УКРАЇНА  
\*e-mail: vladavlasenko@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** На сьогоднішній день екологізація будь-якого промислового виробництва є одним з невід'ємних елементів його екологічної безпеки. Цементні заводи України з їх морально і фізично застарілим обладнанням створюють значний екологічний ризик забруднення навколишнього середовища і становлять небезпеку для здоров'я населення прилеглих територій. У статті пропонується найбільш раціональний шлях зменшення негативного впливу цементних заводів на навколишнє середовище – екологізація їх технологічних циклів. Розроблено концепцію екологізації діючих цементних заводів, яка полягає в тому, що підприємство має стати екологічно чистий модулем. Це досягається тим, що кожен окремих технологічний процес стає автотрофним екологічним модулем; технологічні процеси усередині технологічного комплексу пов'язані між собою внутрішньовиробничими зв'язками; внутрішні зв'язки між модулями забезпечують використання відходів попередніх процесів у якості вторинної сировини подальших процесів; у структурі цементного заводу існує екологічно чистий процес, який виконує роль "модуля внутрішніх зв'язків" при мінімальному залученні енергоресурсів. Центральною ланкою цього "модуля внутрішніх зв'язків" є система призначення і уловлювання цементного пилу. Проаналізовано класифікаційну схему системи боротьби з промислової пилом і газоподібними викидами цементних заводів, яка реалізується п'ятьма основними функціональними елементами: зв'язуванням забруднюючих речовин, затриманням забруднюючих речовин, уловлюванням забруднюючих речовин, очищенням повітря від забруднюючих речовин і розсіюванням забруднюючих речовин в атмосфері. Приведені найбільш ефективні методи боротьби з промисловим пилом: гідродинамічний, аеродинамічний, теплофізичний. Проаналізовано механізм взаємодії крапель води і часток пилу в повітрі в залежності від їх розмірів, розроблено рекомендації щодо вдосконалення процесу знепилювання піною технологією сировини цементних заводів. Запропоновано схему туманоутворення з метою досягнення максимальної санітарно-гігієнічної та екологічної ефективності. Розроблено рекомендації щодо вдосконалення процесу знепилювання на окремих ділянках і способи їх реалізації.

**Ключові слова:** цементний завод; концепція екологізації; цементний пил; пінний спосіб; знепилювання.

## INDUSTRIAL DUST CONTROL IN CEMENT PRODUCTION AS A FACTOR IN SIGNIFICANTLY REDUCING THE NEGATIVE IMPACT OF CEMENT PLANTS ON THE ENVIRONMENT

S. KRIVILOVA, V. VLASENKO, D. TSVIRKUN

Department of "Chemical Technics and Industrial Ecology" NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Nowadays environmentalization of plants is one of intrinsic elements of Ukrainian environmental security. Even the most modern cement plants are imperfect, they create certain risk of environment pollution and menace to human health at adjacent areas. The cement plants of Ukraine have morally and physically obsolete equipment, they pose a risk to the health of the population of the adjacent territories. The article proposes a highly reasonable way to reduce negative environment effect from cement plants, namely, environmentalization of their process cycles. The transformation of existing cement plants with their outdated equipment and technology into an environmentally friendly module is one of the methods of ecologization of production on operating plants on the production of cement. The developed concept of environmentalization of cement plants consists in turning plant into an environment-friendly module. This is achieved by the fact that each separate technological process becomes an autotrophic environmental module; technological processes within the technological complex are interconnected by intra-production links; internal links between modules ensure the use of waste from previous processes as a secondary raw material of subsequent processes; In the structure of the cement plant, there is an environmentally friendly process, which serves as "a module of internal relations" with minimal energy resources. The central element of this "internal communications module" is the system of suppressing and trapping cement dust. Analyzed the classification scheme of the system of combating industrial dust and gaseous emissions of cement plants. It is implemented by five main functional elements. These are binding, retention, trapping, scattering of pollutants and air purification from pollutants. The most effective methods for combating industrial dust of cement plants are given: hydrodynamic, aerodynamic, and thermophysical method. Development recommendations for improving the process of dedusting process materials from cement plants foam. The mechanism of interaction of water droplets and dust particles in the air is analyzed depending on their size. An optimal fogging scheme is proposed to achieve maximum sanitary and hygienic and environmental efficiency. Methods of dust suppression at various sites of the cement plant are proposed, taking into account the specifics of technological processes, as well as ways to implement them.

**Keywords:** cement plant; the concept of greening; cement dust; foam method; dust removal.

### Вступ

Сьогодні важко уявити собі сучасне будівництво мегаполісів, високотехнологічних

промислових комплексів, об'єктів транспортної інфраструктури і всього, що так необхідно людству, без такого будівельного матеріалу, як цемент,



цементні розчини і бетони на його основі. З моменту створення цементу пройшло не так вже й багато часу, але сьогодні він є одним з найбільш споживаних товарів на будівельному ринку і практично незамінним матеріалом. Цементна промисловість буде розвиватися ще багато років, перш ніж їй знайдуть інноваційну заміну.

Але технологічні комплекси з виготовлення цементу все ще не є досконалими. Діючі цементні заводи негативно впливають на прилеглі території і здоров'я місцевого населення, не кажучи вже про робітників самих цих заводів.

Будівельна галузь завжди є локомотивом економіки. І в Україні вона має витягнути з кризи економіку держави та відбудувати зруйновані міста сходу. Зараз вона задіяна на незначну частку своєї потужності. Але коли дуже застаріле обладнання вітчизняних цементних заводів (що так і не було модернізовано певною мірою) запрацює на повну потужність, його негативний тиск на навколишнє середовище значно зросте.

#### **Мета роботи**

Метою даної роботи є розробка заходів щодо зменшення негативного впливу на довкілля пилових викидів цементного заводу шляхом розробки сучасної системи боротьби з промисловим пилом (СБПП).

Рівень технічних рішень, що використовуються сьогодні на українських цементних заводах, є недостатнім для повного відвертання їх негативного впливу на довкілля. Тому найбільш раціональною мірою захисту прилеглих територій від викидів цементних заводів в атмосферне повітря є екологізація їх технологічних циклів. В ідеалі вона має передбачати створення безвідходних замкнутих циклів, що повністю виключить попадання у біосферу забруднюючих речовин, а як компроміс сьогодення – маловідходні технології, бо повністю безвідходні процеси реалізуються тільки в природних екосистемах.

#### **Концепція екологізації технологічних комплексів цементних заводів**

Практично для всіх розташованих на Харківщині підприємств будівельної індустрії характерна тривала інтенсивна експлуатація застарілого устаткування ще часів СРСР зі значним матеріальним і майже повним моральним зносом. Будівельна продукція, що нині випускається ними, цілком порівняна за якістю з аналогічною продукцією європейських і провідних світових виробників, але використовувана на підприємствах технології відстала на багато десятиліть. І хоча цементні заводи не є потенційно небезпечними об'єктами (з точки зору виникнення промислових аварій або техногенних катастроф), без кардинальної модернізації їх подальша експлуатація пов'язана з певним

екологічним ризиком для населення прилеглих територій і довкілля. Тому для його зниження необхідно здійснити сучасне технічне переобладнання українських цементних заводів з обов'язковим рішенням проблеми екологізації кожного виробничого процесу. Це складна наукомістка проблема; вона нерозривно пов'язана з основними напрямками сталого розвитку держави [1,2].

Теоретичною основою концепції екологізації виробництва є модель екологічно чистого технологічного процесу, рівень екологічної чистоти якого залежить від міри очистки викидів і утилізації відходів. З позиції взаємодії технологічних систем з довкіллям екологічно чистий технологічний процес – це процес, функціонування якого не приводить до збільшення фонових концентрацій і рівнів елементів і параметрів довкілля; до перевищення ГДК і ПДУ параметрів довкілля в аварійних і екстремальних ситуаціях; до порушення рівноваги біосфери [3].

Концепція екологізації діючого цементного заводу полягає в тому, що цей завод має бути екологічно чистим модулем. Це можливо забезпечити наступним чином:

1. Кожен окремий технологічний процес, що входить як складова до техкомплексу з виробництва цементу, треба зробити елементарним автотрофним екологічним модулем.

2. Технологічні процеси усередині технологічного комплексу з виробництва цементу мають бути пов'язані між собою і взаємодіяти шляхом реалізації внутрішньовиробничих зв'язків.

3. Внутрішні зв'язки між модулями повинні бути пов'язані таким чином, щоб викиди і відходи попередніх процесів використовувались у якості вторинної сировини для подальших процесів.

4. У разі необхідності особливої технологічної підготовки відходів в структурі підприємства повинен бути введений спеціальний екологічно чистий процес, який буде відігравати роль "модуля внутрішніх зв'язків".

5. У цьому "модулі внутрішніх зв'язків" при мінімально можливому залученні енергоресурсів має бути забезпечене максимальне використання відходів.

Роль цього "модуля внутрішніх зв'язків" має бути відведена системі пригнічення і уловлювання цементного пилу з повторним її використанням, яка і є центральною ланкою концепції екологізації цементних заводів.

Сьогодні екологізація як усєї будівельної галузі, так і окремих заводів з виробництва цементу є одним з невід'ємних елементів екологічної безпеки України.

#### **Система боротьби з промисловим пилом (СБПП)**

Система боротьби з промисловим пилом (СБПП) призначена для цілеспрямованої зміни

параметрів, що характеризуються властивостями пилового аерозолю як дисперсної системи, його енергетичним станом і агрегативною стійкістю [4]. Класифікаційна схема боротьби з промисловим пилом і газоподібними викидами цементних заводів наведена на рис. 1. Як видно зі схеми, у загальному випадку боротьба з пилом та газоподібними викидами може бути реалізована п'ятьма основними функціональними елементами: зв'язуванням забруднюючих речовин (ЗР), затриманням ЗР, уловлюванням ЗР, очищенням повітря від ЗР і розсіюванням ЗР в атмосферному повітрі. На схемі (див. рис. 1) наведені методи боротьби з промисловим пилом: гідродинамічний, аеродинамічний, теплофізичний і т.і. [4,5].

Реалізація кожного з цих методів можлива різними способами, які характеризуються фізичною формою спрямованих на ЗР зовнішніх впливів. Наприклад, для гідродинамічного методу це зрошення (при цьому способі рідина представлена у формі крапель); пінний спосіб (при якому рідина має форму пухирців піни); або у вигляді туману (коли рідина представлена у формі крапель, близьких за розмірами до розмірів молекул) і ін.

Кожен спосіб в свою чергу може бути реалізований різними видами реалізації, що характеризуються технологією підготовки спрямованих на забруднюючий аерозоль зовнішніх впливів (наприклад, зрошення гідродинамічним методом може бути низьконапірним (НН), високонапірним (ВН) або пневмогідрозрошенням (ПГЗ). Крім того, кожен вид реалізації може бути здійснений різними технічними засобами зниження забруднення повітря.

При використанні в цілях боротьби з пилом на цементних заводах як у внутрішньому обсязі їх виробничих приміщень, так і в повітряному басейні промислових майданчиків та прилеглої території максимально економічною, санітарно-гігієнічною і екологічною реалізацією процесу обезпилювання повітря є гідрообезпилювання.

Його реалізація базується на попередньому безнапірному (БН) зволоженні, низьконапірному (НН) зрошенні; високонапірному (ВН) зрошенні; пневмогідрозрошенні (ПГЗ) при спільному використанні рідини і стисненого повітря; застосуванні піни (пінному способу зволоження сировини притаманна мінімальна витрата рідини); застосуванні туману (недоліком цього способу можна вважати перезволоження матеріалів).

#### **Боротьба з викидами пилу на цементних заводах при зберіганні, транспортуванні і перевантаженні сипких матеріалів**

Пилопригнічення є серйозною проблемою всієї будівельної галузі. Але для цементних заводів вона є найбільш гострою і актуальною, оскільки в районах розташування цих заводів під час виробництва

цементу пил накопичується у кількості, що перевищує 58 кг/га (в місяць); у зв'язку з цим на прилеглих територіях спостерігається ефект пригнічення життєдіяльності більшості живих організмів.

За статистикою, збільшення концентрації в повітрі частинок пилу діаметром менше 10 мкм (мікрон) на кожні 10 мкм ( $10^{-5}$  г) на  $1 \text{ м}^3$ , підвищує на прилеглих територіях смертність жителів від раку легенів на 8 % і одночасно кількість пацієнтів лікувальних установ з хронічними респіраторними захворюваннями зростає на 7 % (половина з яких до того ж страждає ще й серцево-судинними захворюваннями) [6,7].

І саме частки такого розміру (діаметром менше 10 мкм) відіграють велику роль в утворенні хмар смогу над мегаполісами в зимові періоди. Крім того, цементний і кам'яний пил суттєво погіршує видимість на дорогах, що збільшує ризик аварій і знижує швидкість руху. Ресурс двигунів, що працюють в умовах запилення, скорочується в 2-3 рази. Вплив пилу збільшує також інтенсивність процесу корозії. Це призводить до того, що обслуговування і ремонт техніки стають дорожче, складніше і триваліше.



*Рис. 1 – Класифікаційна схема боротьби з промисловим пилом і газоподібними викидами цементних заводів*

Саме тому пилопригнічення є надзвичайно важливим заходом у будівельній галузі [8-13]. Воно здійснюється як за рахунок зниження пиловиділення, так і за рахунок зниження осадження пилу з повітря. На українських цементних заводах сировина зазвичай зберігається на відкритому повітрі; тому досить значна кількість пилу виникає ще й через вітрову ерозію. Транспортні засоби та спецтехніка, які рухаються по заводських дорогах, також піднімають в

повітря велику кількість пилу. В результаті тиску і переміщення шинами (що спостерігається вже при швидкості руху понад 20 км/год) дрібне каміння на внутрішньозаводських дорогах руйнується, і пил, що утворюється, здіймається у повітря.

При транспортуванні сипкої сировини на цементні заводи та готової продукції споживачам відбувається значне видування та втрата сипких вантажів через недосконалості засобів їх захисту, вплив метеорологічних факторів і через пошкодження тари, особливо при використанні відкритих вагонів.

Це призводить до забруднення цементним і кам'яним пилом як прилеглої до автомобільних і залізничних шляхів території, так і промислових майданчиків підприємств. Затверджені ще Держпостач СРСР і наведені в збірнику "Норм природного збитку продукції виробничо-технічного призначення і норм бою будматеріалів при транспортуванні і зберіганні", норми природного збитку (тобто зменшення маси) цементу при залізничних перевезеннях в критих вагонах і цистернах цементовозів насипом складають: 0,4 % від маси перевезеного цементу (незалежно від відстані), а в критих вагонах насипом – 0,5 %. При перевезенні цементу в критих вагонах у тарі – 0,5 %. Якщо ж цемент або щебінь перевозять залізничним транспортом у відкритих вагонах, то нормативні втрати становлять 1,28 % від маси; при перевезенні автомобільним транспортом вони зростають до 1,4 % від маси. Для кам'яної сировини втрати добігають 1,29 % від маси при перевезенні залізничним транспортом. Втрати при транспортуванні досить великі, а оскільки перевозять цемент і кам'яну сировину у вагонах вантажопідйомністю близько 70 тонн, то кількість потрапляючого в навколишнє середовище пилу становить від 1000 кг і більше з кожного вагону. Тому необхідно терміново переводити транспортування сипких вантажів на транспортування піввагонами з люками в підлозі (вони дозволяють механізувати вивантаження), критими хоперами з завантажувальними люками на даху, вагонами-цистернами для перевезення порошкоподібних матеріалів і вагонами бункерного типу. Але ідеальним варіантом є використання вагонів-самоскидів – думпкарів, призначених для перевезення та механізованого розвантаження сипучих вантажів.

Єдиного рішення всіх складних проблем боротьби з цементним і кам'яним пилом у будівельній галузі і універсального, повністю безпечного і продуктивного методу знепилювання не існує. Для кожного конкретного виду будівельного виробництва, як наприклад виробництво цементу, ці питання повинні бути вирішені з урахуванням його специфіки.

Вельми продуктивним способом боротьби з пилом є зрошення шляхом розпилення води дощувальними установками та гідромоніторами [14-16]. До складу дощувальних систем повинні входити

нагнітаючий водяний насос, дозуючий насос, насоси для подачі води, форсунки, датчики та пульт управління. Така дощувальна система керується вручну або автоматично. До недоліків такої дощувальної установки відноситься пилопригнічення на дуже нетривалий час, яке залежить від типу пилу та кліматичних умов в період пилоутворення, а також значні витрати на обслуговування дощувального обладнання, на робочу силу та енерговитрати. Тому процес зволоження запорошених поверхонь може бути нескінченним, як і витрати на нього.

На цементних заводах значна кількість пилу утворюється при розвантаженні самоскидів із сировиною в бункери дробарок. Для пилопригнічення на цих ділянках рекомендується використовувати систему зрошення, яка монтується «на упорі задніх коліс» самоскида і під час вивантаження інтенсивно зволожує вивантажуваний матеріал. Значна кількість пилу на цементних заводах утворюється і на ділянках подрібнення цементного клінкеру. Але застосування води в кількості, що забезпечує повне пилопригнічення, для дробарок є досить проблематичним. У дробарках утворюється настільки дрібний пил, що спроба пов'язати його чистою водою призводить до засмічення грохотів; дробарку доводиться зупинити на техобслуговування. Крім того, вода, що змішана з кам'яним пилом, діє як агресивний абразивний матеріал. Це призводить до передчасного зношування обладнання та значного збільшення витрат на його ремонт. Окрім того, осадження пилу за допомогою дощувального обладнання не є ефективним для пригнічення пилу, що вдихається, бо розмір крапель води становить від 200 до 600 мкм, у той час як розмір часток вдихаємого пилу складає 2-10 мкм.

Механізм осадження пилу з повітря полягає в наступному: краплі води, з'єднуючись з частинками пилу, збільшують їх вагу. В результаті цього пил осідає на землю. Якщо ввести в повітря достатню кількість крапель води приблизно такого ж розміру, який мають частинки пилу, то ймовірність зіткнення між краплями води і частинками пилу стає дуже високою (рис. 2, а). Але якщо розміри крапель води істотно перевищують розміри часток пилу, то частинки пилу рухаються навколо крапель води разом з потоками повітря, які обтікають краплі, і не з'єднуються з водою (рис. 2, б). На інтенсивність з'єднання крапель води з частинками пилу впливають такі чинники як схильність часток пилу до розчинення у воді, гідрофобність і гідрофільність (здатність до змочування), присутність гігроскопічних солей, електричний потенціал часток пилу і крапель води, температура, вологість повітря, атмосферний тиск, наявність і вплив електричних полів.

Дрібний пил, що вдихається з повітря, доцільно брати в облогу за допомогою водяного туману. Водяний туман є найсучаснішим засобом боротьби з пилом; він генерується обладнанням різних типів. На цементних заводах туманогенеруючі установки

доцільно використовувати замість дощувальних, наприклад для створення туманної завіси поблизу бункерів дробарок (див. рис. 3). У місцях постійного пилоутворення (наприклад, у стрічок транспортерів) доцільно використовувати стаціонарні системи туманоутворення. У цих системах використовуються насоси високого тиску, які нагнітають воду в розпилюючі форсунки.

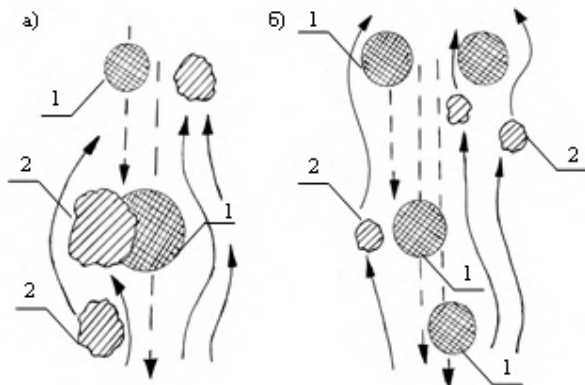


Рис. 2 – Механізм взаємодії крапель води і часток пилу в повітрі, якщо розмір часток пилу і крапель близький (а) та якщо краплі набагато більше часток пилу (б): 1 – крапля води; 2 – частка пилу; —> – напрямок руху повітря; - -> – напрямок руху крапель води

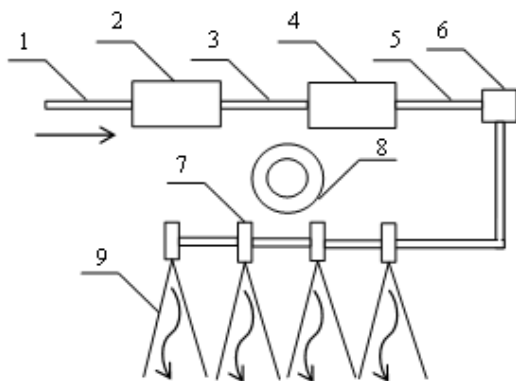


Рис. 3 – Система туманоутворення: 1 – подача води; 2 – система очисних фільтрів; 3 – шланг низького тиску; 4 – насос; 5 – шланг високого тиску; 6 – клапан; 7 – форсунки; 8 – вентилятор; 9 – туман

Інноваційною технологією є використання ультразвукового генератора туману. Оскільки частки пилу мають в основному негативний заряд (який залежить від природи пилу і дії навколишнього середовища), а краплі туману сильний позитивний заряд, то ймовірність з'єднання крапель води і часток пилу багаторазово зростає. При цьому кількість крапель (тобто витрата води), необхідних для осадження пилу, зменшується. Туманоутворюючі системи при високій ефективності пилопригнічення коштують недорого та дешеві в експлуатації; до їх

недоліків можна віднести тільки необхідність подачі стисненого повітря. Управління сучасним туманоутворюючим обладнанням може здійснюватися дистанційно.

Розмір крапель в тумані доцільно регулювати залежно від розмірів часток пилу, що пригнічується. Туманоутворюючі системи здатні одночасно нейтралізувати неприємні запахи і патогенні організми, а також охолоджувати повітря: під час перетворення води з рідини в пар поглинається енергія; це дозволяє одночасно охолоджувати повітря за допомогою туману.

У деяких випадках ще більш ефективним засобом боротьби з пилом, ніж водяний туман, виявляється розпилення піни, що покриває матеріал [17]. Згідно з основними положеннями теорії дисперсних систем піна являє собою грубодисперсну колоїдну систему, що містить в якості дисперсної фази повітря, а в якості дисперсійного середовища – розчин піноутворювача [18]. Як і будь-яка дисперсна система, піна характеризується агрегативною нестійкістю, що призводить до довольного її руйнування в результаті синерезиса, дифузії газу між пухирцями або завдяки розриву плівок піни [19]. Ефективність пилопригнічення дрібних фракцій може бути підвищена за рахунок електризації піни [20]. Для умов цементних заводів, що розглядаються, представляється доцільним наносити піну на кам'яні брили або шматки сировини, яка використовується для випалу цементного клінкера [21-23], перед їх надходженням у дробарку (за для того, що б на виході з установки у повітря піднімалося менше пилу). Для генерації піни в цьому випадку доцільно застосовувати піногенератори зі спеціальними форсунками, які розпилюють воду з піноутворюючою присадкою, яка деполаризує воду, створюючи мільйони дрібних бульбашок піни [24].

## Висновки

Проведено аналіз негативного впливу викидів промислового пилу цементних заводів на навколишнє середовище.

Показано, що найбільш ефективним шляхом їх зменшення є екологізація технологічних циклів діючих підприємств. Центральною ланкою концепції екологізації українських цементних заводів з їх застарілим обладнанням має бути використання інноваційних методів пилоподавлення, а саме гідродинамічного методу з використанням зрошення, пилопригнічення за допомогою піни або туману.

Наведено класифікаційну схему боротьби з промисловим пилом і газоподібними викидами цементних заводів. Запропоновані іноваційні методи боротьби з викидами пилу на ділянках окремих технологічних операцій (на кшталт розвантаження, подрібнення, транспортування, фасування і тд.), а також найбільш економічно доцільні в умовах

будіндустрії способи їх реалізації за допомогою сучасних систем зрошення і туманоутворення. Це обумовить зменшення викидів пилу цементними заводами (завдяки використанню сучасних систем пилоподавлення).

#### Список літератури

1. Шапар, А. Г. Критерії та показники сталого розвитку: наукові підходи до обґрунтування / А. Г. Шапар // *Екологія і природокористування: Збірник наукових праць Інституту проблем природокористування та екології НАН України*. – 2000. – Вип. 2. – С. 5-15.
2. Згуровський, М. З. Сталий розвиток у глобальному і регіональному вимірах: аналіз за даними 2005 р. / М. З. Згуровський. – К.: Політехніка, 2006. – 84 с.
3. Автомонова, В. А. Рециклинг отходов производства и лома бетонных конструкций как центральное звено концепции экологизации заводов ЖБК / В. А. Автомонова, В. В. Власенко, К. А. Зайцева, [и др.] // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 48 (1269). – С. 16-23.
4. Гурова, О. С. Теоретическое обоснование и разработка способов организации и технологий пылеподавления пеной на предприятиях стройиндустрии: дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук: 05.23.19 / Гурова Оксана Сергеевна – Ростов-на-Дону. 2017. – 287 с.
5. Valdborg, A. Y. U. Modern tendencies in the development of dust collecting theory and practice / A. Y. U. Valdborg // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2007. – Vol. 43. – P. 423-426.
6. Meo, S. A. Health hazards of cement dust / S. A. Meo // *Saudi Med J*. – 2004. – September. – Vol. 25 (9). – P. 1153-1159. – doi: 10.1186/s40557-014-0048-6.
7. Ahmed, H. O. Dust exposure and respiratory symptoms among cement factory workers in the United Arab Emirates / H. O. Ahmed, A. A. Abdullah // *Ind Health*. – 2012. – Vol. 50 (3). – P. 214-222. – doi: 10.2486/indhealth.MS1320.
8. Балгеренас, П. С. Обеспыливание воздуха на предприятиях строительных материалов / П. С. Балгеренас. – М.: Стройиздат, 1990. – 180 с.
9. Банит, Ф. Г. Пылеулавливания и очистка газов в промышленности строительных материалов / Ф. Г. Банит, А. Д. Мальгин. – М.: Стройиздат, 1979. – 352 с.
10. Минко, В. А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов / В. А. Минко. – Воронеж, 1981. – 175 с.
11. Минко, В. А. Комплексные системы обеспыливания при переработке сыпучих материалов / А. В. Минко [и др.] // *Высокие технологии в экологии: сб. тр. по мат. Межд. науч.-техн. конф.* – 1998. – С. 123-127.
12. Минко, В. А. Комплексное обеспыливание помещений при производстве цемента / А. В. Минко, В. Г. Шаптала // *Цемент*. – 1990. – № 12. – С. 15-17.
13. Беспалов, В. И. Теория и практика обеспыливания воздуха / В. И. Беспалов, Д. С. Дanelьянц, И. Мишнер. – К.: Наукова думка, 2000. – 185 с.
14. Саранчук, В. И. Физико-химические основы гидрообеспыливания и предупреждения взрывов угольной пыли / В. И. Саранчук, В. Н. Качан, В. В. Рекун. и др. – К.: Наукова думка, 1984. – 216 с.
15. Саранчук, В. И. Химические вещества для борьбы с пылью / В. И. Саранчук, В. П. Журавлев и др. – К.: Наукова думка, 1987. – 249 с.

16. Кудряшов, В. В. Механизм подавления пыли растворами ПАВ при орошении / В. В. Кудряшов, Л. Д. Воронина, Н. К. Шуринова // *Аэродисперсные системы и коагуляция аэрозолей: тез. док. на Всесоюз. науч.-техн. конф.* – 1982. – С. 3-5.
17. Wang, H. T. A New Technique for Preparation of Two-Phase Foam Materials for Controlling Mine Dust and its Application / H. T. Wang, D. M. Wang, W. X. Ren // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 328-330 – P. 372-375. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.328-330.372.
18. Тихомиров, В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения / В. К. Тихомиров. – М.: Химия, 1983. – 264 с.
19. Фихтнер, В. А. Закономерности процессов образования и разрушения пены как дисперсной системы / В. А. Фихтнер // *Актуальные вопросы физики аэродисперсных систем: тез. док. XV Всесоюз. Конф.* – 1989. – Т. 2 – С. 218.
20. Коровченко, Т. И. Разработка способов и средств повышения эффективности пылеулавливания пенным аэрозодем: автореф. дис... канд. техн. наук / Т. И. Коровченко. – М., 1988. – 40 с.
21. Кривилева, С. П. Основы промышленного строительства и санитарной техники / С. П. Кривилева, А. Н. Рассоха. – Х.: Изд-во «Точка», 2013. – 175 с.
22. Кривилева, С. П. Минералы и горные породы / С. П. Кривилева, А. Н. Рассоха. – Х.: Изд-во «Точка», 2014. – 178 с.
23. Кривилева, С. П. Драгоценная Украина: минералы и горные породы регионов / С. П. Кривилева, А. Н. Рассоха. – Х.: Финарт, 2016. – 160 с.
24. Тарат, Э. Я. Пенный режим и пенные аппараты / Э. Я. Тарат, И. П. Мухлѐнов. – Л.: Химия, 1977. – 288 с.

#### References (transliterated)

1. Shapar, A. G. Kryteriyi ta pokaznyky staloho rozvytku: naukovi pidkhody do obgruntuvannya [Criteria and indicators of sustainable development: scientific approaches to justification]. *Ekologiya i pryrodokorystuvannya: Zbirnyk naukovykh prac' Instytutu problem pryrodokorystuvannya ta ekolohiyi NAN Ukrainy* [Ecology and Nature Management: Collection of scientific works of Institute of Problems on Nature Management and Ecology of the NAS of Ukraine]. 2000, 2, 5-15.
2. Zgurovsky, M. Z. Stalyj rozvytok u global'nomu i regional'nomu vymirah: analiz za danymy 2005 r. [Sustainable development in the global and regional dimensions: analysis according to data of 2005]. K.: Politehnika, 2006, 84.
3. Avtonomova, V. O., Vlasenko, V. V., Zaitseva, K. O. et al. Recikling othodov proizvodstva i loma betonnykh konstrukciy kak central'noe zveno koncepcii ekologizatsii zavodov ZHBK [Recycling of production waste and scrap of concrete structures as the central link in the environmentalization concept of plant of reinforced concrete framing]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Chemistry, chemical engineering and environment*, 2017, 48 (1269), 16-23.
4. Gurova, O. S. Teoreticheskoe obosnovanie i razrabotka sposobov organizatsii i tehnologii pylepodavlenija penoy na predpriyatiyah stroyindustrii: dis. na soisk. uch. st.



- d-ra tehn. nauk: 05.23.19 / **Gurova O. S.** – Rostov-on-Don, 2017, 287.
5. **Valdberg, A. Y. U.** Modern tendencies in the development of dust collecting theory and practice. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2007, **43**, 423-426.
  6. **Meo, S. A.** Health hazards of cement dust. *Saudi Med J*, 2004, **25** (9), 1153-1159, doi: 10.1186/s40557-014-0048-6.
  7. **Ahmed, H. O., Abdullah, A. A.** Dust exposure and respiratory symptoms among cement factory workers in the United Arab Emirates. *Ind Health*, 2012, **50** (3), 214-222, doi: 10.2486/indhealth.MS1320.
  8. **Balterenas, P. S.** Obespylivanie vozduha na predpriyatiyah stroitel'nyh materialov [Air dedusting at building materials enterprises]. M.: Strojizdat, 1990, 180.
  9. **Banit, F. G., Malgin, A. D.** Pyleulavlivaniya i ochildka gazov v promyshlennosti stroitel'nyh materialov [Dust collection and gas cleaning in the building materials industry]. M.: Strojizdat, 1979, 352.
  10. **Minko, V. A.** Obespylivanie tehnologicheskikh processov proizvodstva stroitel'nyh materialov [Dedusting of technological processes of production of building materials]. Voronezh, 1981, 175.
  11. **Minko, V. A.** Kompleksnye sistemy obespylivaniya pri pererabotke sypuchih materialov [Complex dedusting systems in the processing of bulk materials]. *Vysokie tehnologii v ekologii: sb. tr. po mat. Mezhd. nauch.-tehn. konf* [High technology in ecology: the collection of works on materials. Int. scientific and technical conf], 1998, 123-127.
  12. **Minko, V. A., Shaptala V. G.** Kompleksnoe obespylivanie pomeshcheniy pri proizvodstve tsementa [Complex dedusting of premises in the production of cement]. *Cement*, 1990, **12**, 15-17.
  13. **Bespalov, V. I., Danelyants D. S., Mishner I.** Teoriya i praktika obespylivaniya vozduha [Theory and practice of air dedusting]. Kiev: Naukova dumka, 2000, 185.
  14. **Saranchuk, V. I., Kachan, V. N., Rekun V. V.** et al. Fiziko-himicheskie osnovy gidroobespylivaniya i preduprezhdeniya vzryvov ugol'noy pyli [Physical and chemical principles of hydrodedusting and prevention of coal dust explosions]. K.: Naukova dumka, 1984, 216.
  15. **Saranchuk, V. Y., Zhuravlev V. P.** et al. Hymycheskye veshhestva dlya bor'by s pyl'yu [Chemicals for dust control]. K.: Naukova dumka, 1987, 249.
  16. **Kudryashov, V. V., Voronina, L. D., Shurina N. K.** Mehanyzm podavleniya pyli rastvoramy PAV pri oroshenii [The mechanism of dust suppression with surfactant solutions during irrigation]. *Aerodispersnyye sistemy i koagulyatsiya aerorozolei: tez. dok. na Vsesoyuz. nauch.-tehn. konf.* [Aero-dispersed systems and coagulation of aerosols: abstracts of reports to the All-Union. scientific -techn. conf.]. Moscow, 1982, 3-5.
  17. **Wang, H. T., Wang, D. M., Ren, W. X.** A New Technique for Preparation of Two-Phase Foam Materials for Controlling Mine Dust and its Application. *Advanced Materials Research*, 2011, **328-330**, 372-375, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.328-330.372.
  18. **Tyhomyrov, V. K.** Peny. Teoriya i praktika ikh polucheniya i razrusheniya [Theory and practice of their receipt and destruction]. M.: Khymyja, 1983, 264.
  19. **Fyhtner, V. A.** Zakonomernosti processov obrazovaniya i razrusheniya peny kak dyspersnoy systemy [Regularities of the processes of formation and destruction of foam as a dispersed system]. *Aktual'nyye voprosy fiziki aerodispersnykh sistem: tez. dok. XV Bsesoyuzn Konf.* [Actual problems of the physics of aerodisperse systems: tez.dok.XV All Union. Conf.]. 1989, **2**, 218.
  20. **Korovchenko, T. I.** Razrabotka sposobov i sredstv povysheniya effektivnosti pyleulavlivaniya pennym aerorozolem [Development of methods and means of increasing the efficiency of dust collection by foam aerosol]. *The thesis for a Degree of "Candidate of Technical Science"*, Moscow, 1998, 40.
  21. **Krivileva, S. P., Rassokha A. N.** Osnovy promyshlennogo stroitel'stva i sanitarnoy tekhniki [Basics of industrial construction and sanitary equipment]. Kharkov: Izd-vo «Tochka», 2013, 175.
  22. **Krivileva, S. P., Rassokha A. N.** Mineraly i gornyye porody [Minerals and Rocks]. Kharkov: Izd-vo «Tochka», 2014, 178.
  23. **Krivileva, S. P., Rassokha A. N.** Dragotsennaya Ukraina: mineraly i gornyye porody regionov [Precious Ukraine: minerals and rocks of the regions]. Kharkov: Fynart, 2016, 160.
  24. **Tarat, E. Ya.** Pennyu rezhim i pennyye apparaty [Foam Mode and Foam Apparatus]. L.: Hymyja, 1977, 288.

#### Відомості про авторів (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; ORCID: 0000-0001-6502-9486; e-mail: sv.krivilyova1@gmail.com.

**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; ORCID: 0000-0001-6502-9486; e-mail: sv.krivilyova1@gmail.com.

**Власенко Влада Валеріївна** – бакалавр 4-го року навчання, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-0344-809X; e-mail: vladavlasenko@gmail.com.

**Vlada Vlasenko** – the fourth year Bachelor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0344-809X; e-mail: vladavlasenko@gmail.com.

**Цвіркун Дарина Олександрівна** – бакалавр 3-го року навчання, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент, м. Харків, Україна, ORCID: 0000-0003-0621-6403; e-mail: darina.tsvirkun@gmail.com.

**Darina Tsvirkun** – the third year Bachelor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0621-6403; e-mail: darina.tsvirkun@gmail.com.



*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Кривільова, С. П.** Борьба с промышленным пылом при производстве цемента как фактор существенного снижения негативного влияния цементных заводов на окружающую среду / **С. П. Кривільова, В. В. Власенко, Д. О. Цвіркун** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019 – № 5 (1330). – С. 124-131. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.16.

*Please cite this article as:*

**Krivileva, S., Vlasenko, V., Tzvirkun, D.** Industrial dust control in cement production as a factor in significantly reducing the negative impact of cement plants on the environment. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), 124-131, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.16.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Кривилева, С. П.** Борьба с промышленной пылью при производстве цемента как фактор существенного снижения негативного влияния цементных заводов на окружающую среду / **С. П. Кривилева, В. В. Власенко, Д. А. Цвиркун** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 124-131. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.16.

**АННОТАЦИЯ** На сегодняшний день экологизация любого промышленного производства является одним из неотъемлемых элементов его экологической безопасности. А цементные заводы Украины имеют морально и физически устаревшее оборудование они создают значительный экологический риск загрязнения окружающей среды и представляют опасность для здоровья населения прилегающих территорий. В статье предлагается наиболее рациональный путь уменьшения негативного влияния цементных заводов на окружающую среду – экологизация их технологических циклов. Разработана концепция экологизации действующих цементных заводов, которая состоит в том, что предприятие должно стать экологически чистым модулем. Это достигается тем, что каждый отдельный технологический процесс становится автотрофным экологическим модулем; технологические процессы внутри технологического комплекса связаны между собой внутривиробничними зв'язками; внутрішні зв'язки між модулями забезпечують використання відходів попередніх процесів в якості вторинного сиров'язки наступних процесів; в структурі цементного заводу існує екологічно чистий процес, який виконує роль модуля внутрішніх зв'язків" при мінімальному привертанні енергоресурсів. Центральним звеном цього "модуля внутрішніх зв'язків" є система подавлення і уловлювання пилу. Проаналізована класифікаційна схема системи боротьби з промисловою пилюю і газообразними вибросами цементних заводів, яка реалізується п'ятьма основними функціональними елементами: зв'язуванням забруднюючих речовин, затриманням забруднюючих речовин, уловлюванням забруднюючих речовин, очищенням повітря від забруднюючих речовин і розсіюванням забруднюючих речовин в атмосфері. Приведені найбільш ефективні методи боротьби з промисловою пилюю цементних заводів: гідродинамічний, аеродинамічний, теплофізичний. Розроблені рекомендації по удосконаленню процесу обеспилювання піною технологічного сиров'язки. Проаналізований механізм взаємодії крапель води і частинок пилу в повітрі в залежності від їх розмірів. Предложена оптимальная схема туманообразования для достижения максимальной санитарно-гигиенической и экологической эффективности. Разработаны рекомендации по совершенствованию процесса обеспыливания на отдельных участках и способы их реализации.

**Ключевые слова:** цементный завод; концепция экологизации; пыль цементная; пенный способ; обеспыливание.

*Поступила (received) 28.02.2019*

УДК 66.094.942

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.17

## ТРАНСЕСТЕРИФІКАЦІЯ ТРИГЛЦЕРИДІВ ЕТАНОЛОМ У ПРИСУТНОСТІ ОКСИДІВ МЕТАЛІВ

Ю. Р. МЕЛЬНИК\*, Р. О. СТАРЧЕВСЬКИЙ, С. Р. МЕЛЬНИК

кафедра технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, УКРАЇНА  
\*e-mail: yurii.r.melnyk@lpnu.ua

**АНОТАЦІЯ** Метою досліджень було визначення закономірностей процесу трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії етанолом у присутності каталізаторів – оксидів цинку (ZnO), нікелю (NiO), заліза (FeO), міді (CuO) та кобальту (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> і Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Дослідження здійснювали при температурі 338 K і мольному співвідношенні тригліцериди : етанол – 1 : (3,8–4,1). Встановлено, що вид оксиду металу впливає як на початкову швидкість реакції, так і на досягнуту конверсію тригліцеридів. Показано, що найбільша частка тригліцеридів реагує протягом перших 30 хв процесу з досягненням конверсії від 39,5 % (у присутності Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) до 76,7 % (ZnO). У наступні 120 хв найменший приріст конверсії тригліцеридів становить 18,6 % у присутності ZnO, а найбільший – 30,6 % за умови каталізу CuO. За результатами досліджень запропоновано ряд активності оксидів металів у реакції трансестерифікації тригліцеридів етанолом. Встановлено, що найвищу активність у реакції трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії етанолом виявляють оксиди цинку та нікелю. У їхній присутності за 150 хв реакції досягається конверсія тригліцеридів 95,3 і 94,2 %, відповідно. Водночас найнижчу активність виявляють оксиди кобальту. Показано, що встановлені закономірності зміни активності оксидів металів корелюють із результатами, одержаними під час дослідження трансестерифікації тригліцеридів етанолом у присутності катіонітів КУ-2-8 із іммобілізованими іонами металів за винятком катіоніту з іммобілізованими іонами кобальту (II), який на відміну від оксидів кобальту демонструє достатньо високу каталітичну активність. Для найактивнішого каталізатора (оксиду цинку) досліджено вплив співвідношення реагентів на конверсію сировини. Встановлено, що збільшення мольного співвідношення тригліцериди : етанол з 1 : 3,8 до 1 : 4,1 впливає як на початкову швидкість реакції, так і на максимальну конверсію тригліцеридів. Показано, що навіть незначне збільшення мольного співвідношення тригліцериди : етанол дозволяє підвищити конверсію тригліцеридів на 2,5 %. Виконані дослідження показують можливість використання оксидів цинку та нікелю в реакції трансестерифікації тригліцеридів етанолом.

**Ключові слова:** трансестерифікація; соняшникова олія; тригліцериди; етанол; оксиди нікелю, цинку, заліза, міді, кобальту

## TRANSESTERIFICATION OF TRIGLYCERIDES BY ETHANOL IN THE PRESENCE OF METAL OXIDES

YU. MELNYK, R. STARCHEVSKYI, S. MELNYK

Department of Organic Products Technology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

**ABSTRACT** The aim of the research was to determine a regularities of the transesterification process of sunflower oil triglycerides by ethanol in the presence of catalysts – oxides of zinc (ZnO), nickel (NiO), iron (FeO), copper (CuO) and cobalt (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). The research was carried out at a temperature of 338 K and a molar ratio of triglycerides: ethanol 1 : (3.8–4.1). It is established that the kind of metal oxide affects both the initial reaction rate and the achieved triglycerides conversion. It is shown that the highest amount of triglycerides reacts during the first 30 minutes with conversion achieving from 39.5 % (in the presence of Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) to 76.7 % (ZnO). In the next 120 minutes the smallest increase of the triglycerides conversion is 18.6 % in the presence of ZnO and the largest increase is 30.6% in the case of CuO catalysis. According to the research results a number of metal oxides activities in the transesterification reaction of triglycerides by ethanol were proposed. It was found that zinc and nickel oxides demonstrate the highest activity in the transesterification reaction of sunflower oil triglycerides by ethanol. In their presence the triglycerides conversion is achieved 95.3 and 94.2% for 150 minutes of the reaction, respectively. At the same time the lowest activity is detected by cobalt oxides. It is shown that the established regularities of the activity change of metal oxides correlate with the results obtained during the study of triglycerides transesterification by ethanol in the presence of cation exchange resin KU-2-8 with immobilized metal ions. Exception is cation exchange resin with immobilized ions of cobalt (II), which unlike cobalt oxides exhibits a sufficiently high catalytic activity. The effect of the reagents molar ratio on the raw materials conversion in the presence of the most active catalyst (zinc oxide) was investigated. It was found that an increase in the molar ratio of triglycerides: ethanol from 1 : 3.8 to 1 : 4.1 affects both the initial reaction rate and the maximum triglycerides conversion. It is shown that even a small increase of the molar ratio of triglycerides: ethanol can increase the triglycerides conversion on 2.5%. The performed research shows a possibility of zinc and nickel oxides using in the transesterification reaction of triglycerides by ethanol.

**Keywords:** transesterification; sunflower oil; triglycerides; ethanol; nickel, zinc, iron, copper and cobalt oxides

### Вступ

Трансестерифікацію олій та тваринних жирів, в основному, здійснюють метанолом у присутності

лужних каталізаторів – гідроксидів або метилатів калію чи натрію [1]. Застосування гомогенних лужних каталізаторів у реакції трансестерифікації має ряд недоліків, а саме: можливість омилення естерів у

присутності лужних каталізаторів, втрати каталізатора, через необхідність його нейтралізації та, як наслідок, утворення значної кількості стічних вод [2].

Крім того використання гомогенних лужних каталізаторів висуває жорсткі вимоги до сировини з точки зору вмісту в ній вільних жирних кислот та води, оскільки кислоти можуть взаємодіяти з каталізатором з утворенням мила, а присутність води в реакційній суміші прискорює реакцію омилення та зумовлює гідроліз метилатів лужних металів [3].

Вказані недоліки зумовлюють інтенсивні пошуки альтернативних, насамперед гетерогенних каталізаторів, які мають ряд переваг перед гомогенними. Такими перевагами гетерогенних каталізаторів є можливість їх багаторазового використання за рахунок легкого відділення від реакційної суміші, а також відсутність реакції омилення та сапоніфікації реакційної суміші, яка призводить до ускладнення її розділення після завершення реакції [2,3].

Як гетерогенні каталізатори трансестерифікації використовують речовини як кислотного, так і основного характеру.

Як основні гетерогенні каталізатори найчастіше застосовують оксиди та карбонати лужноземельних металів.

Зокрема застосування оксиду кальцію дозволяє при температурі реакції 333 К за 60 хв досягнути конверсії 93 % у процесі взаємодії триолеїну з метанолом [4], а під час трансестерифікації пальмової олії за 3 год конверсія тригліцеридів (ТГ) становить 95,44 % [5].

У роботі [6] досліджено ряд оксидів (в основному оксидів лужноземельних металів на носії – магнію, кальцію, барію, стронцію) та показано їхню ефективність у процесі трансестерифікації.

У роботі [7] досліджено гетерогенні основні каталізатори (карбонати кальцію та магнію) у реакції трансестерифікації метанолом відпрацьованої олії. Вихід моноестерів при застосуванні вказаних каталізаторів становить 55–70 %. При багатократному застосуванні гетерогенних каталізаторів їхня активність поступово знижується і досягає нуля після шостого циклу для карбонату кальцію та після десятого циклу для карбонату магнію.

Авторами також встановлено, що активність гетерогенних лужних каталізаторів є нижчою, ніж гомогенних, проте при їх застосуванні відсутні процеси сапоніфікації реакційної суміші та немає потреби у нейтралізації каталізатора після завершення реакції та багатократному промиванні реакційної суміші водою. Показано, що використання гомогенних лужних каталізаторів вимагає трьох-чотирикратного промивання реакційної суміші, тоді як при застосуванні гетерогенних каталізаторів достатньо одного промивання водою [7].

Для трансестерифікації тваринного жиру метанолом запропоновано застосовувати як

каталізатор змішані гідротальцити магнію і алюмінію. Вказаний каталізатор дозволяє при температурі 493 К і тиску 0,7 МПа досягнути конверсії жирової сировини 98 % [8].

Для покращення експлуатаційних властивостей гетерогенні лужні каталізатори активують. Так для трансестерифікації відпрацьованих олій запропоновано використовувати оксид кальцію з нанесеним фторидом калію, активований додаванням іонів церію, лантану та цирконію [9]. Такий каталізатор дозволяє при температурі 338 К та мольному співвідношенні ТГ : метанол – 1 : 12 за 60 хв досягнути конверсії ТГ 98,7 %. Він також зберігає свою активність принаймні в десяти циклах повторного застосування.

Як кислотні гетерогенні каталізатори трансестерифікації застосовують кислоти Льюїса або кислоти Бренстеда на носіях.

Наприклад використання як каталізатора трансестерифікації ТГ етанолом катіоніту КУ-2-8 з іммобілізованими іонами металів дозволяє досягнути конверсії ТГ 45,1–84,5 % [10].

Як каталізатор безперервного процесу трансестерифікації запропоновано суміш оксидів цинку та алюмінію, в присутності якого конверсія ТГ становить 98,3 % [11]. Як кислотний гетерогенний каталізатор трансестерифікації запропоновано використовувати оксид олова (IV) на носії, оброблений сульфатною кислотою [12].

Встановлено також, що застосування оксиду заліза як каталізатора трансестерифікації ТГ бутан-1-олом дозволяє при мольному співвідношенні ТГ : бутан-1-ол – 1 : 10 і температурі реакції 383 К досягнути конверсії соняшникової олії понад 60 % [13].

Отже, літературні дані вказують на перспективність застосування гетерогенних каталізаторів трансестерифікації ТГ, серед яких важливе місце посідають оксиди металів. Водночас дані про принцип вибору каталізатора є досить розрізненими.

Тому актуальними є дослідження впливу різних оксидів металів на показники реакції трансестерифікації олії та порівняльна оцінка їхньої каталітичної дії.

### Мета роботи

Мета досліджень: встановлення впливу виду гетерогенного каталізатора – оксиду металу на конверсію ТГ соняшникової олії етанолом (ЕС).

### Викладення основного матеріалу

У дослідженнях використовували як джерело ТГ соняшникову олію (ДСТУ 4492:2005) та спирт етиловий ректифікований (ДСТУ 4221:2003).

Перед застосуванням ЕС зневоднювали над прожареним сульфатом магнію.

Як каталізатори реакції трансестерифікації застосовували оксиди металів – ZnO, NiO, FeO, CuO, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Трансестерифікацію ТГ соняшникової олії ЕС здійснювали в стаціонарних умовах при температурі 348 К. Вміст оксидів металів у всіх дослідках становив 0,25 мас. % від кількості рідких компонентів реакційної суміші. Мольне співвідношення ТГ : ЕС становило 1 : 3,8 та 1 : 4,1.

Процес трансестерифікації вели в тригорлій колбі, обладнаній термометром та зворотним холодильником. Для перемішування реакційної суміші використовували магнітну мішалку.

Періодично з реакційної суміші відбирали проби, в яких визначали вміст ЕС.

Концентрацію ЕС у реакційній суміші встановлювали за допомогою газорідного хроматографа "Цвет-100" з детектором по теплопровідності. Умови хроматографічного аналізу були такі: колонка завдовжки 1 м та діаметром 3 мм, заповнена нерухомою фазою 5% Silicone SE30 на Chromaton N-AW; газ-носії – гелій з об'ємною витратою 3 дм<sup>3</sup>/год; сила струму на детекторі становила 120 мА; об'єм аналізованої проби – 2 мкл. Температура при здійсненні хроматографічного аналізу становила: випарника – 483 К, детектора – 443 К, колонки – 353 К.

За визначеною хроматографічно концентрацією ЕС розраховували кількість прореагованих ЕС і ТГ, а відтак – конверсію ТГ (власне у перерахунку на тригліцерид).

Встановлено, що досягнута в початковий період реакції (30 хв) конверсія ТГ істотно залежить від виду каталізатора (рис. 1).

Незважаючи на схожий характер кривих залежності конверсії ТГ від часу в присутності досліджених оксидів металів, їхня активність істотно відрізняється.

Зокрема встановлено, що найвищу активність виявляють оксиди цинку та нікелю, а найнижчу – оксиди кобальту. Конверсія ТГ у присутності оксиду цинку за 30 хв реакції досягає 76,7 %, тоді як найменш активні каталізатори (Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) за той самий час забезпечують майже в два рази нижчу конверсію ТГ у реакції їх трансестерифікації ЕС – 39,5 і 43,9 %, відповідно (рис. 1).

Порівняння одержаних результатів з наведеними в [9] даними дослідження трансестерифікації ТГ етанолом у присутності катіонів КУ-2-8 із іммобілізованими іонами металів, показує, що за умови каталізу оксидами металів досягнута на 30 хв реакції конверсія ТГ є істотно вищою, хоча якісні співвідношення активності вказаних каталізаторів зберігаються.

Винятком є катіоніт з іммобілізованими іонами кобальту (II) (рис. 1), який виявляє активність, співмірну з каталізаторами, які містять іммобілізовані катіони нікелю (II) та міді (II). При застосуванні як каталізаторів катіонітів КУ-2-8 із іммобілізованими

іонами металів найвища конверсія, як і при використанні оксидів металів, досягається у присутності катіоніту з іонами цинку – вона становить 56,0 %, але є на 20,7 % меншою, ніж при застосуванні ZnO [9].

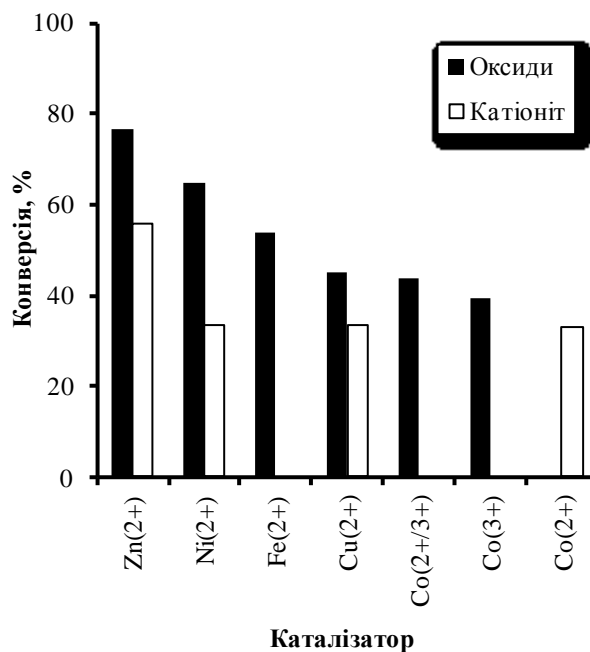


Рис. 1 – Залежність конверсії ТГ соняшникової олії від виду каталізатора. Тривалість реакції – 30 хв, вміст оксидів металу – 0,25 мас. %, температура реакції – 348 К, мольне співвідношення ТГ : ЕС – 1 : 3,8. Умови реакції при застосуванні катіонітів наведено в [9]

Слід зазначити також, що за перші 30 хв реакції в присутності оксидів металів реагує найбільша частка ТГ – від 39,5 до 76,7 %. За наступні 120 хв конверсія ТГ за умови каталізу різними оксидами зростає лише на 18,6–30,6 %.

Аналогічне явище характерне також для каталізу реакції трансестерифікації ТГ етанолом катіонітом КУ 2-8 із іммобілізованими іонами металів. У присутності цих каталізаторів за перші 30 хв конверсія ТГ досягає 32,9–56,0 %, а за наступні 120 хв вона зростає лише на 11,7–21,3 % [9].

Разом з тим, подальший перебіг реакції трансестерифікації показує, що різниця в активності оксидів металів, яка спостерігається на 30 хв реакції, до 150 хв певною мірою нівелюється (рис. 2).

Встановлено, що максимальна конверсія ТГ у присутності оксиду нікелю є близькою, до тої яка досягається при застосуванні як каталізатора оксиду цинку – 94,2 і 95,3 %, відповідно, хоча на 30 хв конверсія ТГ у присутності оксиду цинку є на 12 % вищою.

Знову ж таки, найнижчу активність на 150 хв реакції виявляють оксиди кобальту, в присутності яких конверсія ТГ не перевищує 65–69 %.

Послідовність зміни активності каталізаторів трансестерифікації ТГ етанолом – оксидів металів та іммобілізованих на катіоніті КУ-2-8 іонів металів, за умови високої конверсії реагентів є практично однаковою (рис. 2). Водночас у всіх випадках у присутності оксидів металів досягнута конверсія тригліцеридів є вищою, ніж під час каталізу іммобілізованими на катіоніті КУ-2-8 іонами металів [9].

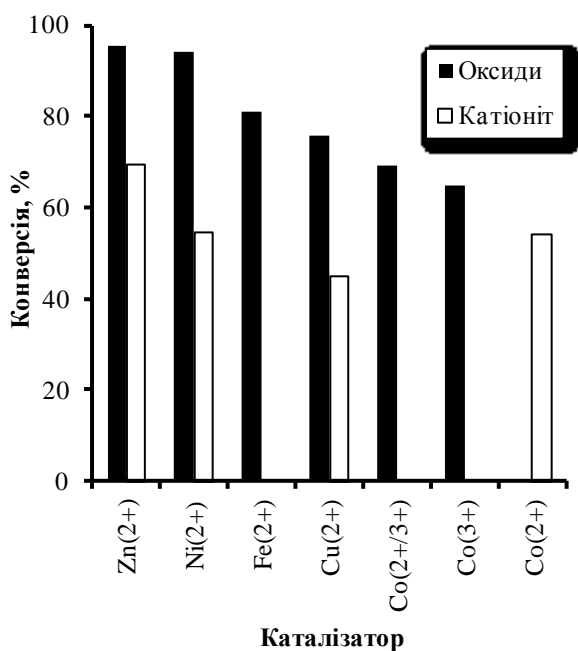


Рис. 2 – Залежність конверсії ТГ соняшникової олії від виду каталізатора. Тривалість реакції – 150 хв, вміст каталізатора – 0,25 мас. %, температура реакції – 348 К, мольне співвідношення ТГ : ЕС – 1 : 3,8. Умови реакції при застосуванні катіонітів наведено в [9]

Збільшення мольного співвідношення ТГ : ЕС з 1 : 3,8 до 1 : 4,1 у присутності найактивнішого каталізатора оксиду цинку впливає як на початкову швидкість реакції, яка зі збільшенням надлишку спирту зростає з  $3,7 \cdot 10^{-4}$  до  $3,9 \cdot 10^{-4}$  моль/(дм<sup>3</sup>·с), так і на конверсію ТГ. Зокрема при мольному співвідношенні ТГ : ЕС – 1 : 4,1 після 30 хв реакції конверсія ТГ є вищою на 4,5 %, а після 150 хв – на 2,5 % (рис. 3).

Відповідно, трансестерифікація ТГ етанолом у присутності оксиду цинку при мольному співвідношенні ТГ : ЕС – 1 : 4,1 дозволяє вже за 90 хв досягнути конверсії ТГ 94,5 %, а за 180 хв спостерігається практично повне перетворення ТГ – їхня конверсія досягає 98,9 %.

### Обговорення результатів

Отримані результати вказують на залежність показників реакції трансестерифікації ТГ соняшникової олії етанолом від виду оксиду металу.

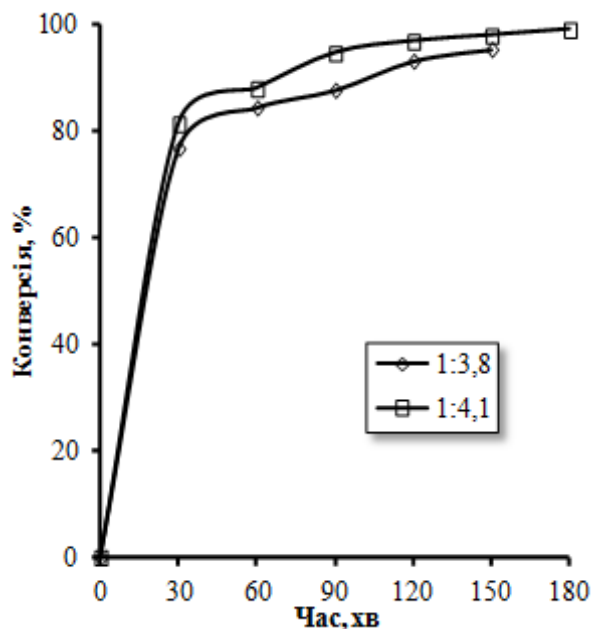
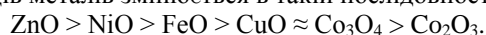


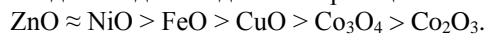
Рис. 3 – Залежність конверсії ТГ соняшникової олії від часу при різному мольному співвідношенні реагентів. Вміст каталізатора (оксид цинку) – 0,25 мас. %, температура реакції – 348 К

Зокрема у початковий період реакції активність оксидів металів змінюється в такій послідовності:



Як видно з рис. 1, зменшення активності каталізатора, оцінене за результатами досягнутої конверсії, від оксиду цинку до оксиду купрумів відбувається практично лінійно. У присутності оксидів купрумів і кобальту досягнута конверсія ТГ суттєво не відрізняється.

Варто зазначити, що на 150 хв ряд активності оксидів металів встановлений за конверсією ТГ є близьким до наведеного для 30 хв реакції:



Для швидкості реакції, розрахованої на 30 хв, спостерігається залежність від виду каталізатора, аналогічна до встановленої для конверсії ТГ (табл. 1).

Слід зазначити, що ряд активності досліджених каталізаторів – оксидів металів, є якісно близьким до відповідних послідовностей, встановлених для реакції трансестерифікації ТГ соняшникової олії ЕС у присутності катіоніту КУ-2-8 із іммобілізованими іонами металів [9]. Водночас кількісні характеристики процесу суттєво відрізняються, зокрема каталітична активність оксидів металів є вищою.

Таблиця 1 – Залежність швидкості реакції трансестерифікації ТГ етанолом від виду каталізатора. Вміст каталізатора – 0,25 мас. %, температура реакції – 348 К

Каталізатор	Конверсія ТГ на 30 хв, %	Швидкість реакції трансестерифікації ТГ, $r \cdot 10^4$ , моль/(дм <sup>3</sup> ·с)
Мольне співвідношення ТГ : ЕС – 1 : 3,8		
ZnO	76,7	3,7
NiO	64,7	3,2
FeO	53,7	2,6
CuO	45,0	2,2
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	43,9	2,1
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39,5	1,9
Мольне співвідношення ТГ : ЕС – 1 : 4,1		
ZnO	81,2	3,9

Порівняння каталітичної активності досліджених оксидів металів із відповідними солями, дані про застосування яких наведені в дослідженні [14], вказує на меншу кореляцію між активністю оксиду і солі в процесі трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії етанолом. Це можна пояснити різною активною концентрацією солей внаслідок їхнього часткового розчинення в реакційному середовищі.

### Висновки

Проведенні дослідження показують, що вид оксиду металу впливає як на початкову швидкість процесу трансестерифікації соняшникової олії етанолом, так і на конверсію ТГ на глибших стадіях процесу.

Показана можливість використання як каталізаторів реакції трансестерифікації ТГ етанолом оксидів цинку, нікелю, заліза, міді, кобальту.

Встановлено, що оптимальними каталізаторами трансестерифікації є оксиди цинку та нікелю.

Показано, що при 378 К та мольному співвідношенні ТГ : ЕС – 1 : 3,8 конверсія ТГ у присутності вказаних каталізаторів за 150 хв досягає близько 95 %, а збільшення мольного співвідношення реагентів до 1 : 4,1 дозволяє підвищити конверсію ТГ за той самий час до 97,8 %.

### Список літератури

1. **Van Gerpen, J.** Biodiesel processing and production / **J. Van Gerpen** // *Fuel Processing Technology*. – 2005. – №86. – P. 1097-1107. – doi:10.1016/j.fuproc.2004.11.005.
2. **Leung, D. Y.** A review on biodiesel production using catalyzed transesterification / **D. Y. Leung, X. Wu, H. M. Leung** // *Applied Energy*. – 2010. – №87. – P. 1083-1095. – doi:10.1016/j.apenergy.2009.10.006.
3. **Schuchardt, U.** Transesterification of Vegetable Oils: a Review / **U. Schuchardt, R. Sercheli, R.M. Vargas**. // *Journal of the Brazilian Chemical Society*. – 1998. – №3(9). – P. 199-201. – doi:10.1590/S0103-50531998000300002.
4. **Ortega, M.** Triglyceride transesterification in heterogeneous reaction system with calcium oxide as catalyst / **M. Ortega, A. Hurtado, S. Duarte** // *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. – 2011. – №57. – P. 7-13.
5. **Buasri, A.** Utilization of Scallop Waste Shell for Biodiesel Production from Palm Oil – Optimization Using Taguchi Method / **A. Buasri, P. Worawanitchaphong, S. Trongyong, V. Loryuenyong** // *APCBEE Procedia*. – 2014. – №8. – P. 216-221. – doi: 10.1016/j.apcbee.2014.03.030.
6. **Yang, R.** One-pot process combining transesterification and selective hydrogenation for biodiesel production from starting material of high degree of unsaturation / **R. Yang, M. Su, M. Li et al** // *Bioresource Technology*. – 2010. – №101. – P. 5903-5909. – doi: 10.1016/j.biortech.2010.02.095.
7. **Annam, R. A.** Comparison of Homogeneous Base Catalysts and Heterogeneous Base Catalysts for Biodiesel Transesterification of Waste Cooking Oil / **R. A. Annam, K. J. Aravindh** // *International Journal of ChemTech Research*. – 2015. – №2(8). – P. 651-654.
8. **Liu, Y.** Transesterification of poultry fat with methanol using Mg–Al hydrotalcite derived catalysts / **Y. Liu, E. Lotero, J. Goodwin Jr., X. Mo** // *Applied Catalysis A: General*. – 2007. – №331. – P. 138-148. – doi: 10.1016/j.apcata.2007.07.038.
9. **Yang, L.** Promotional Effect of Transition Metal Doping on the Properties of KF/CaO Catalyst for Biodiesel Synthesis / **L. Yang, P. Lv, Z. Wang et al.** // *International Journal of Green Energy*. – 2017. – №14(9). – P. 784-791. – doi: 10.1080/15435075.2017.1330752.
10. **Мельник, Ю. Р.** Алкоголіз тригліцеридів етанолом у присутності катіоніту КУ-2-8, модифікованого іонами металів / **Ю. Р. Мельник, З. Ю. Палюх, С. Р. Мельник** // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. – 2015. – №3(220). – С. 78–82.
11. **Bournay, L.** New heterogeneous process for biodiesel production: A way to improve the quality and the value of the crude glycerin produced by biodiesel plants / **L. Bournay, D. Casanave, B. Delfort et al.** // *Catalysis Today*. – 2005. – №106. – P. 192–190. – doi: 10.1016/j.cattod.2005.07.181.
12. **Varala, R.** Sulfated tin oxide (STO) – Structural properties and application in catalysis: A review / **R. Varala, V. Narayana, R. S. Kulakarn et al.** // *Arabian Journal of Chemistry*. – 2016. – №9(4). – P. 550-573. – doi: 10.1016/j.arabjc.2016.02.015.
13. **Мельник, Ю. Р.** Гетерогенно-каталітична трансестерифікація триолеату гліцерину в полі ультразвукових хвиль / **Ю. Р. Мельник, Р. О. Старчевський** // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2016. – №42 (1214). – С. 188-192. – doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.30.
14. **Палюх, З. Ю.** Алкоголіз тригліцеридів етанолом у присутності солей двовалентних металів / **З. Ю. Палюх, Ю. Р. Мельник, С. Р. Мельник** // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2017. – №23(1245). – С. 158-163. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.25.



References (transliterated)

1. **Van Gerpen, J.** Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, 2005, **86**, 1097-1107, doi: 10.1016/j.fuproc.2004.11.005.
2. **Leung, D. Y., Wu, X., Leung, H. M.** A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 2010, **87**, 1083-1095, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.10.006
3. **Schuchardt, U. Sercheli, R., Vargas, R.M.** Transesterification of Vegetable Oils: a Review. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 1998, **9**(3), 199–201, doi: 10.1590/S0103-50531998000300002.
4. **Ortega, M. Hurtado, A., Duarte, S.** Triglyceride transesterification in heterogeneous reaction system with calcium oxide as catalyst. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. 2011. **57**, 7–13.
5. **Buasri, A., Worawanitchaphong, P., Trongyong, S., Loryuenyong, V.** Utilization of Scallop Waste Shell for Biodiesel Production from Palm Oil – Optimization Using Taguchi Method. *APCBEE Procedia*, 2014, **8**, 216-221, doi: 10.1016/j.apcbee.2014.03.030.
6. **Yang, R., Su, M., Li, M., Zhang, J., Hao, X., Zhang, H.** One-pot process combining transesterification and selective hydrogenation for biodiesel production from starting material of high degree of unsaturation. *Bioresource Technology*, 2010, **101**, 5903–5909, doi: 10.1016/j.biortech.2010.02.095.
7. **Annam, R. A., Aravindh, K. J.** Comparison of Homogeneous Base Catalysts and Heterogeneous Base Catalysts for Biodiesel Transesterification of Waste Cooking Oil. *International Journal of ChemTech Research*, 2015, **2**(8), 651–654.
8. **Liu, Y., Lotero, E., Goodwin Jr., J., Mo, X.** Transesterification of poultry fat with methanol using Mg–Al hydrotalcite derived catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 2007, **331**, 138-148, doi: 10.1016/j.apcata.2007.07.038.
9. **Yang, L., Lv, P., Wang, Z., Yuan, Z., Luo, W., Li, H., Yu, L., Sun, H.** Promotional Effect of Transition Metal Doping on the Properties of KF/CaO Catalyst for Biodiesel Synthesis. *International Journal of Green Energy*, 2017, **14**(9), 784–791, doi: 10.1080/15435075.2017.1330752.
10. **Melnyk, Yu. R., Paliukh, Z. Yu., Melnyk, S. R.** Alkoholiz tryhlytserydiv etanolom u prysutnosti kationitu KU-2-8, modyfikovanoho ionamy metaliv. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia [Bulletin of the Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University]*, 2015, **3**(220), 78-82.
11. **Bournay, L., Casanave, D., Delfort, B., Hillion, G., Chodorge, J. A.** New heterogeneous process for biodiesel production: A way to improve the quality and the value of the crude glycerin produced by biodiesel plants. *Catalysis Today*, 2005, **106**, 192-190, doi: 10.1016/j.cattod.2005.07.181.
12. **Varala, R., Narayana, V., Kulakarni, S. R., Khan, M., Alwarthan, A., Adil, S. F.** Sulfated tin oxide (STO) – Structural properties and application in catalysis: A review. *Arabian Journal of Chemistry*, 2016, **9**(4), 550-573, doi: 10.1016/j.arabjc.2016.02.015.
13. **Melnyk, Yu., Starchevskiy, R.** Heterogeneous catalytic transesterification of glycerol trioleate in the field of ultrasonic waves. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, 2016, **42** (1214), 188-192, doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.30.
14. **Palyukh, Z., Melnyk, Yu., Melnyk, S.** Transesterification of triglycerides by ethanol in the presence of divalent metal salts. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, 2017, **23** (1245), 158-163, doi: 10.20998/2413-4295.2017.23.25.

Сведения об авторах (About authors)

**Мельник Юрій Романович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри технології органічних продуктів; ORCID: 0000-0003-0109-5526; e-mail: yurii.r.melnyk@lpnu.ua.

**Yurii Melnyk** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Lviv Polytechnic National University, Associate Professor at the Department of Organic Products Technology; ORCID: 0000-0003-0109-5526; e-mail: yurii.r.melnyk@lpnu.ua.

**Старчевський Роман Олександрович** – аспірант, Національний університет «Львівська політехніка», студент кафедри технології органічних продуктів; ORCID: 0000-0002-7458-4585; e-mail: star\_roma@ukr.net.

**Roman Starchevskiy** – Postgraduate, National University Lviv Polytechnic, Student at the Department of Technology of Organic Materials; ORCID: 0000-0002-7458-4585; e-mail: star\_roma@ukr.net.

**Мельник Степан Романович** – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри технології органічних продуктів; ORCID: 0000-0002-0629-9723; e-mail: stepan.r.melnyk@lpnu.ua.

**Stepan Melnyk** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Lviv Polytechnic National University, Professor at the Department of Organic Products Technology; ORCID: 0000-0002-0629-9723, e-mail: stepan.r.melnyk@lpnu.ua.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Мельник, Ю. Р.** Трансестерифікація тригліцеридів етанолом у оксидів металів / **Ю. Р. Мельник, Р. О. Старчевський, С. Р. Мельник** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 132-138. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.17.

*Please cite this article as:*

**Melnyk, Yu., Starchevskiy, R., Melnyk, S.** Transesterification of triglycerides by ethanol in the presence of metal oxides. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 132-138, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.17.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Мельник, Ю. Р.** Переэтерификация триглицеридов этанолом в присутствии оксидов металлов / **Ю. Р. Мельник, Р. О. Старчевский, С. Р. Мельник** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 132-138. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.17.

**АННОТАЦИЯ** Целью исследований было определение закономерностей процесса переэтерификации триглицеридов подсолнечного масла этанолом в присутствии катализаторов – оксидов цинка (ZnO), никеля (NiO), железа (FeO), меди (CuO) и кобальта (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Исследования проводили при температуре 338 К и мольном соотношении триглицериды: этанол – 1: (3,8–4,1). Установлено, что вид оксида металла влияет как на начальную скорость реакции, так и на достигнутую конверсию триглицеридов. Показано, что наибольшая часть триглицеридов реагирует в течение первых 30 мин процесса с достижением конверсии от 39,5% (в присутствии Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) до 76,7 % (ZnO). В последующие 120 мин наименьший прирост конверсии триглицеридов составляет 18,6% в присутствии ZnO, а наибольший – 30,6 % при катализе CuO. По результатам исследований предложен ряд активности оксидов металлов в реакции переэтерификации триглицеридов этанолом. Установлено, что наивысшую активность в реакции переэтерификации триглицеридов подсолнечного масла этанолом проявляют оксиды цинка и никеля. В их присутствии 150 мин реакции достигается конверсия триглицеридов 95,3 и 94,2%, соответственно. В то же время низкую активность проявляют оксиды кобальта. Показано, что установленные закономерности изменения активности оксидов металлов коррелируют с результатами, полученными в ходе исследования переэтерификации триглицеридов этанолом в присутствии катионитов КУ-2-8 с иммобилизованными ионами металлов за исключением катионита с иммобилизованными ионами кобальта (II), который в отличие от оксидов кобальта демонстрирует достаточно высокую каталитическую активность. Для самого активного катализатора (оксида цинка) исследовано влияние соотношения реагентов на конверсию сырья. Установлено, что увеличение мольного соотношения триглицериды : этанол с 1 : 3,8 до 1 : 4,1 влияет как на начальную скорость реакции, так и на максимальную конверсию триглицеридов. Показано, что даже незначительное увеличение мольного соотношения триглицериды : этанол позволяет повысить конверсию триглицеридов на 2,5 %. Выполненные исследования показывают возможность использования оксидов цинка и никеля в реакции переэтерификации триглицеридов этанолом.

**Ключевые слова:** переэтерификация; подсолнечное масло; триглицериды; этанол; оксиды никеля, цинка, железа, меди, кобальта

Поступила (received) 14.02.2019

УДК 628.16

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.18

## ПОЛУЧЕНИЕ ОКИСЛИТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

В. Г. МИХАЙЛЕНКО, О. И. ЛУКЬЯНОВА, З. П. ГИЛЬ

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, УКРАИНА  
e-mail: port342017@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** Негативные последствия использования химических технологий для очистки природных и сточных вод послужили толчком для развития более чистых технологий. Все чаще используются чистые окислители (озон, пероксид водорода) в сочетании с физическими методами. Наиболее широко применяется обработка воды ультрафиолетовым излучением. Есть много публикаций об образовании окислителей при обработке загрязненной воды ультразвуком и гидродинамической кавитацией. В данной статье исследовалось образование окислителей при воздействии физических полей (магнитное поле постоянных магнитов, электромагнитное поле ультрафиолетового излучения, акустическое поле ультразвуковых излучателей) на дистиллированную воду. Эксперименты проводились на стенде, где возможно осуществлять раздельное и совместное влияние различных комбинаций физического воздействия. Проведенные эксперименты показали, что в дистиллированной воде под действием различных электромагнитных полей и постоянного магнитного поля наблюдается генерация окислителей. Но их концентрация мала (0,03-0,07 мг/л в пересчете на перекись водорода) и для интенсификации воздействия физических полей необходимо вносить дополнительные реагенты (перекись, озон и др.). Определено, что действие магнитного поля наблюдается при индукциях магнитного поля: 80, 100, 240 и 540 мТл, и скорости потока воды через зазор магнитного аппарата 1,1 м/с, 3,3 м/с и 4,4 м/с. Максимальная концентрация окислителей наблюдалась: при гидродинамическом режиме (все реакторы отключены, работает только насос), при включенном эжекторе и индукции 540 мТл; при совмещенном УЗ+2УФ режиме при такой же индукции, но без эжектора. Количественно содержание окислителей в совмещенном режиме на 11,5 % выше, чем в гидродинамическом режиме, а энергозатраты при этом выше на 28 %. Выраженный синергетический эффект при совместном действии магнитного поля, ультразвука и ультрафиолетового излучения не получен. Устойчивый результат увеличения генерации окислителей в дистиллированной воде получен при воздействии магнитного поля в сочетании с эжектором.

**Ключевые слова:** окислители; воздействия физических полей; магнитное поле; ультрафиолетовое излучение; ультразвук; эжектор.

## OBTAINING OF OXIDIZERS USING PHYSICAL FIELDS

V. MYKHAYLENKO, O. LUKIANOVA, Z. GIL

A. Podgorny institute of mechanical engineering problems NAS of Ukraine, Kharkov, UKRAINE

**ABSTRACT** The negative consequences of the use of chemical technologies for the treatment of natural and waste waters have been the impetus for the development of cleaner technologies. Pure oxidizers (ozone, hydrogen peroxide) are used more often in combination with physical methods. Treatment of water by ultraviolet radiation is most widely used. There are many publications on the formation of oxidizing agents in the treatment of contaminated water by ultrasound and hydrodynamic cavitation. In this article, the formation of oxidizers under the influence of physical fields (magnetic field of permanent magnets, electromagnetic field of ultraviolet radiation, and acoustic field of ultrasonic emitters) on distilled water was investigated. The experiments were carried out on the stand, where it is possible to carry out the separate and joint effects of various combinations of physical effects. The conducted experiments have shown that in distilled water, under the action of various electromagnetic fields and a constant magnetic field, oxidizers are generated. But their concentration is low (0,03-0,07 mg/l in terms of hydrogen peroxide) and to intensify the effects of physical fields, it is necessary to add additional reagents (peroxide, ozone, etc.). It was determined that the effect of the magnetic field is observed with magnetic induction of 80, 100, 240 and 540 mT, and the flow rate of water through the magnetic apparatus gap is 1,1 m/s, 3,3 m/s and 4,4 m/s. The maximum concentration of oxidizing agents was observed: in the hydrodynamic mode (all reactors are turned off, only the pump is working) with the ejector turned on and the induction is 540 mT; with combined ultrasonic + 2UF mode with the same induction, but without an ejector. Quantitatively, the content of oxidizers in the combined mode is 11,5% higher than in the hydrodynamic mode, while energy consumption is higher by 28%. The pronounced synergistic effect due to the combined action of a magnetic field, ultrasound and ultraviolet radiation was not achieved. The stable result of an increase in the generation of oxidizing agents in distilled water was obtained by exposing of magnetic field in combination with an ejector.

**Keywords:** oxidizers; influence of physical fields; magnetic field; ultraviolet radiation; ultrasonic; ejector.

### Введение

В настоящее время отрицательные последствия химических технологий водоподготовки сказываются в глобальных масштабах. В связи с

этим современные технологии очистки природных и сточных вод чаще используют экологически чистые окислители: озон, пероксид водорода, кислород. Для ускорения процесса окисления органических соединений в водной среде

используют комбинированные методы её обработки озоном или пероксидом водорода с катализаторами, ультрафиолетовым излучением (УФ), фотокатализаторами, ультразвуком (УЗ), электрическим разрядом и другими физическими воздействиями [1].

Из физических методов в комбинации с окислителями и без них наиболее широкое применение нашёл УФ [2, 3].

Часть присутствующего в воде кислорода под действием УФ-излучения трансформируется в озон, а молекулы воды образуют радикалы, являющиеся сильными окислителями в т. ч. перекись водорода. Возможно также протекание фотостимулированных реакций разложения органических соединений [4].

Среди указанных методов ультразвук используется редко, несмотря на уникальные возможности последнего в жидкой среде, приближающие его к методам «химии высоких энергий».

При воздействии мощного ультразвука на жидкость возникают специфические физические, химические и биологические эффекты, такие как кавитация, капиллярный эффект, диспергирование, эмульгирование, дегазация, обеззараживание, локальный нагрев и многие другие [5, 6].

Наиболее важным результатом кавитации является инициализация свободно-радикальных реакций, в первую очередь, благодаря образованию гидроксильного радикала – самого сильного окислителя из всех известных [7].

Химические процессы, протекающие под воздействием акустической кавитации, достаточно хорошо изучены [8], однако существуют не так много примеров применения гидродинамической кавитации для окисления примесей в воде [9].

Авторами работ [10, 11] показано, что нет необходимости в больших затратах энергии, применяя высоконапорную струйную кавитацию, ультразвук или роторную кавитацию, поскольку и при более низких давлениях (<10 атм), характерных для низконапорной гидродинамической кавитации (НГДК), возможно эффективное окисление примесей в воде.

Таким образом, проблема обработки воды физическими полями с целью получения окислителей достаточно хорошо проработана.

### Постановка задачи

В большинстве случаев вышеописанные методы использовались в сочетании с готовыми окислителями, а исследования проводились на загрязнённых водах. Важно определить вклад самих физических методов в образование окислителей, исключить влияние загрязнений и добиться синергетического эффекта для уменьшения энергоёмкости процесса.

### Цель работы

Определение возможности образования окислителей при воздействии различных физических полей (магнитное поле постоянных магнитов, электромагнитное поле ультрафиолетового излучения, акустическое поле ультразвуковых излучателей) на дистиллированную воду.

### Изложение основного материала

Для проведения исследований разработан и изготовлен стенд для комплексного и раздельного физического воздействия на воду (рис.1). Стенд включает в себя насос (гидродинамический режим-ГД), магнитный активатор (МА), эжектор, работающий в режиме всаса воздуха (в данном эксперименте система генерации кислорода отключена), реакторы ультрафиолетового (УФ-режим) и ультразвукового воздействия (УЗ-режим).

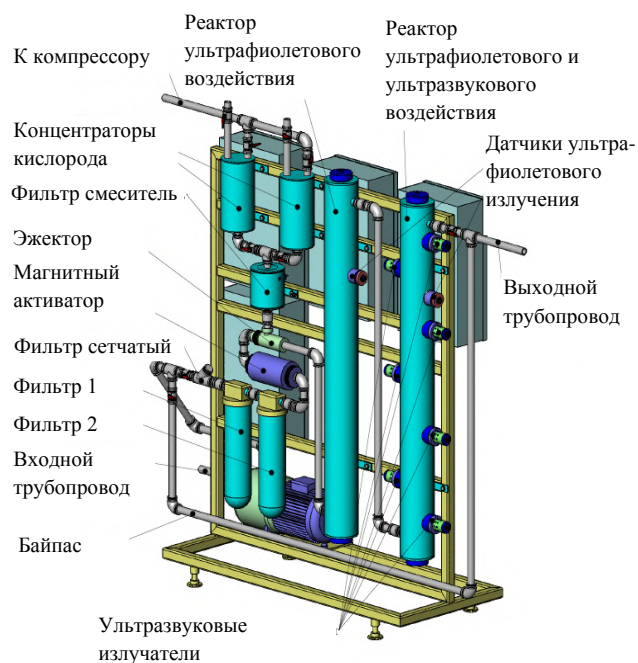


Рис.1 — Стенд для комплексного физического воздействия на воду

Технические характеристики стенда приведены в табл. 1.

Эксперимент заключался в следующем:

Исходная дистиллированная вода (не дегазированная с удельной проводимостью 0,5 мСм/м) насосом через фильтры подавалась поочередно в реакторы физических воздействий. Расход воды измерялся ротаметром LZS-25 и менялся от 100 до 800 дм<sup>3</sup>/час (с шагом 100 дм<sup>3</sup>/час). Индукция измерялась тесламетром

ЭМ4305(диапазон измерения от 0 до 600 мТл с шагом 20 мТл). Реакторы включались по отдельности и при их различной комбинации. Кроме того дополнительно наблюдалось влияние эжектора на процессы электромагнитной обработки воды. Пробы отбирались через выходной трубопровод на 11 мин после начала эксперимента, и измерялось количество окислителей.

Эксперимент проводился три раза; результатом считалось среднее арифметическое полученных числовых значений.

Концентрация окислителей определялась известным йодометрическим методом. Чтобы повысить чувствительность анализа он был модифицирован в фотометрический вариант.

В 25 мл обработанной пробы прибавлялись реактивы: 5 мл 10 % KI, 10 мл 2 Н раствора H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и 0,2 мл 0,5 % раствора крахмала. Параллельно для холостой пробы использовалась исходная дистиллированная вода.

Таблица 1 – Технические характеристики стенда

Основные параметры	Значения
Диапазон регулирования индукции поля магнитного активатора, Тл	0-0,6
Удельная бактерицидная энергия ультрафиолетового излучателя, мДж/см <sup>2</sup>	20,0
Приведенная мощность ультразвукового излучателя, Вт/см <sup>2</sup>	2,0
Количество ультрафиолетовых излучателей, шт.	2
Количество ультразвуковых излучателей, шт.	7
Потребляемая мощность от сети 220 В 50 Гц, Вт (без насоса)	800,0
Габаритные размеры, мм	500x1400 x1200
Масса, кг	100

Пробы выдерживались в течение 30 мин и определялась оптическая плотность на колориметре КФК-2 с использованием зеленого светофильтра ( $\lambda=540$  нм), длина кюветы 100 мм. Затем по калибровочному графику определялась концентрация окислителей в мг/л. Калибровочная кривая строилась по модельным растворам перекиси водорода H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> с заданной концентрацией: 0,1; 0,08; 0,06; 0,04; 0,02 мг/л. Концентрация исходного раствора перекиси 0,005Н для модельных растворов определялась по титрованному раствору KMnO<sub>4</sub> с концентрацией 0,01 Н.

### Результаты экспериментальных исследований

Результаты экспериментальных исследований выборочно приведены в виде графиков (рис. 2-5).

В нижеприведенных графиках показаны только те результаты, в которых наблюдалось существенное

изменение концентрации окислителей. Вследствие того, что химический метод определения концентрации окислителей имеет очень малую разрешающую способность, одни кривые на графиках могут затенять другие.

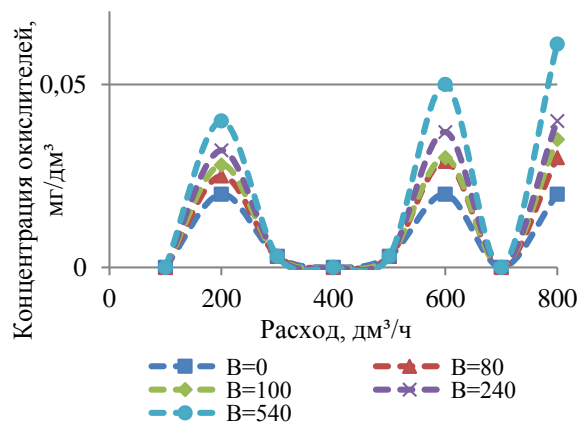


Рис. 2 — Зависимость концентрации окислителей от расхода воды при разных индукциях магнитного поля в ГД режиме

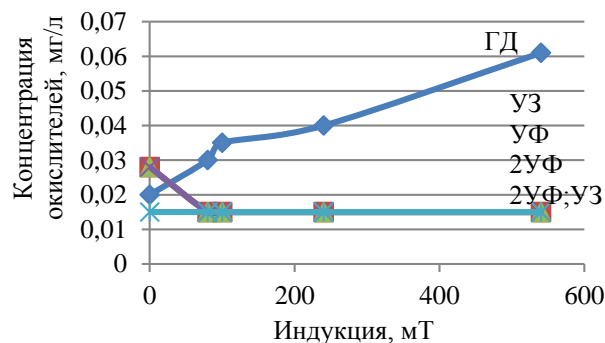


Рис. 3 — Зависимость концентрации окислителей от индукции магнитного поля при разных режимах и расходе воды 800 дм<sup>3</sup>/час с эжектором

В ходе экспериментов было выявлено, что действие магнитного поля на генерацию окислителей в дистиллированной воде наблюдается при определенных расходах (200, 600, 800 дм<sup>3</sup>/час). Это соответствует скорости потока воды через зазор магнитного аппарата – 1,1 м/с, 3,3 м/с и 4,4 м/с соответственно. Эффект наблюдался при индукциях магнитного поля –80, 100, 240 и 540 мТл. Включение эжектора увеличивает генерацию окислителей в ГД-режиме. С увеличением индукции магнитного поля увеличивается количество окислителей. В случае УЗ-режима генерация окислителей не наблюдалась, как при включении магнитного поля и эжектора, а также без них. Отсутствует и выраженное влияние магнитного поля на генерацию окислителей под действием УФ. Только увеличение мощности

излучения (включение 2-х реакторов УФ-излучения) позволило повысить концентрацию окислителей.

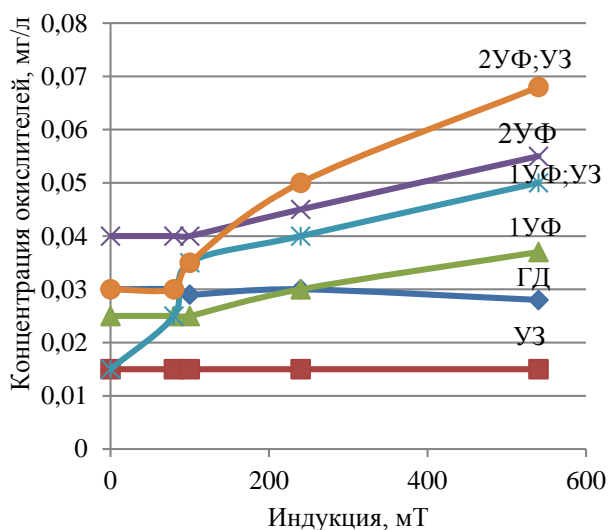


Рис. 4 — Зависимость концентрации окислителей от индукции магнитного поля при разных режимах и расходе воды 800 дм³/час без эжектора

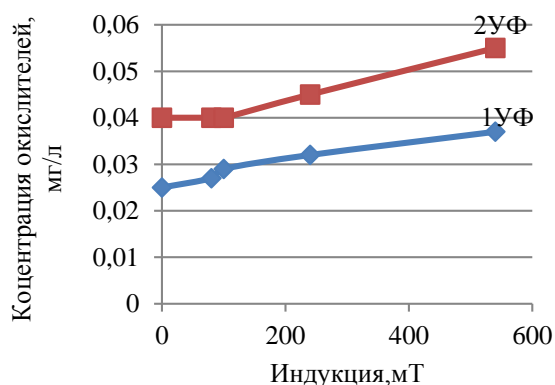


Рис. 5 — Зависимость концентрации окислителей от индукции магнитного поля при различной интенсивности УФ излучения без эжектора (расход 800 дм³/час)

Сочетание УФ и УЗ повышает концентрацию окислителей, в функции индукции магнитного поля только при отключенном эжекторе. Минимальная концентрация окислителей генерируется: в гидродинамическом режиме (все реакторы отключены, работает только насос) без воздействия магнитного поля и без эжектора; в режимах с эжектором при наличии магнитного поля и (или) ультрафиолетового облучения, и (или) ультразвукового воздействия.

Максимальную концентрацию окислителей наблюдали в гидродинамическом режиме при

включенном эжекторе и индукции 540 мТл, и при совмещенном УЗ+2УФ режиме при такой же индукции, но без эжектора. Количественно содержание окислителей в совмещенном режиме на 11,5 % выше, чем в гидродинамическом режиме, а энергозатраты при этом выше на 28 %.

### Выводы

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что в дистиллированной воде под действием различных электромагнитных полей и постоянного магнитного поля наблюдается генерация окислителей. Но их концентрация мала (0,03-0,07 мг/л в пересчете на перекись водорода) и для интенсификации воздействия физических полей необходимо вносить дополнительные реагенты (перекись, озон и др.). Возможно, часть образующихся окислителей разлагалась не найдя объекта для взаимодействия, что уменьшило их количество при определении. Выраженный синергетический эффект при совместном действии магнитного поля, ультразвука и ультрафиолетового излучения на генерацию окислителей не получен.

Устойчивый результат увеличения генерации окислителей в дистиллированной воде получен при воздействии магнитного поля в сочетании с эжектором.

### Список литературы

1. Вакуленко, В. Ф. Применение комбинированных окислительных процессов для очистки природных и сточных вод (Обзор) / В. Ф. Вакуленко // *Экотехнологии и ресурсосбережение*. – 2006. – № 6. – С. 47-58.
2. Braun, F. V. How to evaluate photochemical methods for water treatment / F. Braun, E. Oliveros // *Water Sci. and Technol.* – 1997. – Vol. 35, № 4. – P. 17-23. – doi:10.2166/wst.1997.0076.
3. Коверга, А. В. Пилотные испытания ультрафиолетового обеззараживания на московских станциях водоподготовки / А. В. Коверга, С. В. Костюченко, И. Ю. Арутюнова // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2008. – № 4. – С. 15-20.
4. Гончарук, В. В. Фотокаталитическое деструктивное окисление органических соединений в водных средах / В. В. Гончарук // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 1997. – № 5. – С. 345-355.
5. Агранат, Б. А. Основы физики и техники ультразвука: Учеб. пособие для вузов / Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин, Н. Н. Хавский [и др.]. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.
6. Келлер, О. К. Ультразвуковая очистка / О. К. Келлер, Г. С. Кратыш, Г. Д. Лубяницкий – Л., Машиностроение, 1977. – 184 с.
7. Warden, P. Reduction Potentials of One-Electron Couples Involving Free Radicals an Aqueous Solutions / P. Warden // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. – 1989. – V. 18, № 4. – P. 1637-1756. – doi:10.1063/1.555843.



8. **Василяк, Л. М.** Применение ультразвука в системах для обеззараживания воды / **Л. М. Василяк** // *Электронная обработка материалов*. – 2010. – № 5. – С. 106-111.
9. **Асеев, Д. Г.** Влияние гидродинамической кавитации на скорость образования ОН-радикалов в присутствии пероксида водорода / **Д. Г. Асеев, А. А. Батоева** // *Журнал физической химии*. – 2014. – Т. 88, № 1. – С. 33–36. – doi:10.7868/S0044453713120030.
10. **Sivakumar, M.** Wastewater treatment: a novel energy efficient hydrodynamic cavitation technique / **M. Sivakumar, A. Pandit** // *Ultrason. Sonochem.* – 2002. – № 9. – P. 123-131. – doi:10.1016/S1350-4177(01)00122-5.
11. **Gogate, P. R.** Cavitation reactors: efficiency analysis using a model reaction / **P. R. Gogate, I. Z. Shirgaonkar, M. Sivakumar, [et al.]** // *AIChE J.* – 2001. – Vol. 47, № 11. – P. 2526-2538. – doi:10.1002/aic.690471115.
- Vodosnabzheniye i santekhnika [Water supply and sanitary equipment]**, 2008, **4**, 15-20.
4. **Goncharuk, V. V.** Fotokataliticheskoye destruktivnoye okisleniye organicheskikh soyedineniy v vodnykh sredakh [Photocatalytic destructive oxidation of organic compounds in aqueous environments]. *Khimiya ustoychivogo razvitiya [Chemistry for Sustainable Development]*, 1997, **5**, 345-355.
5. **Agranat, B. A., Dubrovin, M. N., Khavskiy N. N. [et al.]** Osnovy fiziki i tekhniki ultrazvuka: Ucheb. posobiye dlya vuzov [Fundamentals of physics and technology of ultrasound: Proc. manual for universities]. M., Vyssh. shk., 1987, 352.
6. **Keller, O. K., Kratysh, G. S., Lubyanskiy, G. D.** Ultrazvukovaya ochildka [Ultrasonic cleaning]. L., Mashinostroyeniye, 1977, 184.
7. **Wardan, P.** Reduction Potentials of One-Electron Couples Involving Free Radicals an Aqueous Solutions. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1989, **18**, 4, 1637-1756, doi:10.1063/1.555843.
8. **Vasilyak, L. M.** Primeneniye ultrazvuka v sistemakh dlya obezzarazhivaniya vody [The use of ultrasound in systems for water disinfection]. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2010, **5**, 106-111.
9. **Aseyev, D. G., Batoyeva A. A.** Vliyaniye gidrodinamicheskoy kavitatsii na skorost' obrazovaniya OH radikalov v prisutstvii peroksida vodoroda. *Zhurnal fizicheskoy khimii [Journal of Physical Chemistry]*, 2014, **88**, 1, 33–36, doi:10.7868/S0044453713120030.
10. **Sivakumar, M. Pandit, A.** Water treatment: a novel energy efficient hydrodynamic cavitation technique. *Ultrason. Sonochem.*, 2002, **9**, 123-131, doi:10.1016/S1350-4177(01)00122-5.
11. **Gogate, P. R., Shirgaonkar, I. Z., Sivakumar, M. [et al.]** Cavitation reactors: efficiency analysis using a model reaction. *AIChE J.*, 2001, **47**, 2526-2538, doi:10.1002/aic.690471115.

#### References (transliterated)

1. **Vakulenko, V. F.** Primeneniye kombinirovannykh okislitelnykh protsessov dlya ochildki prirodnykh i stochnykh vod (Obzor) [The use of combined oxidative processes for the purification of natural and waste waters]. *Ekotekhnologii i resursoberezheniye [Ecotechnologies and resource saving]*, 2006, **6**, 47-58.
2. **Braun, F. V. Oliveros, E.** How to evaluate photochemical methods for water treatment. *Water Sci. and Technol.*, 1997, **35**, 4, 17-23, doi:10.2166/wst.1997.0076.
3. **Koverga, A. V., Kostyuchenko, S. V., Arutyunova, I. Yu.** Eksperimentalnyye ispytaniya ultrafioletovoy dezinfektsii na moskovskikh stantsiyakh ochildki vody.
4. **Vakulenko, V. F.** Primeneniye kombinirovannykh okislitelnykh protsessov dlya ochildki prirodnykh i stochnykh vod (Obzor) [The use of combined oxidative processes for the purification of natural and waste waters]. *Ekotekhnologii i resursoberezheniye [Ecotechnologies and resource saving]*, 2006, **6**, 47-58.
5. **Braun, F. V. Oliveros, E.** How to evaluate photochemical methods for water treatment. *Water Sci. and Technol.*, 1997, **35**, 4, 17-23, doi:10.2166/wst.1997.0076.
6. **Koverga, A. V., Kostyuchenko, S. V., Arutyunova, I. Yu.** Eksperimentalnyye ispytaniya ultrafioletovoy dezinfektsii na moskovskikh stantsiyakh ochildki vody.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Михайленко Владимир Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина; e-mail: port342017@gmail.com.

**Vladimir Mihaylenko** – Ph.D., Docent, A. Podgorny institute of mechanical engineering problems NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine; e-mail: port342017@gmail.com.

**Лукьянова Ольга Ивановна** – ведущий инженер, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина; e-mail: port342017@gmail.com.

**Olga Lukianova** – lead engineer, A. Podgorny institute of mechanical engineering problems NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine; e-mail: port342017@gmail.com.

**Гиль Зинаида Петровна** – ведущий инженер, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина; e-mail: port342017@gmail.com.

**Zina Gil** – lead engineer, A. Podgorny institute of mechanical engineering problems NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine; e-mail: port342017@gmail.com.

*Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Михайленко, В. Г.** Получение окислителей с использованием физических полей / **В. Г. Михайленко, О. И. Лукьянова, З. П. Гиль** // *Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 139-144. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.18.

*Please cite this article as:*

**Mykhalenko, V., Lukianova, O., Gil, Z.** Obtaining of oxidizers using physical fields. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: New Solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2019, **5** (1330), 139-144, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.18.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

**Михайленко, В. Г.** Отримання окислювачів з використанням фізичних полів / **В. Г. Михайленко, О. І. Лук'янова, З. П. Гіль** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 139-144. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.18.

**АНОТАЦІЯ** Негативні наслідки використання хімічних технологій для очищення природних і стічних вод послужили поштовхом для розвитку більш чистих технологій. Все частіше використовуються чисті окислювачі (озон, пероксид водню) в поєднанні з фізичними методами. Найбільш широко застосовується обробка води ультрафіолетовим випромінюванням. Існує багато публікацій про отримання окислювачів при обробці забрудненої води ультразвуком і гідродинамічною кавітацією. У даній статті досліджувалось отримання окислювачів при впливі фізичних полів (магнітне поле постійних магнітів, електромагнітне поле ультрафіолетового випромінювання, акустичне поле ультразвукових випромінювачів) на дистильовану воду. Експерименти проводилися на стенді, де можливо здійснювати роздільну і спільну дію різних комбінацій фізичного впливу. Проведені експерименти показали, що в дистильованій воді під дією різних електромагнітних полів і постійного магнітного поля спостерігається генерація окислювачів. Але їх концентрація мала (0,03-0,07 мг/л у перерахунку на пероксид водню) і для інтенсифікації впливу фізичних полів необхідно вносити додаткові реагенти (перекис, озон та ін.). Визначено, що дія магнітного поля спостерігається при індукціях магнітного поля 80, 100, 240 і 540 мТл, і швидкості потоку води через зазор магнітного апарату 1,1 м/с, 3,3 м/с і 4,4 м/с. Максимальна концентрація окислювачів спостерігалася: при гідродинамічному режимі (всі реактори відключені, працює тільки насос) при включеному ежекторі і індукції 540 мТл; при суміщеному УЗ + 2УФ режимі при такій же індукції, але без ежектору. Кількісно вміст окислювачів в суміщеному режимі на 11,5 % вище, ніж в гідродинамічному режимі, але при цьому енерговитрати вище на 28 %. Виражений синергетичний ефект при спільній дії магнітного поля, ультразвуку та ультрафіолетового випромінювання не отриманий. Стійкий результат збільшення генерації окислювачів в дистильованій воді отриманий при впливі магнітного поля в поєднанні з ежектором.

**Ключові слова:** окислювачі, вплив фізичних полів; магнітне поле; ультрафіолетове випромінювання; ультразвук; ежектор

Поступила (received) 18.02.2019

УДК 664.64.016

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.19

## ВПЛИВ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБКИ АМАРАНТУ І ЧІА НА ЯКІСТЬ ХЛІБА

С. Ю. МИКОЛЕНКО\*, Л. Ю. ЦАРУК, Ю. О. ЧУРСІНОВ

кафедра технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, УКРАЇНА

\*e-mail: svetlana.mykolenko@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** У статті розглянуто особливості хімічного складу, функціонально-технологічних властивостей та біологічної активності нетрадиційної для хлібопекарського виробництва сировини, а саме амарантового борошна, амарантових висівок, амарантової олії і чіа, які відносяться до харчових компонентів, що містять значну кількість поживних і біологічно активних речовин. Визначено, що асортимент хліба оздоровчого призначення на українському ринку є досить обмеженим, тому його збагачення біологічно активними речовинами природнього походження буде сприяти розширенню продукції функціонального призначення. Встановлено, що амарантове борошно має підвищений вміст білка (15 %) та клітковини (4,4 %) порівняно з пшеничним. Виявлено особливості жирокислотного складу амарантової олії, одержаної методом вакуумної екстракції, 90 % якої становить лінолева, олеїнова, арахідонова і пальмітинова кислоти. Встановлено високий вміст в амарантовій олії лінолевої (41 %) та архідонової (16 %) кислот, які є незамінними та володіють високою біологічною активністю. Виявлено особливості впливу продуктів переробки амаранту і чіа на формування якості пшеничного хліба. Застосування продуктів переробки амаранту – борошна і висівок – суттєво не позначається на погіршенні споживчих характеристик при їх введенні у рецептуру в кількості 5–10 % до маси борошна, а застосування 2–6 % амарантової олії у складі рецептури пшеничного хліба є недоцільним. Додавання чіа як сировини з вираженими функціональними властивостями у кількості 5–15 % до маси пшеничного борошна позитивно позначається на об'ємному виході продукту та органолептичних властивостях хліба. Доведено, що введення амарантового борошна у рецептуру хліба забезпечує поліпшення мінерального складу продукту, а саме його збагачення цинком, фосфором і кальцієм у 1,5–2,5 рази порівняно з пшеничним хлібом без добавок. При вживанні пшеничного хліба, виготовленого із додаванням насіння чіа, організм людини буде додатково забезпечений кальцієм, фосфором, міддю, кількості яких зростає у 2 і 10 разів відповідно. Встановлено, що вживання пшеничного хліба із додаванням амарантового борошна і чіа забезпечує харчовими волокнами на 54 % від добової потреби, а також сприяє поліпшенню амінокислотного складу виробів за рахунок зростання вмісту незамінних амінокислот.

**Ключові слова:** амарантове борошно; амарантові висівки; амарантова олія; насіння чіа; пшеничне борошно; хліб; біологічна цінність

## EFFECT OF AMARANTH PRODUCTS AND CHIA ON BREAD QUALITY

S. MYKOLENKO, L. TSARUK, Yu. CHURSINOV

Department of Agricultural Products Storage and Processing Technologies, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, UKRAINE

**ABSTRACT** The article deals with the features of chemical composition, functional, technological properties and biological activity of non-traditional baking raw materials such as amaranth flour, amaranth bran, amaranth oil and chia seeds, which are related to food components containing a significant amount of nutrients and biologically active substances. It is determined that the range of health-improving breads on the Ukrainian market is quite limited; therefore its enrichment with biologically active substances of natural origin will promote the expansion of functional products. Amaranth flour has been found to have high protein (15%) and fiber (4.4%) content compared to wheat one. The fatty acid composition of amaranth oil obtained by vacuum extraction is revealed and 90% of it consists of linoleic, oleic, arachidonic and palmitic acids. In amaranth oil high content of linoleic (41%) and aridecon (16%) acids has found, which are essential and have high biological activity. The peculiarities of influence of amaranth processed products and chia on the formation of wheat bread quality are determinate. The use of processed amaranth products - flour and bran - does not significantly impact on deterioration of consumer characteristics when they are introduced into the formulation in the amount of 5-10% by weight of wheat flour, and the use of 2-6% amaranth oil in the formulation of wheat bread is inappropriate. The addition of chia as a raw material with high biological value in the amount of 5-15% to the weight of wheat flour positively affects the bulk output of the product and organoleptic properties of the bread. It is proved that the introduction of amaranth flour into the bread formulation improves the mineral composition of the product due to its enrichment with zinc, phosphorus and calcium in 1,5-2,5 times in comparison with wheat bread without additives. When consuming wheat bread made with the addition of chia seeds, the human body will be additionally provided with calcium, phosphorus, copper, whose quantity increases by 2 and 10 times, respectively. It has been established that the use of wheat bread with the addition of amaranth flour and chia provides food fibers by 54% of daily needs, and also contributes to the improvement of amino acid composition of products due to essential amino acids content growth.

**Keywords:** amaranth flour; amaranth fiber; amaranth oil; chia seed; wheat flour; bread; biological value

### Вступ

Останнім часом динаміка стану здоров'я населення України характеризується негативними

тенденціями – зростає кількість аліментарно залежних захворювань (серцево-судинні, ожиріння, діабет, порушення опорно-рухового апарату тощо) [1]. Тобто здоров'я людини значною мірою залежить від її

харчування, зокрема ступеня забезпеченості організму необхідними харчовими речовинами та енергією. Сьогодні науковці в усьому світі працюють над створенням харчових продуктів, які були б багатими і збалансованими за вітамінно-мінеральним складом.

Одним з ефективних способів покращення харчового статусу населення є збагачення продуктів харчування, що вживаються найчастіше, фізіологічно цінними інгредієнтами [2–5]. Хлібобулочні вироби належать до продуктів регулярного споживання, що робить їх перспективним об'єктом із точки зору корегування хімічного складу.

Зерно амаранту і продукти його переробки, що володіють біологічною цінністю, містять широкий спектр фізіологічно функціональних речовин, що визначає перспективи їх використання в технології харчових продуктів [5, 6].

В Україні і світі все більше зростає зацікавленість населення до нетрадиційних видів олійного насіння, зокрема насіння чіа (*Salvia hispanica*) [7–9] як продукту, що має певні корисні властивості для організму людини.

Кількість хлібобулочних виробів, збагачених біологічно активними речовинами, на українському ринку є обмеженою і не перевищує 2–5 % від загального асортименту продукції. Зважаючи на функціональні властивості продуктів переробки амаранту і чіа актуальними є дослідження можливості їх застосування у технології хлібобулочних виробів, що, своєю чергою, сприятиме розширенню асортименту оздоровчої продукції.

### Мета роботи

Метою даної роботи є дослідження функціонально-технологічних властивостей продуктів переробки амаранту і чіа з огляду на формування якості пшеничного хліба та поліпшення його функціонального статусу.

### Виклад основного матеріалу

Першочерговим завданням в одержанні функціонального хліба є підвищення його біологічної цінності. Для проведення досліджень було використана наступна харчова сировина: продукти переробки амаранту (ФОП Пристромко М. П.) – амарантове борошно (прохід сита 0,45, схід з сита 0,25), амарантові висівки (схід сита 0,45), амарантова олія, отримана методом вакуумної екстракції; насіння чіа (чорне, країна походження Мексика); пшеничне борошно вищого сорту ТОВ «Дніпромлин» (вологість 12,6 %, вміст сирової клітковини 2 %, ВДК 60 од. пр.; показник числа падіння 325 с.); дріжджі хлібопекарські пресовані ТМ «Львівські», сіль кухонна харчова.

Вологість досліджуваної сировини визначали термогравіметричним методом (ДСТУ ISO 21415-

2:2009). Жиринокислотний склад амарантової олії визначали методом газової хроматографії (ГОСТ 3041–96); вміст токсичних елементів – шляхом атомно-адсорбційного аналізу. Для визначення впливу продуктів переробки амаранту і чіа на хлібопекарські властивості пшеничного борошна було проведено пробні лабораторні випікання за умови безпартного приготування тіста. Тісто замішували вручну, бродіння здійснювали за температурами 30–32 °С. Хліб випікали в лабораторній печі за температури 220–240 °С. Комплексну оцінку якості проводили за баловою методикою. Фізико-хімічні показники визначали за ДСТУ 7045:2009. Визначення показників біологічної цінності виробів за вмістом вітамінів, мінеральних речовин, харчових волокон, незамінних амінокислот у сировині проводили розрахунковим методом у середовищі MS Excel.

Було визначено особливості хімічного складу борошна (табл. 1).

Таблиця 1 – Фізико-хімічні показники якості борошна

Показник	Вид борошна	
	Пшеничне	Амарантове
Вологість, %	12,6	15,2
Сирий протеїн, %	11,5	14,80
Сирий жир, %	1,2	1,79
Сира клітковина, %	1,9	4,34
Сира зола, %	1,6	2,73

Як видно з табл. 1, вміст клітковини, жиру, протеїну та золи більший в амарантовому борошні порівняно з пшеничним. Також встановлено, що вміст пліснявих грибів у борошні становить 8·10 КУО/г, що відповідає показникам безпеки, які висуваються до борошняної сировини.

Відомо, що амарантове борошно багате такими мінеральними речовинами як залізо, кальцій, калій та вітамінами (табл. 2) [9].

Таблиця 2 – Вміст вітамінів та мінеральних в амарантовому борошні

Вітаміни	Вміст, %	Мінеральні речовини	Вміст, %
Вітамін С	3,0–7,1	Кальцій	215–650
Вітамін Е	1,5–1,8	Мідь	1–4
Вітамін В <sub>9</sub>	42–44	Залізо	21–104
Вітамін РР	1,0–1,5	Магній	300–340
Вітамін В <sub>2</sub>	0,19–0,22	Марганець	3–5
Вітамін В <sub>1</sub>	0,10–0,14	Калій	520–564
Вітамін А	0,02–0,14	Натрій	22–26

Одним із основних продуктів переробки амаранту є амарантова олія, що виступає джерелом сквалену, який володіє рядом фармакологічних властивостей, зокрема, гіполіпідемічною, гепатопротекторною, антиоксидантною дією [10]. На рис. 1 відображено жирнокислотний склад досліджуваної амарантової олії.

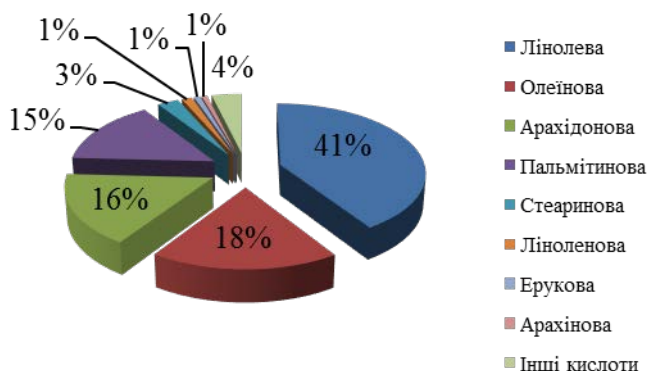


Рис. 1 – Жирнокислотний склад амарантової олії

Встановлено, що амарантова олія містить найбільше (41 %) лінолевої кислоти. Також значну частку жирнокислотного складу становить олеїнова, арахідонова і пальмітинова кислоти (15–18 %).

Для визначення впливу переробки амаранту на хлібопекарські властивості пшеничного борошна, їх було введено до рецептури пшеничного хліба (табл. 3).

Таблиця 3 – Вплив продуктів переробки амаранту на якість хліба

Сировина, % до пшеничного борошна	Питомий об'єм хліба, г/см <sup>3</sup>	Комплексна оцінка якості, балів
0 (контроль)	2,76	79
Амарантове борошно		
5	2,49	71
10	2,48	71
15	2,42	70
Амарантові висівки		
5	2,35	76
10	2,31	74
15	2,28	74
Амарантова олія		
2	2,49	70
4	2,26	68
6	2,30	65

Як видно з представлених даних, введення продуктів переробки амаранту викликає зниження об'ємного виходу хліба на 10–18 %. З огляду на зміну питомого об'єму виробів та їх комплексної оцінки найменший вплив має введення амарантового

борошна та висівок у кількості 5–10 % до маси пшеничного борошна. З врахуванням органолептичної оцінки, введення амарантової олії, отриманої шляхом вакуумної екстракції, у кількості 2–6 % до маси пшеничного борошна є недоцільним.

Насіння чіа є перспективною сировиною для збагачення складу кондитерських і хлібобулочних виробів [11]. Встановлено вплив добавки на формування якості хліба, виготовленого із пшеничного борошна вищого сорту (табл. 4).

Таблиця 4 – Вплив насіння чіа на якість хліба

Сировина, % до пшеничного борошна	Питомий об'єм хліба, г/см <sup>3</sup>	Комплексна оцінка якості, балів
0 (контроль)	2,76	79
5	2,98	85
10	2,98	87
15	2,72	84

Очевидно, що введення чіа до рецептури пшеничного хліба позитивно позначається на його питомому об'ємі, який зростає у середньому на 8 % та комплексній оцінці якості (5–8 балів). Проте, як і у випадку з амарантовим борошном і висівками, кількість здрібненого чіа не повинна перевищувати 5–10 % до маси пшеничного борошна.

Збільшення частки функціональної сировини у рецептурі буде сприяти наданню продукту оздоровчих властивостей. У табл. 6 наведена характеристика органолептичної оцінки та фізико-хімічних показників якості виробів, виготовлених з додаванням 10 % амарантового борошна і чіа (табл. 5).

Слід відзначити, що при додаванні амарантового борошна виріб має привабливий колір скоринки, незначну шорсткувату поверхню, м'яку, але дещо ущільнену м'якушку, та добре виражений смак властивий даному хлібу, з незначним присмаком амарантового борошна (рис. 2). При додаванні 10 % насіння чіа вироби мають правильну форму, гладку поверхню, приємний запах та смак, але має сіруватий колір м'якушки з помітними частинками оболонки. Проте загалом органолептичні показники даного виробу є найбільш прийнятними.

#### Обговорювання результатів

Насіння амаранту багате комплексом поліненасичених жирних кислот, причому їх вміст складає 77 %, а значна частка жирнокислотного складу належить лінолевої кислоті, з якої синтезується арахідонова кислота, що є підставою для синтезу простагландинів в організмі [12]. Встановлено, що у досліджуваній амарантовій олії основними жирними кислотами є лінолева (41 %), яка забезпечує зростання м'язових клітин в організмі

людини. Олейнова кислота, яка складає 18 %, активно впливає на стінки судин, зміцнюючи їх і забезпечуючи необхідний тонус. Арахідонова кислота (16 %) передусє утворенню речовин, що беруть участь в регуляції багатьох процесів життєдіяльності тромбоцитів і інших елементів, але особливо простагландинів, які мають велике значення як речовинам найвищої біологічної активності.

Таблиця 5 – Якість хліба, виготовленого із додаванням амарантового борошна і чіа

Показник	Характеристика при введенні у рецептуру:	
	амарантового борошна	чіа
Органолептична оцінка		
Колір	Білий з сіруватим відтінком	Сіруватий з помітними частинками оболочек
Поверхня	Гладка, є незначна шорсткуватість	Гладка
Форма	Правильна	Правильна
Смак і запах	Присутній запах і присмак амаранту	Присутній легкий приймний присмак чіа
Грудкування під час розжовування	Відчувається незначне грудкування під час розжовування	Відсутнє
Фізико-хімічні показники		
Вологість, %	40	40
Кислотність, град.	1,4	1,4
Пористість, %	69	72



Рис. 2 – Комплексна оцінка якості хліба, виготовленого з додаванням амарантового борошна і чіа

Високою біологічною цінністю володіє і амарантове борошно, що чинить загальнозміцнюючу і оздоровчу дію на організм людини [6, 13]. Використання борошна і висівок з амаранту в якості сировини для виробництва хліба дозволить збагатити хліб біологічно активними речовинами. Підвищений вміст харчових волокон сприяє виведенню з організму токсичних факторів, продуктів обміну речовин, зниження рівня холестерину в крові. Регулярне введення амарантового борошна у раціон сприяє зміцненню імунітету людини, поліпшує роботу шлунково-кишкового тракту.

Відомо [11], що добавка розмеленого насіння чіа, порівняно з цілим, протягом десяти тижнів вживання призводить до забезпечення організму людини більш високим вмістом омега-3 кислот. У роботі [14,15] визначено, що вміст білків, жирів, вуглеводів, харчових волокон, золи насіння чіа коливається від 15 до 25%, 30–33%, 41%, 18–30%, 4–5% відповідно, а також насіння чіа багате на поліфеноли.

Особливе значення в організмі людини мають незамінні амінокислоти, їх дефіцит впливає на регенерацію білків. У табл. 6 показано зміну амінокислотного складу пшеничного хліба при введенні у рецептуру амарантового борошна та чіа.

Таблиця 6 – Амінокислотний склад хліба, виготовлених з додаванням амарантового борошна та насіння чіа

Амінокислоти	Добова потреба, мг	Хліб з амарантовим борошном	Хліб з насінням чіа
Валін	1638	315	340
Ізолейцин	1260	286	306
Лейцин	2460	509	554
Лізин	1890	211	231
Метионін+ цистеїн	655	103	136
Треонін	945	224	235
Триптофан	252	71	95
Фенілаланін+ тирозин	1575	315	356
Сума незамінних амінокислот	10675	2032	2252

Найбільшим вмістом амінокислот характеризується хліб з додаванням насіння чіа (на 12 % більше порівняно з контролем). У разі додавання амарантового борошна також вдалося покращити склад незамінних амінокислот та збільшити їх вміст на 4 %. Привертає увагу те, що вміст лізину порівняно з



контролем завдяки введенню добавок збільшено на 26–39%. Валін, лейцин та ізолейцин вважаються основним енергетичним матеріалом для м'язів і складають половину спожитого щоденного білка. У зразку із додаванням насіння чіа частка валіну, лейцину та ізолейцину зросла на 8 %, треоніну – на 12 %. У зразку із амарантовим борошном частка валіну, лізину та ізолейцину зростає на 3 %.

При вживанні хліба з чіа потреба у ізолейцині, амінокислоті, що бере участь у енергетичному обміні, задовольняється на 63 % від добової потреби людини.

Хліб з амарантовим борошном на 90 % задовольняє потреби організму людини у триптофані, який регулює функції ендокринної системи та має антидепресивну дію.

Важливим є збагачення хліба білком: при додаванні чіа у хліб вміст білка збільшується на 7 %, амарантового борошна – на 60 % (рис. 3, 4). При цьому калорійність хліба виробів буде зростати з 207 до 266 ккал, що максимальна для хліба з чіа за рахунок збільшення кількості жиру в складі продукту.

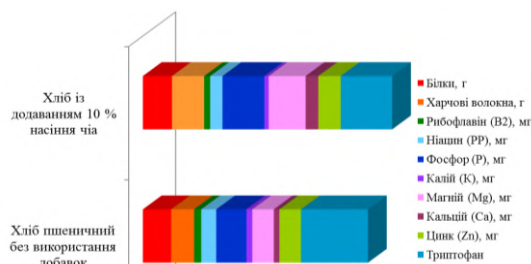


Рис. 3 – Зміна біологічної цінності хліба при використанні насіння чіа

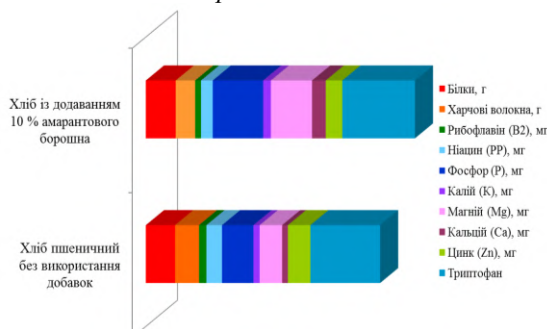


Рис. 4 – Зміна біологічної цінності хліба при використанні амарантового борошна

Враховуючи хімічний склад продуктів переробки амаранту і чіа, хліб, виготовлений з їх використанням, буде збагачений мінеральними речовинами. Введення насіння чіа у рецептуру збільшує вміст таких мінеральних речовин, як магній, натрій та цинк у 2 рази та покриває добову потребу організму людини на 20–40 %. Мідь допомагає регулювати процеси забезпечення клітин організму киснем і допомагає кістковому мозку здійснювати його кровотворну функцію, в даному випадку вміст цього мікроелементу збільшено у 10 разів при додаванні насіння чіа.

Амарантове борошно також характеризується високим вмістом мінеральних речовин, наприклад, вміст кальцію у хлібі за умови додавання такого борошна збільшено на 37 %. Кальцій впливає на внутрішньоклітинні процеси, формування кісток та мінералізацію зубів, бере участь у згортанні крові. Вміст магнію у досліджуваних зразках зростає у 2 рази. Добра забезпеченість організму магнієм сприяє кращій протидії стресовій ситуації та депресії. Цинк являється важливим мікроелементом, який необхідний для нормальної функції гормонів, у зразку з додаванням амарантового борошна його вміст було збільшено на 2 %. Фосфору належить провідна роль у функціонуванні центральної нервової системи, у процесу обміну речовин у м'язах, кількість фосфору у дослідних зразках була збільшена на 55 %.

Отже розроблені вироби є постачальниками біологічно активних речовин. Можна відзначити, що дані хлібобулочні вироби мають підвищену харчову цінність за рахунок збагачення їх поживними речовинами і дають можливість урізноманітнювати асортимент виробів функціонального призначення.

## Висновки

Хліб є продуктом масового споживання, тому його збагачення біологічно активними речовинами є актуальним напрямком розширення асортименту хлібобулочних виробів функціонального призначення, кількість яких на українському ринку є обмеженою. Продукти переробки амаранту – борошно, висівки, олія – виступають джерелом ряду фізіологічно активних сполук. Встановлено, що жирокислотний склад амарантової олії відрізняється вмістом таких жирних кислот як ліолева (41 %) та арахідонова (16 %), які відносяться до речовин з високою біологічною активністю. Амарантове борошно виступає джерелом доступного рослинного білка (15 %). Застосування продуктів переробки амаранту – борошна і висівку – суттєво не позначається на погіршенні споживчих характеристик при їх введенні у рецептуру в кількості 5–10 % до маси борошна. Використання у складі хліба чіа як сировини з вираженими функціональними властивостями позитивно позначається на об'ємному виході, який зростає в середньому на 8 %, та органолептичних показниках якості виробів, але хліб набуває специфічного сіруватого відтінку.

Введення амарантового борошна у кількості 10 % до маси пшеничного борошна забезпечує збільшення вмісту цинку і фосфору у 1,2–1,5 рази, кальцію – у 2,4 рази порівняно з пшеничним хлібом без добавок. При вживанні пшеничного хліба, виготовленого із додаванням насіння чіа у кількості 10%, організм людини буде додатково забезпечений кальцієм, фосфором, міддю, кількість яких зростає у 2 і 10 разів відповідно. Використання амарантового борошна і чіа збагачує хліб харчовими волокнами на 54 % від добової потреби, а також поліпшує

амінокислотний склад продукту за рахунок зростання вмісту лейцину, валіну, ізолейцину, фенілаланіну, треоніну, лізину.

У подальших дослідженнях планується розширити технологічні підходи до застосування продуктів переробки амаранту і чіа у технології хлібобулочних виробів широкого асортименту та встановити рівень біодоступності основних поживних речовин розробленої біологічно цінної продукції.

#### Список літератури

1. Єгоров, Б. Стан харчування населення України / Б. Єгоров, М. Мардар // *Товари і ринки*. – 2011. – № 1. – С. 140–147.
2. Хлопонина, О. А. Защищая интересы потребителя / О. А. Хлопонина // *Пищевая промышленность*. – 2015. – № 2. – С. 40–41.
3. Тарасова, В. В. Применение физиологически функциональных ингредиентов в производстве хлебобулочных изделий / В. В. Тарасова // *Пищевая промышленность*. – 2014. – № 3. – С. 34–41.
4. Калина, В. С. Макаронні вироби на основі клітковини гречаної / В. С. Калина, А. В. Гола // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення у сучасних технологіях*. – 2018. – № 45 (1321). – С. 160–165. – doi: 10.20998/2413-4295.2018.45.22.
5. Pivovarov, A. Plasma-chemically activated water influence on staling and safety of sprouted bread / A. Pivovarov, S. Mykolenko, Y. Hez', S. Shcherbakov // *Journal of Food Science and Technology*. – 2018. – Vol. 12. – № 2. – P. 100–107. – doi: 10.15673/fst.v12i2.940.
6. Sanz-Penella, J. M. Effect of whole amaranth flour on bread properties and nutritive value. / J. M. Sanz-Penella, M. Wronkowska, M. Soral-Smietana // *LWT – Food Science and Technology*. – 2013. – Vol. 50. – № 2. – P. 679–685. – doi: 10.1016/j.lwt.2012.07.031.
7. Ixtaina, V. Y. Physical properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds / V. Y. Ixtaina, S. M. Nolasco, M. C. Tomas // *Industrial Crops and Products*. – 2008. – Vol. 28. – № 3. – P. 286–293. – doi: 10.1016/j.indcrop.2008.03.009.
8. Bresson, J. L. Opinion on the safety of Chia seeds (*Salvia hispanica* L.) and ground whole Chia seeds as a food ingredient / J. L. Bresson, A. Flynn, M. Heinonen, et al. // *The European Food Safety Authority Journal*. – 2009. – Vol. 996. – P. 1–26. – doi: 10.2903/j.efsa.2009.996.
9. Capitani, M. I. Physicochemical and functional characterization of by-products from chia (*salvia hispanica* l.) seeds of Argentina / M. I. Capitani, V. Spotorno, S. M. Nolasco, M. C. Tomás // *LWT – Food Science and Technology*. – 2012. – Vol. 45. – № 1. – P. 94–102. – doi: 10.1016/j.lwt.2011.07.012.
10. Музалевская, Е. Н. Сквален: физиологические и фармакологические свойства / Е. Н. Музалевская, Л. А. Мирошниченко, В. А. Николаевский, И.Б. Ушаков, Ю. Н. Чернов, В. В. Алабовский, Г. А. Батищева, А. В. Бузлама // *Экспериментальная и клиническая фармакология*. – 2015. – Т. 78. – № 6. – С. 30–36.
11. Coorey, R. Gelling Properties of Chia Seed and Flour / R. Coorey, A. Tjoe, V. Jayasena // *Journal of Food Science*. – 2014. – Vol. 79. – № 5. – P. E859–66. – doi: 10.1111/1750-3841.12444D.
12. Кретов, И. Т. Масло из семян амаранта / И. Т. Кретов, С. Н. Соболев // *Масложировая промышленность*. – 2006. – № 1. – С. 22–23.
13. Tang, Y. Phytochemicals in quinoa and amaranth grains and their antioxidant, anti-inflammatory, and potential health beneficial effects: a review / Y. Tang, R. Tsao // *Molecular Nutrition & Food Research*. – 2017. – Vol. 61. – № 7. – P. 1600767 (1–16). – doi: 10.1002/mnfr.201600767.
14. Timilsenaa, Y. P. Molecular and functional characteristics of purified gum from Australian chia seeds / Y. P. Timilsenaa, R. Adhikarib, S. Kasapisa, B. Adhikaria // *Carbohydrate Polymers*. – 2016. – Vol. 136. – P. 128–136. – doi: 10.1016/j.carbpol.2015.09.035.

#### References (transliterated)

1. Egorov, B. Maradar, M. Stan harchuvannya naseleynna Ukrainy [Nutritional status in Ukraine]. *Tovari i rynki [Products and markets]*, 2011, **1**, 140–147.
2. Hloponina, O. A. Zashchishchaya interesy potrebiteleya [Defending the interests of consumers]. *Pischevaya promyishlennost [Food industry]*, 2015, **2**, 40–41.
3. Tarasova, V. V. Primenenie fiziologicheskii funktsionalnykh ingredientov v proizvodstve hlebobulochnykh izdeliy [Use of physiologically functional ingredients in bakery products]. *Pischevaya promyishlennost [Food industry]*, 2014, **3**, 34–41.
4. Kalina, V. S., Gola, A. V. Makaronni virobi na osnovi klitkoviny grechanoyi [Pasta based on fiber of buckwheat]. *Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI»*. Seriya: *Novi rishennya u suchasniy tehnologiyah [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies]*, 2018, **45** (1321), 160–165, doi: 10.20998/2413-4295.2018.45.22.
5. Pivovarov, A., Mykolenko, S., Hez', Y., Shcherbakov, S. Plasma-chemically activated water influence on staling and safety of sprouted bread. *Journal of Food Science and Technology-Ukraine*, 2018, **12**, 2, 100–107, doi: 10.15673/fst.v12i2.940.
6. Sanz-Penella, J. M., Wronkowska, M., Soral-Smietana, M. Effect of whole amaranth flour on bread properties and nutritive value. *LWT – Food Science and Technology*, 2013, **2**, 679–685, doi:10.1016/j.lwt.2012.07.031.
7. Ixtaina, V. Y., Nolasco, S. M., Tomas, M. C. Physical properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Industrial Crops and Products*, 2008, **28**(3), 286–293, doi: 10.1016/j.indcrop.2008.03.009.
8. Bresson, J. L., Flynn, A., Heinonen, M. et al. Opinion on the safety of Chia seeds (*Salvia hispanica* L.) and ground whole Chia seeds as a food ingredient. *The European Food Safety Authority Journal*, 2009, **996**, 1–26, doi: 10.2903/j.efsa.2009.996.
9. Capitani, M. I., Spotorno, V., Nolasco, S. M., Tomás, M. C. Physicochemical and Functional Characterization of By-products from Chia (*Salvia hispanica* L.) Seeds of Argentina. *LWT – Food Science and Technology*, 2012, **45**, 1, 94–102.
10. Muzalevskaia, E. N. et al. Skvalen: fiziologicheskie i farmakologicheskie svoystva [Squalin: physiological and pharmacological properties]. *Ekspierimentalnaya i klinicheskaya farmakologiya. [Experimental and clinical pharmacology]*, 2015, **78**, 30–36.
11. Coorey, R., Tjoe, A., Jayasena, V. Gelling Properties of Chia Seed and Flour. *Journal of Food Science*, 2014, **79**, 5, E859–66, doi.org/10.1111/1750-3841.12444D.
12. Kretov, I. T., Sobolev, S. N. Maslo iz semyan amaranta

- [Amaranth seed oil], *Maslozhirovaya promyshlennost [Food oil industry]*, 2006, **1**, 22–23.
13. **Tang, Y., Tsao, R.** Phytochemicals in quinoa and amaranth grains and their antioxidant, anti-inflammatory, and potential health beneficial effects: a review, *Molecular Nutrition & Food Research*, 2017, **61**, 7, 1600767 (1–16), doi: 10.1002/mnfr.201600767.
14. **Timilsena, Y. P. et al.** Molecular and functional characteristics of purified gum from Australian chia seeds. *Carbohydrate Polymers*, 2016, **136**, 128–136.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Миколенко Світлана Юрївна** – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, доцент кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції; м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0002-1959-1141; e-mail: svetlana.mykolenko@gmail.com.

**Svitlana Mykolenko** – Candidate of Technical Sciences (PhD), Dnipro State Agrarian and Economic University, Associate Professor of Department of Agricultural Products Storage and Processing Technologies, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1959-1141; e-mail: svetlana.mykolenko@gmail.com.

**Царук Любов Юрївна** – магістрант, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, кафедра технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції; м. Дніпро, Україна; e-mail: tcaruk.lu@gmail.com.

**Libov Tsaruk** – postgraduate student, Dnipro State Agrarian and Economic University, Department of Agricultural Products Storage and Processing Technologies, Dnipro, Ukraine; e-mail: tcaruk.lu@gmail.com.

**Чурсінов Юрїй Олексійович** – доктор технічних наук, професор, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, завідувач кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції; м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0002-1959-1141; e-mail: tzpsgp@gmail.com.

**Yuriy Chursinov** – Doctor of Technical Sciences (DS.), Dnipro State Agrarian and Economic University, Chairman of Department of Agricultural Products Storage and Processing Technologies, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1959-1141; e-mail: tzpsgp@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Миколенко, С. Ю.** Вплив продуктів переробки амаранту і чіа на якість хліба / **С. Ю. Миколенко, Л. Ю. Царук, Ю. О. Чурсінов** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 145-151. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.19.

*Please cite this article as:*

**Mykolenko, S., Tsaruk, L., Chursinov, Yu.** Effect of amaranth products and chia on bread quality. *Bulletin of NTU "KPI", Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 145-151, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.19.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Мыколенко, С. Ю.** Влияние продуктов переработки амаранта и чиа на качество хлеба / **С. Ю. Мыколенко, Л. Ю. Царук, Ю. А. Чурсинов** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 145-151. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.19.

**АННОТАЦИЯ** В статье рассмотрены особенности химического состава, функционально-технологические свойства и биологическая активность нетрадиционного для хлебопекарного производства сырья, а именно амарантовой муки, амарантовых отрубей, амарантового масла и чиа, которые относятся к пищевым компонентам, которые содержат значительное количество питательных и биологически активных веществ. Определено, что ассортимент хлеба оздоровительного назначения на украинском рынке является весьма ограниченным, поэтому его обогащение биологически активными веществами природного происхождения будет способствовать расширению продукции функционального назначения. Установлено, что амарантовая мука имеет повышенное содержание белка (15 %) и клетчатки (4,4 %) по сравнению с пшеничной. Выявлены особенности жирокислотного состава амарантового масла, полученного методом вакуумной экстракции, 90% которого составляют линолевая, олеиновая, арахидоновая и пальмитиновая кислоты. Установлено высокое содержание в амарантовом масле линолевой (41 %) и арахидоновой (16 %) кислот, которые являются незаменимыми и обладают высокой биологической активностью. Выявлены особенности влияния продуктов переработки амаранта и чиа на формирование качества пшеничного хлеба. Применение продуктов переработки амаранта - муки и отрубей - существенно не сказывается на ухудшении потребительских характеристик при их введении в рецептуру в количестве 5–10 % к массе муки, а применение 2–6 % амарантового масла в составе рецептуры пшеничного хлеба нецелесообразно. Добавление чиа как сырья с выраженными функциональными свойствами в количестве 5–15 % к массе пшеничной муки положительно сказывается на объемном выходе продукта и органолептических свойствах хлеба. Доказано, что введение амарантовой муки в рецептуру хлеба обеспечивает улучшение минерального состава продукта, а именно его обогащение цинком, фосфором и кальцием в 1,5–2,5 раза по сравнению с пшеничным хлебом без добавок. При употреблении пшеничного хлеба, изготовленного с добавлением семян чиа, организм человека будет дополнительно обеспечен кальцием, фосфором, медью, количество которых возрастает в 2 и 10 раз соответственно. Установлено, что употребление пшеничного хлеба с добавлением амарантовой муки и чиа обеспечивает пищевыми волокнами на 54 % от суточной потребности, а также способствует улучшению аминокислотного состава изделий за счет повышения содержания незаменимых аминокислот.

**Ключевые слова:** амарантовая мука; амарантовые отруби; амарантовое масло; семена чиа; пшеничная мука; хлеб; биологическая ценность

*Поступила (received) 15.02.2019*

УДК 664.34:631.53.01:633.522

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.20

**ВИКОРИСТАННЯ КОНОПЛЯНОЇ ОЛІЇ У ТЕХНОЛОГІЇ МАЙОНЕЗУ****Н. А. СОВА\*, М. В. ЛУЦЕНКО, А. О. ЛОБАНОВА, Н. В. ГРЕКОВА***кафедра технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції Дніпровського державного аграрно-економічного університету, м. Дніпро, УКРАЇНА**\*e-mail: sova.natalia.89@gmail.com*

**АНОТАЦІЯ** Сучасна концепція здорового харчування базується на науково обґрунтованому підході до удосконалення складу, властивостей і технологій харчових продуктів, які повинні не тільки задовольняти потреби організму людини в основних харчових речовинах і енергії, а й сприяти профілактиці захворювань, зберігаючи здоров'я і забезпечуючи довголіття. Серед асортименту харчових продуктів олійно-жирової галузі значне місце посідають майонези. Зацікавленість у розширенні досліджень технології майонезів зумовлена пред'явленням високих вимог до якості компонентів жирової фази. Особливо важливим є використання натуральних компонентів – рослинних олій з вираженими харчовими та біологічними властивостями та добавок, що мають корисні для здоров'я людини функціональні властивості. З огляду на унікальний склад олії конопляної, було сформульовано гіпотезу щодо можливості застосування її як основного компоненту майонезу. Об'єкт дослідження – технологія виробництва майонезу з конопляною олією. Мета роботи полягає в дослідженні органолептичних, фізико-хімічних показників його якості; розрахунку поживної та енергетичної цінності готового продукту. Вибір проб і визначення вмісту жиру та кислотності здійснювали згідно ДСТУ 4560:2006 «Майонези. Правила приймання та випробування». Було виготовлено чотири зразки майонезу: зразок №1 – контрольний зразок висококалорійного майонезу; зразок №2 – з повною заміною соняшникової олії на конопляну; зразок №3 – із заміною 50 % соняшникової олії на конопляну; зразок №4 – із заміною 75 % соняшникової олії на конопляну. За проведеною органолептичною оцінкою зробили висновок, що зразки №1 і №3 мають прийнятні результати. Встановлено, що найкращі показники якості має рецептура майонезу «Конопляний», жирова основа якого складається з 50 % конопляної олії і 50 % соняшникової рафінованої олії, вміст жиру в даному зразку становив 71,97 %, кислотність – 0,3 %. Методом газової хроматографії проведено жирнокислотний аналіз майонезу «Конопляний». Вміст ненасичених жирних кислот в даному зразку склав 84 % від загальної кількості жирних кислот. Розраховано та порівняно з виробничими зразками енергетичну і поживну цінність майонезу «Конопляний».

**Ключові слова:** майонез; конопляна олія; соняшникова олія; органолептична оцінка; вміст жиру; кислотність; жирнокислотний склад; енергетична цінність

**USE OF HEMP OIL IN MAYONNAISE TECHNOLOGY****N. SOVA, M. LUTSENKO, A. LOBANOVA, N. HREKOVA***Department of technology storage and processing of agricultural products of Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, UKRAINE*

**ABSTRACT** The modern concept of healthy diet is based on a science-based approach to improving the composition, properties and technologies of food products, which should not only meet the needs of the human body in the basic nutrients and energy, but also contribute to the prevention of diseases, while maintaining health and ensuring longevity. Among the range of food products of the oil and fat industry mayonnaise occupies a significant place. Interest in expanding the research of mayonnaise technology is due to the high quality requirements for the components of the fat phase. Particularly important is the use of natural ingredients, vegetable oils with pronounced nutritional and biological properties and additives that have functional properties for human health. Given the unique composition of hemp oil, it was hypothesized that it could be used as the main component of mayonnaise. The object of the study is the production of mayonnaise with hemp oil. The purpose of the work is to study the organoleptic, physical and chemical parameters of its quality; calculation of the nutritional and energy value of the finished product. Sampling and determination of the content of fat and acidity were carried out according to DSTU 4560: 2006 "Mayonnaise. Rules of acceptance and testing". Four samples of mayonnaise were made: Sample No. 1 is a control sample of high-calorie mayonnaise; sample No. 2 – with complete replacement of sunflower oil on hemp oil; sample No. 3 – with replacement of 50 % sunflower oil on hemp oil; sample No. 4 – with replacement of 75 % sunflower oil on hemp oil. According to the conducted organoleptic assessment, it was concluded that samples No. 1 and No. 3 have acceptable results. It is established that the best quality indicators is the formulation of mayonnaise "Hemp", the fat base of which consists of 50 % hemp oil and 50 % sunflower refined oil, the fat content in this sample was 71.97 %, acidity – 0.3 %. It was established that the recipe of "Hemp" mayonnaise has the best quality indicators, the fat base of which consists of 50 % of hemp oil and 50 % of sunflower refined oil, the fat content in this sample was 71.97%, the acidity was 0.3%. Fatty acid analysis of "Hemp" mayonnaise was carried out by gas chromatography. The content of unsaturated fatty acids in "Hemp" mayonnaise is 84 % of the total amount of fatty acids. The energy and nutritional value of "Hemp" mayonnaise has been calculated and compared with the production samples.

**Keywords:** mayonnaise; hemp oil; sunflower oil; organoleptic evaluation; fat content; acidity; fatty acid composition; energy value

**Вступ**

Харчування є одним з найважливіших факторів життєдіяльності людини, які впливають на стан її

здоров'я, працездатність, фізичний та розумовий розвиток, а також на тривалість життя. Сучасна концепція здорового харчування базується на науково обґрунтованому підході до удосконалення складу,

властивостей і технологій харчових продуктів, які повинні не тільки задовольняти потреби організму людини в основних харчових речовинах і енергії, а й сприяти профілактиці захворювань, зберігаючи здоров'я і забезпечуючи довголіття. Серед асортименту харчових продуктів олійно-жирової галузі значне місце посідають майонези, в яких рослинна олія знаходиться у диспергованому стані, що підвищує її харчову цінність та засвоюваність [1].

Зацікавленість у розширенні досліджень технології майонезів зумовлена пред'явленням високих вимог до якості компонентів жирової фази. Особливо важливим є використання натуральних (природних) емульгуючих компонентів, рослинних олій з вираженими харчовими та біологічними властивостями та добавок, що мають корисні для здоров'я людини функціональні властивості.

У зв'язку з цим виникає завдання розширення асортименту майонезів та удосконалення існуючих технологій, що зберігають корисні властивості жирів та інших компонентів [2].

#### Аналіз стану питання

Основною особливістю майонезу є можливість корегування складу рецептурних компонентів та отримання продукції, що максимально відповідають фізіологічним потребам організму. Крім того, вживання рослинних рідких жирів у вигляді дрібнодисперсної водно-жирової емульсії зменшує навантаження на ендокринну систему, сприяє стабілізації фізіологічних функцій шлунково-кишкового тракту [3].

Вчені Пешук Л. В. і Радзівська І. Г. вивчили виробництво майонезу на основі купажів – А: кунжутної (50 %), соняшникової (30 %), оливкової (20 %) та Б: кунжутної (50 %), соєвої (30 %), соняшникової (20 %) олії. Також авторами було досліджено заміну яєчного порошку на соняшникові фосфоліпіди, функціональні та технологічні властивості яких полягають у виявленні емульгуючих, вологостримуючих та стабілізуючих властивостей [4,5]. Лазарева Т. А., Лазарев М. І. та Гавриляка А. Ю. розробили рецептуру майонезу на основі суміші нерафінованої олії волоського горіха, нерафінованої гарбузової олії та соняшникової рафінованої олії у співвідношенні 1:1:0,7 відповідно [6]. Табакаєва О. В., Каленик Т. К. запропонували в якості жирової фази суміш нерафінованої лляної (14 %), рафінованої соняшникової, кукурудзяної або бавовняної (46 %) та оливкової олії (40 %) [7]. Основною метою досліджень було створення рецептури продукту з оптимальним вмістом поліненасичених жирних кислот.

Галух Б. І., Паска М. З. і Драчук У. Р. дослідили в якості жирової основи майонезів червону пальмову олію, що дозволило покращити органолептичні показники якості отриманого

продукту, а також збільшити вміст каротиноїдів, токоферолів та токотрієнолів [8].

Вчені Бахмач В. О., Бабенко В. І., Левчук І. В., Падалка Т. В. дослідили використання соняшникової олії, збагаченої каротином моркви та олії купажованої червоної «Каротино» в якості основного компоненту майонезу. Дана олія сприяє захисту організму в умовах дії іонізуючого опромінення та інших негативних чинників; зняттю стресу та при нервових перенапруженнях; нормалізації обміну речовин в організмі й зменшенню ризику виникнення онкологічних захворювань. Отримані зразки мали високі показники якості протягом всього терміну зберігання [2].

Манк В. В., Пешук Л. В. та Радзівська І. Г. опрацювали використання фосфоліпідів, які мають біологічно активні властивості, в технології функціонального майонезу. Автори стверджують, що даний продукт підвищить імунітет організму людини до негативних факторів навколишнього середовища [9].

Також існують дослідження учених світу, які пропонують створювати нові соуси на основі майонезів шляхом додавання натуральних компонентів таких, як насіння гарбуза [10], льону [11,12], ядро соняшнику [13], фукусу [12]. Були досліджені в якості антиоксидантів натуральні добавки до майонезів: екстракт меліси, шипшини, стевії [14].

Дежиц Ю. Г., Разумова Л. М. розробили рецептуру майонезу, збагаченого йодом, селеном та сиропом стевії з метою поповнення організму людини цими нутрієнтами [15].

В якості інноваційного інгредієнта виробництва майонезу ми пропонуємо конопляну олію, яку виробляють з конопляного насіння шляхом пресування.

Сучасні підприємства України такі, як ТОВ «Агросільпром» (Дніпропетровська обл.), ФОП «Садовніченко» (Дніпропетровська обл.), ПП «Річойл» (Херсонська обл.), ТОВ «М Плюс Груп» (м. Київ), ТОВ «Десналенд» (Сумська обл.), ФГ «Екосвіт» (Сумська обл.), ПП «Біговал» (Харківська обл.), ПП НВФ «Елітфіто» (Івано-Франківська обл.) та інші, які виробляють конопляну олію використовують тільки спосіб холодного пресування, обґрунтовуючи це тим, що при даному способі отримання олії зберігаються всі її корисні властивості.

Параметрам і способам виробництва, а також вивченню їх впливу на якість конопляної олії присвятили свої дослідження деякі вчені світу [16-18].

Конопляна олія – єдина з природних олій, в якій Омега-3 і Омега-6 ненасичені жирні кислоти знаходяться в ідеальному співвідношенні 1 : 3÷5, що рекомендований експертами Всесвітньої організації охорони здоров'я. Ці кислоти вкрай необхідні для збереження й захисту функцій різних клітин організму людини, вони очищають судини (артерії),

трансформують і стримують накопичення холестерину. Особливо цінним у конопляній олії є вміст біля 2-5% гамма-ліноленової кислоти, яка є складовою материнського молока людини і досить рідко зустрічається в природі [19,20]. Конопляна олія має унікальний вміст ненасичених жирних кислот у порівнянні з відомими рослинними оліями (табл. 1) [21,22].

Таблиця 1 – Порівняльний вміст жирних кислот в рослинних оліях

№ з/п	Назва олії	Вміст кислоти у % по відношенню до загальної кількості жирних кислот		
		Олеїнова (Омега-9)	Лінолева (Омега-6)	Ліноленова (Омега-3)
1	Конопляна	16,2	54,8	14,8
2	Лляна	20,1	14,6	55,5
3	Соняшникова	54,1	12,5	0,0
4	Сафлорова	75,2	12,8	0,0
5	Кукурудзяна	56,4	0,4	1,1
6	Гарбузова	55,7	0,6	0,4
7	Кедрова	42,4	19,9	0,3
8	Соєва	21,7	54,1	0,6
9	Ріпакова	60,2	20,5	8,0
10	Гірчична	42,1	27,8	10,1
11	Пшенична	15,4	52,3	8,1
12	Горіхова	20,5	57,5	10,5
13	Рижієва	15,7	19,6	32,9
14	Маслинова	69,9	12,6	0,7
15	Коріандрова	66,1	17,2	0,6
16	Кокосова	7,8	1,7	0,0
17	Пальмова	38,6	9,9	0,0
18	Бавовняна	19,0	54,0	1,0
19	Арахісова	46,5	31,4	0,0
20	Олія авокадо	0,0	12,5	1,0
21	Олія канолі	61,8	18,6	9,1
22	Олія з виноградних кісточок	14,3	74,7	0,0

\* за даними досліджень [26]

Науковці вже давно підтвердили необхідність для людини ненасичених жирних кислот Омега-3 і Омега-6, але першорядне значення має не тільки вміст цих кислот в продукті, а й правильне поєднання. Вчені світу досліджують жирнокислотний склад олії з насіння сортів конопель, районованих саме в їхній країні [23-25].

На думку європейських експертів, мінімальна денна потреба у Омега-3 ненасичених жирних кислотах у молоді та дорослих становить приблизно 1000 – 1500 мг залежно від статі, віку та фізичної активності. Співвідношення Омега-6 до Омега-3 ненасичених жирних кислот для лікувально-профілактичного харчування – від 3:1 до 5:1. За

розрахунками А. П. Левицького, на сьогодні змішаний раціон пересічного українця має співвідношення 43,6:1, тобто перевищує допустимий рівень Омега-6 ненасичених жирних кислот у 8,7 рази [27].

Конопляна олія містить бактерицидні речовини, гліцериди, мікроелементи, вітаміни А, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>3</sub>, В<sub>6</sub>, D і Е, антиоксиданти, каротин, фітостероли, фосфоліпіди, мінеральні речовини.

У конопляній олії високий вміст хлорофілу (в середньому 2-7 мг·кг<sup>-1</sup>), який обумовлює її зелений колір, а також є природним антиоксидантом. Конопляна олія має приємний горіховий смак, не має токсичних речовин і не потребує додаткового очищення, використовується як цінна харчова олія і біологічно активна добавка до їжі [28].

Вище наведені факти підтвердили доцільність рекомендацій щодо використання конопляної олії з лікувальною метою як самостійного продукту, або в якості інгредієнту харчових продуктів.

#### Мета статті

В ході попередніх досліджень було розроблено технологію комплексної переробки насіння промислових конопель. Вона дозволяє отримати серед інших конопляних продуктів олію конопляну, яка відповідає вимогам ТУ У 10.4-39224310-001:2019 «Олія конопляна. Технічні умови». З огляду на унікальний склад олії конопляної, було сформульовано гіпотезу щодо можливості застосування її як основного компоненту майонезу. Об'єкт дослідження – технологія виробництва майонезу з конопляною олією. Мета роботи полягає в дослідженні органолептичних, фізико-хімічних показників його якості; розрахунку поживної та енергетичної цінності готового продукту.

#### Викладення основного матеріалу

У якості жирової фази для рецептури майонезу нами запропоновано конопляну олію, в якій співвідношення Омега-6 до Омега-3 наближене до ідеального і становить 3:1. Крім того, вона багата на природні антиоксиданти. Для виготовлення майонезу використовували наступну сировину:

- олія конопляна, отримана на шнековому пресі в Інституті луб'яних культур Національної академії аграрних наук України;
- олія соняшникова рафінована згідно ДСТУ 4492:2017 «Олія соняшникова. Технічні умови»;
- яйця курячі згідно ДСТУ 5028:2008 «Яйця курячі харчові. Технічні умови»;
- цукор-пісок згідно ДСТУ 2316–93 «Цукор-пісок. Технічні умови»;
- сіль кухонна згідно ДСТУ 3583:97 «Сіль кухонна. Загальні технічні умови»;
- гірчиця згідно ДСТУ 1052:2005 «Гірчиця харчова. Загальні технічні умови»;



– лимонний сік згідно ДСТУ 7159:2010 «Консерви соки відновлені».

Рецептури дослідних зразків, розраховані на 100 г готового продукту майонезу жирністю 72 %, наведені в таблиці 2:

Зразок №1 – контрольний зразок висококалорійного майонезу;

Зразок №2 – з повною заміною соняшникової олії на конопляну;

Зразок №3 – із заміною 50 % соняшникової олії на конопляну;

Зразок №4 – із заміною 75 % соняшникової олії на конопляну.

Таблиця 2 – Рецептурні співвідношення дослідних зразків майонезу на 100 г готового продукту

№ з/п	Сировина	Зразок №1	Зразок №2	Зразок №3	Зразок №4
1	Соняшникова олія, г	71,78	-	35,03	17,67
2	Конопляна олія, г	-	69,40	35,03	53,01
3	Яйце куряче, г	20,25	19,57	19,76	19,93
4	Сіль кухонна, г	1,18	1,14	1,15	1,16
5	Цукор-пісок, г	1,39	1,34	1,36	1,37
6	Гірчиця, г	5,78	5,60	5,65	5,70
7	Лимонний сік, г	5,78	5,60	5,65	5,70

Ячну суміш, олію, гірчицю, лимонний сік, сіль та цукор-пісок в необхідній кількості поміщали в чашу блендера, змішували протягом 30 с до утворення стійкої емульсії. Безпосередньо після виготовлення майонезу провели дослідження його якості. Відбір проб і визначення вмісту жиру та кислотності здійснювали згідно ДСТУ 4560:2006 «Майонези. Правила приймання та випробування».

Органолептичні показники якості встановлювали на підставі коефіцієнтів важливості з використанням профільного методу, результати наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Органолептичні показники якості дослідних зразків майонезу

Номер зразка	Зовнішній вигляд	Консистенція	Колір	Запах	Смак	Загальна оцінка
Коефіцієнт вагомості	0,15	0,1	0,15	0,3	0,3	1
Зразок №1	5	5	5	5	5	5,00
Зразок №2	5	5	5	3	2	3,50
Зразок №3	5	5	5	5	5	5,00
Зразок №4	5	5	5	4	3	4,10

Зовнішній вигляд, консистенція та колір усіх зразків були оцінені на 5, а от смак і запах зразків різнилися. Органолептичний профіль дослідних зразків наведений на рис. 1. За проведеною органолептичною оцінкою можна зробити висновок, що зразки №1 і №3 мають прийнятні результати.

Результати визначення показників якості дослідних зразків майонезу наведені в табл. 4.

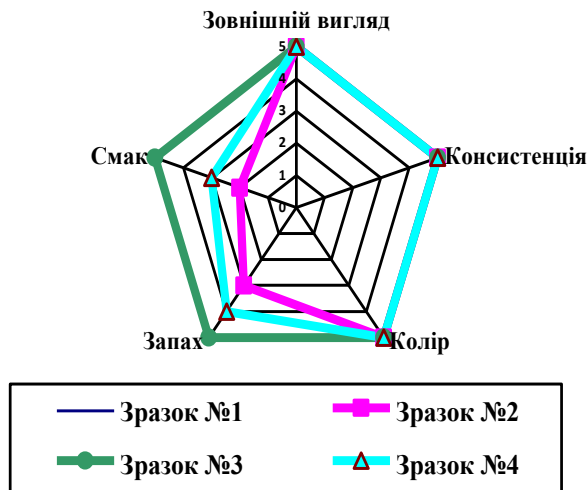


Рис. 1 – Органолептичний профіль дослідних зразків майонезу

Таблиця 4 – Результати визначення показників якості дослідних зразків майонезу

Номер зразку	Вміст жиру, %	Кислотність, %
Зразок №1	72,02	0,26
Зразок №2	69,27	0,35
Зразок №3	71,97	0,30
Зразок №4	70,34	0,34
За ДСТУ 4487:2005 «Майонези. загальні технічні умови»	більше 55,0	не більше 1,25

Представлені результати досліджень свідчать про те, що фізико-хімічні показники якості дослідних зразків відповідають даним нормативних документів.

Після визначення основних показників якості майонезу, нами зроблений висновок про рекомендацію до впровадження рецептури конопляного майонезу № 3.

Жирнокислотний аналіз майонезу «Конопляний» проводили методом газової хроматографії на хроматографі «Agilent 7890». Згідно отриманої хроматограми, визначили відсотковий вміст жирних кислот у конопляному майонезі, який наведено в таблиці 5.

Таблиця 5 – Порівняльна характеристика жирнокислотного складу конопляного майонезу та олій

№ з/п	Назва жирної кислоти	Вміст у % до загальної кількості жирних кислот		
		Конопляна олія	Соняшникова олія*	Майонез
1	2	3	4	5
1	C 16:0 пальмітинова	5,639	5,0 – 7,6	6,471
2	C 18:0 стеаринова	3,277	2,7 – 6,5	3,285
3	C 18:1 олеїнова (Омега-9)	15,290	14,0 – 39,4	22,937
4	C 18:2 лінолева (Омега-6)	54,794	48,3 – 74,0	55,046
5	C 18:3 альфа-ліноленова (Омега-3)	10,523	до 0,3	7,751
6	C 18:3 гамма-ліноленова (Омега-6)	2,391	-	1,219
7	C 20:0 арахідова	5,585	0,1 – 0,5	0,601
8	Інші	2,501	28 – 29,6	2,690

\* за даними ДСТУ 4492:2017 «Олія соняшникова. Технічні умови»

Для підтвердження переваги обраної рецептури майонезу було проаналізовано його поживну та енергетичну цінність (табл. 6).

Таблиця 6 – Порівняння енергетичної цінності отриманого майонезу з виробничими зразками

№ з/п	Назва майонезу	Вміст білків, %	Вміст жирів, %	Вміст вуглеводів, %	Калорійність, ккал в 100 г продукту
1	«Європейський», ТМ «Горчин»	0,5	72,0	4,2	669,0
2	«Преміум», ТМ «Щедро»	1,1	72,0	2,8	664,0
3	«Європейський», ТМ «Королівський смак»	0,05	72,0	2,8	661,0
4	«Європейський», ТМ «Ашан»	1,9	72,0	3,8	672,0
5	«Поживний», ТМ «Гуляй-Поле»	0,48	72,0	3,14	661,0
6	Майонез «Конопляний»	2,9	72,7	2,5	706,5

Наведені дані свідчать про те, що поживна цінність розробленого майонезу краща за рахунок вмісту білків та ненасичених жирних кислот.

## Висновки

Аналіз технологічного процесу виробництва майонезу на основі конопляної олії та дослідження якості зразків готового продукту довів, що майонез «Конопляний» – це перспективний оздоровчий соус.

Встановлено, що найкращі показники якості має рецептура майонезу «Конопляний», жирова основа якого складається з 50 % конопляної олії і 50 % соняшникової рафінованої олії. Вміст ненасичених жирних кислот в майонезі «Конопляний» складає 84 % від загальної кількості жирних кислот. За рахунок наявності в конопляній олії і, відповідно, у конопляному майонезі, порівняно високою вмісту токоферолу, майонез «Конопляний» має прийнятний термін зберігання без використання антиоксидантів та консервантів. Також хлорофіли конопляної олії надають майонезу «Конопляний» приємного яскравого салатого кольору.

## Список літератури

- Ткаченко, Н. А. Нові види майонезів оздоровчого призначення / Н. А. Ткаченко, О. П. Некрасов, Т. В. Маковська // *Матеріали міжнародної наукової конференції MicroCAD*. URL: [http://www.kpi.kharkov.ua/archive/microcad/2016/S12/file\\_285.pdf](http://www.kpi.kharkov.ua/archive/microcad/2016/S12/file_285.pdf).
- Бахмач, В. О. Технологія майонезів на основі яєчних продуктів з використанням збагачених каротином олій / В. О. Бахмач, В. І. Бабенко, І. В. Левчук, Т. В. Падалка // *Продукты & Ингредиенты*. – 2012. – № 5 (91). – С. 46-48.
- Бахмач, В. О. Удосконалення технології майонезів з використанням рослинної сировини / В. О. Бахмач, Л. В. Пешук // *Харчова промисловість*. – 2015. – №15. – С. 27-31.
- Пешук, Л. В. Нові майонези з оптимізованим рецептурним складом / Л. В. Пешук, І. Г. Радзівська // *Продукты & ингредиенты*. – 2012. – № 2 (88). – С. 50-52.
- Белінська, А. П. Використання купажованих олій функціонального призначення у технології майонезів: матеріали 80 міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів / А. П. Белінська, В. В. Анан'єва, О. І. Байбак, І. Г. Радзівська // *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті*, (Київ, 10–11 квітня 2014 р.). – К.: НУХТ, 2014. – Ч. 1. – С.523-524.
- Пат. України на корисну модель 65390, МПК А23L 1/24 (2006.01). Майонез функціонального призначення / Лазарєва Т. А., Лазарєв М. І., Гавриляка А. Ю.: власник Українська інженерно-педагогічна академія. – №и 2011 04180; заявл. 06.04.2011; опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23.
- Пат. РФ на изобретение 2524821, МПК А23L1/24. Майонез / Табакаева О. В., Каленик Т. К.: патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего

- професійного освіти «Дальневосточный федеральный университет». – №2000053107; заявл. 12.03.2013; опубл. 10.08.2014, Бюл. №22.
8. **Галух, Б. І.** Збагачення майонезів і соусів комплексом природних антиоксидантів і біологічно активних речовин / **Б. І. Галух, М. З. Паска, У. Р. Драчук** // *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С. З. Гжицького*. – 2015. – №1 (61). – С. 11-16
  9. **Манк, В. В.** Розроблення емульсійних продуктів підвищеної біологічної цінності / **В. В. Манк, Л. В. Пешук, І. Г. Радзівська** // *Харчова промисловість*. – 2005. – №4. – С. 42-45.
  10. **Шумилова, І. Ш.** Современные технологии приготовления соуса майонез на предприятиях общественного питания / **И. Ш. Шумилова** // *Масложировая промышленность*. – 2012. – № 3. – С. 14-15.
  11. **Рудавська, Г.** Майонезний соус з використанням насіння льону / **Г. Рудавська, Н. Анненкова** // *Продовольча індустрія АПК*. – 2011. – №5 (13). – С. 40-44.
  12. **Корзун, В. Н.** Технологія соусів з використанням фукусу та насіння льону / **В. Н. Корзун, І. Ю. Антонюк, О. І. Шкіра** // *Наукові праці ОНАХТ*. – 2013. – №44. – С. 138-142.
  13. Пат. України на винахід 51395, МПК 6A23D9/00. Майонез / **Іхно М. П., Котелевська А. А.**: власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» – №2002031975; заявл. 12.03.2002; опубл. 15.11.2002, Бюл. № 11.
  14. **Гореликова, В. А.** Исследование возможности включения в состав майонеза растительного экстракта антиоксидантного действия / **Г. А. Гореликова, П. С. Скубаев** // *Техника и технология пищевых производств*. – 2009. – №1. – С. 105-109.
  15. Пат. України на корисну модель 14129, МПК (2006) A23L 1/24. Майонез «Кримський» збагачений / **Дежич Ю. Г., Разумова Л. М.**: власник Товариство з обмеженою відповідальністю «Акваполис». – № 2002031975; заявл. 19.05.2005; опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5.
  16. **Cherney, J. H.** Industrial Hemp in North America: Production, Politics and Potential / **J. H. Cherney, E. Small** // *Agronomy*. – 2016. – Vol. 6 (58). – P. 1-24. – doi: 10.3390/agronomy6040058.
  17. **Crimaldi, M.** Optimization of Hemp Seeds (Cannapa Sativa L.) Oil Mechanical Extraction / **M. Crimaldi, S. Faugno, M. Sanninob, L. Ardito** // *Chemical engineering transactions*. – 2017. – Vol. 58. – P. 373-378. – doi: 10.3303/CET1758063.
  18. **Oomah, B. D.** Characteristics of hemp (Cannabis sativa L.) seed oil / **B. D. Oomah, M. Busson, D. V. Godfrey, J. C. G. Drover** // *Food Chemistry*. – 2002. – Vol. 76. – P. 33-43. – doi: 10.1016/S0308-8146(01)00245-X.
  19. **Мохер, Ю. В.** Нормативна база оцінювання конопляної олії / **Ю. В. Мохер, Л. М. Жуплатова, С. В. Дудукова** // *Луб'яні та технічні культури, збірник наукових праць*. – 2015. – № 4 (9). – С. 141-145.
  20. **Deferne, J. L.** Hemp seed oil: A source of valuable essential fatty acids / **J. L. Deferne, D.W. Pate** // *Journal of the International Hemp Association*. – 1996. – 3 (1). – P. 1-7.
  21. **Осейко, М. І.** Технологія рослинних олій: підруч. / **М. І. Осейко**. – К.: Варта, 2006. – 280 с.
  22. Конопляна олія. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Конопляна\\_олія](https://uk.wikipedia.org/wiki/Конопляна_олія).
  23. **Parker, T. D.** Fatty Acid Composition and Oxidative Stability of Cold-pressed Edible Seed Oils / **T. D. Parker, D. A. Adams, K. Zhou [et al.]** // *Journal of Food Science*. – 2003. – Vol. 4 (68). – P. 1240-1243. – doi: 10.1111/j.1365-2621.2003.tb09632.x.
  24. **Abuzaytoun, R.** Oxidative stability of flax and hemp oils / **R. Abuzaytoun, F. Shahidi** // *Journal of the American Oil Chemists` Society*. – 2006. – Vol. 83 (10). – P. 855-861. – doi: 10.1007/s11746-006-5037-7.
  25. **Da Porto, C.** Fatty acids composition and oxidation stability of hemp (Cannabis Sativa L.) seed oil extracted by supercritical carbon dioxide / **C. Da Porto, D. Decorti, F. Tubaro** // *Industrial Crops and Products*. – 2011. – Vol. 36. – P. 401-404. – doi: 10.1016/j.indcrop.2011.09.015.
  26. **Sova, N.** Research of Physical and Chemical Parameters of Oil Obtained from Organic and Conversion Hemp Seeds Varieties "Hliana" / **N. Sova, M. Lutsenko, A. Korchmaryova, K. Andrusyevych** // *Ukrainian Food Journal*. – 2018. – Vol. 7 (2). – P. 244-252. – doi: 10.24263/2304-974X-2018-7-2-7.
  27. **Кричковська, Л.** Функціональні компоненти в купажах рослинних олій із каротином / **Л. Кричковська, А. Белінська, О. Жулінська** // *Товари і ринки*. – 2010. – №2. – С. 97-103.
  28. Продукти з насіння конопель. URL: <https://desna-shop.com/uk/produkty-z-konopli/semena-konopli-uk/>

#### References (transliterated)

1. **Tkachenko, N. A., Nekrasov, O. P., Makov'ska, T. V.** Novi vydy mayoneziv ozdorovchoho pryznachennya [New types of health improvement mayonnaise]. *Materialy mizhnarodnoyi naukovoï konferentsiyi [MicroCAD Materials of the international scientific conference MicroCAD]*. Available at: [http://www.kpi.kharkov.ua/archive/microcad/2016/S12/file\\_285.pdf](http://www.kpi.kharkov.ua/archive/microcad/2016/S12/file_285.pdf).
2. **Bakhmach, V. O., Babenko, V. I., Levchuk, I. V., Padalka, T. V.** Tekhnolohiya mayoneziv na osnovi yayechnykh produktiv z vykorystanniam zbahachenykh karotynom oliy [Mayonnaise technology based on egg products using carotene-enriched oils]. *Produkty & Ingredyenty [Products & Ingredients]*, 2012, 5 (91), 46-48.
3. **Bakhmach, V. O., Peshuk, L. V.** Udoskonalennya tekhnolohiyi mayoneziv z vykorystanniam roslynnoyi syrovyny [Improving the technology of mayonnaise with use of vegetable raw materials]. *Kharchova promyslovist' [Food industry]*, 2015, 15, 27-31.
4. **Peshuk, L. V., Radziyev'ska, I. H.** Novi mayonezy z optymizovanykh retsepturnym skladom [New mayonnaise with optimized prescription formulations]. *Produkty & Ingredyenty [Products & Ingredients]*, 2012, 2 (88), 50-52.
5. **Byelins'ka, A. P., Anan'yeva, V. V., Baybak, O. I., Radziyev'ska, I. H.** Vykorystannya kupazhovanykh oliy funktsional'nykh pryznachennya u tekhnolohiyi mayoneziv [The use of blended oils for functional purposes in mayonnaise technology]. *Materialy 80 mizhnarodnoyi naukovoï konferentsiyi molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv. «Naukovi zdobutky molodi – vyrishennyu problem kharchuvannya lyudstva u XXI stolitti»*, (Kyiv, 10–11.04.2014). – K.: NUKhT, 2014, 1, 523-524.
6. **Lazaryeva, T. A., Lazaryev, M. I., Havrylyaka, A. Yu.** *Mayonez funktsional'noho pryznachennya [Mayonnaise of a functional purpose]*. Patent UA, no. 65390, 2011.
7. **Tabakaeva, O. V., Kalenik, T. K.** *Mayonez [Mayonnaise]*. Patent RF, no. 2000053107, 2014.

8. **Halukh, B. I., Paska, M. Z., Drachuk, U. R.** Zbahachennya mayoneziv i sousiv kompleksom pryrodnykh antyoksydantiv i biolohichno aktyvnykh rechovyn [Enrichment of mayonnaise and sauces with a complex of natural antioxidants and biologically active substances]. *Naukovyy visnyk LNUVMBT imeni S. Z. Gzhyts'koho [Scientific Bulletin of LNUVMBT named after S.Z.Gzhytsky]*, 2015, **1** (61), 11-16.
9. **Mank, V. V., Peshuk, L. V., Radziyevs'ka, I. H.** Rozroblennya emul'siynykh produktiv pidvyshchenoyi biolohichnoyi tsinnosti [Development of emulsion products of increased biological value]. *Kharchova promyslovist' [Food industry]*, 2005, **4**, 42-45.
10. **Shumilova, I. Sh.** Sovremennye tekhnologii prigotovleniya sousa mayonez na predpriyatiyakh obshchestvennogo pitaniya [Modern technologies of preparation of mayonnaise sauce at catering establishments]. *Maslozhirnyaya promyshlennost' [Oil and fat industry]*, 2012, **3**, 14-15.
11. **Rudavs'ka, H., Annyenkova, N.** Mayoneznyy sous z vykorystanniam nasinnya l'onu [Mayonnaise sauce using flax seeds]. *Prodovol'cha industriya APK [Food industry of AIC]*, 2011, **5** (13), 40-44.
12. **Korzun, V. N., Antonyuk, I. Yu., Shkira, O. I.** Tekhnolohiya sousiv z vykorystanniam fukusu ta nasinnya l'onu [The technology of sauces with the use of bladder wrack and flax seed]. *Naukovi pratsi ONAKhT [Scientific works of ONAFT]*, 2013, **44**, 138-142.
13. **Ikhno, M. P., Kotelevs'ka, A. A.** *Mayonez [Mayonnaise]*. Patent UA, no. 2002031975, 2002.
14. **Gorelikova, V. A., Skubaev, P. S.** Issledovanie vozmozhnosti vklucheniya v sostav mayoneza rastitel'nogo ekstrakta antioksidantnogo deystviya [Study the possibility of including of plant extract antioxidant activity in the composition of mayonnaise] *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv [Technology of food production]*, 2009, **1**, 105-109.
15. **Dezhyts, Yu. H., Razumova, L. M.** *Mayonez «Kryms'kyy» zbahachenny [Mayonnaise "Cryimskiy" enriched]*. Patent UA, no. 14129, 2006.
16. **Cherney, J. H., Small, E.** Industrial Hemp in North America: Production, Politics and Potential. *Agronomy*, 2016, **6** (58), 1-24, doi: 10.3390/agronomy6040058.
17. **Criminaldi, M., Faugno, S., Sanninob, M., Ardito L.** Optimization of Hemp Seeds (Canapa Sativa L.) Oil Mechanical Extraction. *Chemical engineering transactions*, 2017, **58**, 373-378, doi: 10.3303/CET1758063.
18. **Oomah, B. D., Busson, M., Godfrey, D. V., Drover, J. C. G.** Characteristics of hemp (Cannabis sativa L.) seed oil. *Food Chemistry*, 2002, **76**, 33-43, doi: 10.1016/S0308-8146(01)00245-X.
19. **Mokher, Yu. V., Zhuplatova, L. M., Dudukova, S. V.** Normatyvna baza otsinyuvannya konoplyanoyi oliyi [Regulatory framework for evaluation of hemp oil]. *Lub'nyani ta tekhnichni kul'tury, zbirnyk naukovykh prats' [Bast and technical crops, collection of scientific papers]*, 2015, **4** (9), 141-145.
20. **Deferne, J. L., Pate, D.W.** Hemp seed oil: A source of valuable essential fatty acids. *Journal of the International Hemp Association*, 1996, **3** (1), 1-7.
21. **Oseyko, M. I.** Tekhnolohiya roslynnykh oliy [Vegetable oil technology], K.: Varta, 2006, 280.
22. Konoplyana oliya. Available at: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Конопляна\\_о́лія](https://uk.wikipedia.org/wiki/Конопляна_о́лія).
23. **Parker, T. D., Adams, D. A., Zhou, K. et al.** Fatty Acid Composition and Oxidative Stability of Cold-pressed Edible Seed Oil. *Journal of Food Science*, 2003, **4** (68), 1240-1243, doi: 10.1111/j.1365-2621.2003.tb09632.x.
24. **Abuzaytoun, R., Shahidi, F.** Oxidative stability of flax and hemp oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2006, **83** (10), 855-861, doi: 10.1007/s11746-006-5037-7.
25. **Da Porto, C., Decorti, D., Tubaro, F.** Fatty acids composition and oxidation stability of hemp (Cannabis Sativa L.) seed oil extracted by supercritical carbon dioxide. *Industrial Crops and Products*, 2011, **36**, 401-404, doi: 10.1016/j.indcrop.2011.09.015.
26. **Sova, N., Lutsenko, M., Korchmaryova, A., Andrusyevych, K.** Research of Physical and Chemical Parameters of Oil Obtained from Organic and Conversion Hemp Seeds Varieties "Hliana". *Ukrainian Food Journal*, 2018, **7** (2), 244-252, doi: 10.24263/2304-974X-2018-7-2-7.
27. **Krychkovs'ka, L., Belins'ka, A., Zhulins'ka, O.** Funktsional'ni komponenty v kupazhovanykh roslynnykh oliyakh iz karotynom [Functional components in blended vegetable oils with carotene]. *Tovary i rynky [Products and markets]*, 2010, **2**, 97-103.
28. *Produkty z nasinnya konopel' Available at: <https://desna-shop.com/uk/produkty-z-konopli/semena-konopli-uk/>*

## Відомості про авторів (About authors)

**Сова Наталія Анатоліївна** – викладач, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, викладач кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції; м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0003-4750-2473; e-mail: sova.natalia.89@gmail.com.

**Nataliia Sova** – teacher at the department of technology storage and processing of agricultural products of Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4750-2473; e-mail: sova.natalia.89@gmail.com.

**Луценко Марина Василівна** – кандидат технічних наук, доцент, м. Дніпро Україна e-mail: maryna.lutsenko11@gmail.com.

**Maryna Lutsenko** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Dnipro, Ukraine; e-mail: maryna.lutsenko11@gmail.com.

**Лобанова Алевтина Олександрівна** – магістр, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна; e-mail: alev.1301.tina@gmail.com.

**Alevtyna Lobanova** – master, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine; e-mail: alev.1301.tina@gmail.com.

**Грекова Ніна Василівна** – доцент, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, доцент кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції; м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0003-1130-8548; e-mail: GrekovaNinaVas@gmail.com.

**Nina Hrekova** – Docent of department of technology storage and processing of agricultural products of Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1130-8548; e-mail: GrekovaNinaVas@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Сова, Н. А.** Використання конопляної олії у технології майонезу / **Н. А. Сова, М. В. Луценко, А. О. Лобанова, Н. В. Грекова** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 152-159. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.20.

*Please cite this article as:*

**Sova, N., Lutsenko, M., Lobanova, A., Hreкова, N.** Use of hemp oil in mayonnaise technology. *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), 152-159, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.20.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Сова, Н. А.** Использование конопляного масла в технологии майонеза / **Н. А. Сова, М. В. Луценко, А. А. Лобанова, Н. В. Грекова** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 152-159. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.20.

**АННОТАЦИЯ** Современная концепция здорового питания базируется на научно обоснованном подходе к совершенствованию состава, свойств и технологий пищевых продуктов, которые должны не только удовлетворять потребности организма человека в основных пищевых веществах и энергии, но и способствовать профилактике заболеваний, сохраняя здоровье и обеспечивая долголетие. Среди ассортимента пищевых продуктов масложировой отрасли значительное место занимают майонезы. Заинтересованность в расширении исследований технологии майонезов обусловлена предъявлением высоких требований к качеству компонентов жировой фазы. Особенно важно использование натуральных компонентов – растительных масел с выраженными пищевыми и биологическими свойствами и добавок, имеющих полезные для здоровья человека функциональные свойства. Учитывая уникальный состав масла конопляного, была сформулирована гипотеза о возможности применения его в качестве основного компонента майонеза. Объект исследования – технология производства майонеза с конопляным маслом. Цель работы заключается в исследовании органолептических, физико-химических показателей его качества; расчета питательной и энергетической ценности готового продукта. Отбор проб и определение содержания жира и кислотности осуществляли согласно ДСТУ 4560: 2006 «Майонезы. Правила приемки и испытания». Было изготовлено четыре образца майонеза: образец №1 – контрольный образец высококалорийного майонеза; образец №2 – с полной заменой подсолнечного масла на конопляное; образец №3 – с заменой 50 % подсолнечного масла на конопляное; образец №4 – с заменой 75 % подсолнечного масла на конопляное. По проведенной органолептической оценке сделали вывод, что образцы №1 и №3 имеют приемлемые результаты. Установлено, что лучшие показатели качества имеет рецептура майонеза «Конопляный», жировая основа которого состоит из 50 % конопляного масла и 50 % подсолнечного рафинированного масла, содержание жира в данном образце составляло 71,97 %, кислотность – 0,3 %. Методом газовой хроматографии проведено жирнокислотный анализ майонеза «Конопляный». Содержание ненасыщенных жирных кислот в данном образце составил 84 % от общего количества жирных кислот. Рассчитано энергетическую и питательную ценность майонеза «Конопляный», проведено сравнение с производственными образцами.

**Ключевые слова:** майонез; конопляное масло; подсолнечное масло; органолептическая оценка; содержание жира; кислотность; жирнокислотный состав; энергетическая ценность.

*Надійшла (received) 14.02.2019*

УДК 637.5.05/07

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.21

## М'ЯСОМІСТКІ КОМБІНОВАНІ ПРОДУКТИ З М'ЯСОМ КАЧКИ ТА СРІБЛЯСТОГО КАРАСЯ

**В. І. ТИЩЕНКО<sup>1\*</sup>, Н. В. БОЖКО<sup>1</sup>, В. М. ПАСІЧНИЙ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> кафедра технології молока і м'яса, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра технології м'яса і м'ясних продуктів, Національний університет харчових технологій, м. Київ, УКРАЇНА

\*e-mail: tischenko\_1958@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Комбіновані продукти харчування останнім часом стали одним з нових напрямків досліджень в галузі харчових технологій. За функціонально-технологічними, реологічними показниками, хімічним складом і біологічною цінністю м'ясо качки та карася є перспективною сировиною для повноцінної заміни свинини і яловичини в технології посічених напівфабрикатів, що і підтверджує актуальність досліджень розробки комбінованих виробів на основі зазначеної сировини. Метою досліджень було теоретичне та експериментальне обґрунтування доцільності комбінування м'яса качки та рибної сировини в складі м'ясомістких напівфабрикатів. Моделлю для вивчення доцільності комбінування м'яса качки з рибним фаршем була рецептура котлет «Домашні». У модельних зразках фаршів м'ясомістких напівфабрикатів визначено функціонально-технологічні властивості згідно зі стандартними методиками та в готовій продукції харчову цінність. Отримані результати засвідчують, що заміна яловичини і свинини в рецептурі котлет «Домашні» на м'ясо качки мускусної та фарш з м'яса карася сріблястого в певних співвідношеннях дозволяє виробляти посічені напівфабрикати з високими якісними показниками. Аналіз результатів показав, що комбінування у рецептурах м'яса мускусної качки та рибного фаршу покращує показники вмісту вологи, вологоутримуючої здатності, емульгуючої здатності і стабільності емульсії. Заміна яловичини і свинини в рецептурі котлет «Домашні» на м'ясо качки мускусної та фарш з м'яса карася сріблястого дозволяє підвищити вологоутримуючу здатність на 5,20-6,15 %, емульгуючу здатність на 8,72-18,21 %, стабільність емульсії на 7,65 %. При цьому вміст білків збільшується на 5,5-6,6 %, вміст жирів у виробі навпаки зменшується на 43,1-56,6 %. Органолептична оцінка якості розроблених напівфабрикатів підтвердила високу якість сенсорних показників та відповідність вимогам, що регулюються стандартами для традиційних напівфабрикатів на основі специфікації для даного сегмента продукції. Комплекс отриманих результатів дає можливість розглядати даний вид продукції як високобілковий та низькокалорійний, тобто позиціонувати її як продукт дієтичного харчування.

**Ключові слова:** фарш з м'яса карася сріблястого; м'ясо качки мускусної; м'ясомісткий напівфабрикат; функціонально-технологічні показники

## MEAT-CONTAINING COMBINED PRODUCTS WITH MUSCOVY DUCK AND SILVER CARP MEAT

**V. I. TISCHENKO<sup>1</sup>, N. V. BOZHKO<sup>1</sup>, V. M. PASICHNYI<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Department of milk and meat technology, Sumy national agrarian university, Sumy, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of meat and meat products technology, National university of food technology, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Results of studying the developed meat-containing semi-finished products are shown; an analysis of the results was performed, which confirm the possibility to combine the meat of duck and freshwater fish meat in the formulation for meat-containing semi-finished products by completely replacing pork and beef in the formulations. The aim of the research was theoretical and experimental substantiation of expediency of combining duck meat and fish raw materials in the composition of meat-containing semi-finished products. A model for studying the feasibility of combining duck meat with fish minced meat was the formula for the "Domashnie" cutlets. In the model samples of minced meat-containing semi-finished products functional and technological properties, the nutritional value, were determined according to standard methods. Combining in the formulations of meat-containing semi-finished products of duck meat and freshwater fish meat made it possible to obtain model minced meat with high functional-technological properties: the value of moisture-binding capacity is up to 72.34-73.38 %, moisture-retaining capacity is up to 74.77 %, emulsifying capacity is up to 61.42 %, stability of the emulsion is up to 68.37 %, which are higher in comparison with semi-finished products based on traditional kinds of meat. The combination of different kinds of raw materials of local origin in the formulation for meat-containing minced semi-finished products makes it possible to receive a product with a high content of proteins. Replacing beef and pork in the recipe the "Domashnie" cutlet by meat of Muscovy duck and Silver minced carp meat allows producing semi-finished products with high qualitative parameters. In this case, the protein content is increased by 5.5-6.6%, the fat content of the products, on the contrary, decreases by 43.1-56.6%. A sensory quality assessment of the developed semi-finished products has confirmed the high quality of organoleptic indicators and compliance with the requirements regulated by standards for traditional minced semi-finished products, based on the specifications for a given segment of products.

**Keywords:** Silver minced carp meat; Muscovy duck meat; meat-containing semi-finished product; functional and technological indicators

### Вступ

Розроблення комбінованих продуктів харчування є одним з ефективних напрямків

підвищення якості раціону споживання і широко застосовується в галузі харчових технологій. Використання в рецептурах традиційної м'ясної сировини в заданих співвідношеннях, а також



комбінування її з рослинною сировиною, гідробіонтами та функціонально-технологічними харчовими добавками дозволяє не лише урізноманітнити асортимент та надати готовим виробам різні смакові відтінки, але і підвищити функціонально-технологічні властивості та подовжити термін їх реалізації [1].

Дослідження в технології комбінованих м'ясо-рибних продуктів характеризуються основними трьома напрямками, а саме:

- Заміна частини м'ясної сировини на вторинні продукти переробки тваринної та рослинної сировини з урахуванням їх функціонально-технологічної сумісності;
- Комбінування м'яса з овочами, грибами та крупами для підвищення збалансованості якісного складу поживних речовин;
- Комбінування м'яса з рибою, продуктами переробки гідробіонтів для розроблення продуктів функціонального і дієтичного спрямування [2].

Перспективним напрямком використання комбінованих фаршів є виробництво посічених напівфабрикатів, які містять інгредієнти, що окремо не можуть забезпечувати традиційні для заданого виду фабрикуату органолептичні, фізико-хімічні, поживні і функціонально-технологічні властивості фаршів і готових виробів.

Технологія посічених напівфабрикатів має переваги тому, що дана продукція може бути виготовлена не лише із традиційної сировини, але і м'яса механічного обвалювання, субпродуктів, вторинної білоквмісної сировини, що робить технологію практично безвідходною. Під час приготування фаршів зберігаються практично всі поживні властивості та показники сировини. Комбінування в складі рецептур рослинних, рибних та інших інгредієнтів підвищує збалансованість продуктів за основними поживними речовинами, тим самим підвищуючи харчову цінність і дозволяє розширити асортимент продукції з визначеними смако-ароматичними показниками. Це дозволяє отримувати продукти цільового спрямування, створювати технологічні рецептури якісно нових продуктів із заданим хімічним складом відповідно до вимог харчової комбінаторики, потреб організму споживачів різних вікових груп, у мов праці, стану здоров'я. Посічені напівфабрикати, завдяки використанню криогенних технологій і сучасних пакувальних матеріалів мають подовжений термін зберігання, можливість швидкого приготування після термічної обробки [1].

Залежно від складу рецептури, масової частки білка, жиру та певних фізико-хімічних показників посічені напівфабрикати поділяють на дві групи: м'ясні та м'ясомісткі, останні займають більший сегмент асортименту даного виду продукту. Підвищений попит на м'ясомісткі напівфабрикати зумовлений нижчою собівартістю,

в порівнянні з м'ясними, а різноманітність сировини в рецептурі дозволяє регулювати поживну та енергетичну цінність виробів, якісний склад есенціальних речовин, наближаючи їх продуктів здорового харчування [3].

Технологічні та споживчі характеристики, збалансованість харчових компонентів визначається їх хімічним складом, доступністю системі травлення, відповідно до принципів раціонального харчування. Це в свою чергу спонукає шукати нові види сировини та способи її технологічної модифікації для отримання фабрикатів з певними функціонально-технологічними показниками [4]. Крім харчової цінності така сировина повинна володіти високими реологічними показниками, здатністю до формування після подрібнення для утримування заданої форми після заморожування та термічної обробки, добре утримувати вологу тощо.

Структурно-механічні властивості фаршевих систем значною мірою визначаються складом м'язових білків, їх будовою, вмістом води та жиру [5,6].

Важливу роль у збільшенні обсягів виробництва напівфабрикатів, зниження собівартості продукції та підвищення рентабельності виробництва відіграє раціональний підхід до вибору та використання сировинних ресурсів. Для нашої країни традиційною сировиною вважається яловичина та свинина, а також м'ясо курчат-бройлерів. Проте у зв'язку зі зростанням цін на цю сировину, виробники продукції все частіше звертають увагу на ресурси, які до цього часу майже не використовувались. Насамперед, мова йде про м'ясо водоплавної птиці, зокрема качки Пекінської та Мускусної, яке в останній час ефективно використовується в складі м'ясних і м'ясомістких продуктів [7]. Заслугує також уваги використання у м'ясомістких напівфабрикатах рибного фаршу, зокрема карася Сріблястого.

Автори [8-10] дослідили, що м'ясо карася сріблястого належить до білкової сировини, з низьким вмістом жиру, яка за структурно-механічними, реологічними показниками здатністю до гелеутворення придатна до використання в технології посічених напівфабрикатів.

У дослідженнях [8-10] встановлено, що фаршева продукція із м'язової тканини карася володіє різко контрастною консистенцією, що на думку авторів обмежує її використання в технології фаршевих продуктів харчування. Корикування реологічних показників фаршу, отриманого від переробки прісноводної риби, і в першу чергу карася, ведеться шляхом промивки фаршу.

Проте на думку зарубіжних і вітчизняних фахівців виробництво промитого рибного фаршу з економічної та технологічної точки зору не

ефективно [11,12]. Вихід промитого фаршу як правило в два три рази нижче, а дія надлишкової вологи під час промивки сприяє денатурації білків та підвищує кислотне число ліпідів, тим самим зменшуючи термін реалізації промитого фаршу.

Це свідчить про перспективність застосування качиноного м'яса як технологічного прийому, спрямованого на коригування реологічних показників м'ясо-рибних фаршів [13-15].

Одним із методів покращення функціонально-технологічних властивостей (ФТВ) та реологічних показників фаршевих систем є комбінування сировини із пониженими значеннями ФТВ з більш якісною та відносно не дорогою (порівняно з яловичиною) сировиною. Такою сировиною може бути обвалене м'ясо качки Мускусної [16]. Даний вид м'яса зручний в переробці, має високі сенсорні характеристики, поживну і біологічну цінність [17]. Вміст сполучної тканини в ньому не перевищує 5,2 %, співвідношення білка до жиру становить 1:1,04, що є близьким до оптимального.

Харчова та біологічна цінність м'яса та м'ясопродуктів, в тому числі і м'ясомістких, визначається не лише вмістом білка та жиру, але й збалансованим складом амінокислот. Авторами [18-21] досліджено, що м'ясо карася сріблястого та качки Мускусної за вмістом переважної кількості незамінних амінокислот перевищують показник білка еталону і, в першу чергу, дефіцитної амінокислоти – лізину.

Жирнокислотний склад ліпідів м'язової тканини карася та качки за вмістом ненасичених жирних кислот (ПНЖК) є кращим ніж у свинини та яловичини. Так ПНЖК у м'ясі карася сріблястого коливається на рівні 24,72-37,16 %, що в декілька разів є більшим, ніж в ліпідах свинини та яловичини [22,23].

Таким чином аналіз літературних джерел доводить, що за функціонально-технологічними, реологічними показниками, хімічним складом і біологічною цінністю м'ясо качки та карася є перспективною сировиною для повноцінної заміни свинини і яловичини в технології посічених напівфабрикатів, що і підтверджує актуальність досліджень розробки комбінованих виробів на основі зазначеної сировини. В той же час нами не було виявлено систематизованих даних про рецептурні співвідношення і технологічні параметри виробництва даного виду продукції.

### Мета роботи

Метою досліджень є теоретичне та експериментальне обґрунтування доцільності комбінування м'яса качки та рибної сировини в складі м'ясомістких посічених напівфабрикатів.

### Виклад основного матеріалу

Дослідження були проведені в Сумському національному аграрному університеті на кафедрі технології молока і м'яса.

Основними інгредієнтами рецептур посічених м'ясомістких напівфабрикатів були м'ясо качки Мускусної, фарш рибний з м'яса карася сріблястого, хліб пшеничний, панірувальні сухарі, цибуля ріпчаста, яйця курячі, спеції.

При проведенні досліджень використані традиційні методи досліджень: визначення масової частки білку за методом Кельдаля згідно з ДСТУ ISO 1871:2003, вміст жиру за методом Соклета згідно з ГОСТ 23042-86, визначення рН потенціометричним методом згідно з ДСТУ 8550:2015 на рН-метрі «Аніон-4100», масова частка вологи – згідно з ГОСТ 9793-74, вологозв'язуюча (ВЗЗ<sub>м</sub>, ВЗЗ<sub>а</sub>) та вологоутримуюча здатність (ВУЗ) фаршів, емульгуюча здатність та стабільність емульсії за [24], органолептична оцінка за [25].

Вірогідність результатів забезпечувалась трикратним повторюванням, експериментальні дані оброблювали з використанням критерію Ст'юдента, при цьому похибка експерименту не перевищувала 5,0% [24].

### Обговорення результатів

У процесі досліджень визначалась можливість заміни у складі рецептури котлет «Домашні» згідно ДСТУ 4437-2005 м'яса свинини на м'ясо качки Мускусної у кількості 30,5, 25,5 та 20,5 % відповідно до розроблених дослідних рецептур. Фарш карася сріблястого в кількості 30,5, 34,5 та 39,5 % вводили в рецептуру на заміну яловичини. Інші складові рецептури-аналога не змінювались.

У результаті комбінування м'ясної сировини відбулася зміна класифікації виробів з м'ясних на м'ясомісткі.

Склад розроблених рецептур наведено в табл. 1.

Приготування фаршу та формування напівфабрикатів проводили згідно ДСТУ 4437-2005 за технологічною схемою (рис. 1).

Враховуючи специфіку запропонованої сировини були проведені дослідження впливу її відсоткового вмісту у рецептурах на харчову цінність та технологічні показники фаршів і готових виробів (табл. 2, 3).

За результатами досліджень було встановлено, що хімічний склад розроблених напівфабрикатів в порівнянні з виробами, виготовленими за традиційною технологією дещо змінюється.

Так, вміст білків збільшився на 5,5-6,6 %, а вміст жиру у виробі знижується в діапазоні від

43,1 до 56,6 %. Зниження вмісту жиру в певній мірі впливає на подовження терміну реалізації напівфабрикатів, а також дозволяє віднести ці продукти до дієтичних.

Крім того, у розроблених рецептурах в порівнянні з аналогом вміст мінеральних речовин зріс майже на 42 %, що вказує на можливість збагачення продуктів важливими мікроелементами такими як кальцій, фосфор, магній, наближаючи їх вміст до фізіологічної потреби і складає 1:1,7:0,5.

Таким чином, заміна в рецептурі посічених напівфабрикатів традиційної сировини на м'ясо качки мускусної та сріблястого карася дозволило досягти високого ступеня збалансованості готових виробів за комплексом показників. Крім того, виготовлені за новими рецептурами м'ясомісткі напівфабрикати мають нижчу калорійність в середньому на 31,7 %.

Таблиця 1 – Рецептури м'ясомістких посічених напівфабрикатів із м'ясом качки та прісноводної риби

№	Інгредієнти	Аналог Котлети «Домашні»	Зразок №1	Зразок №2	Зразок №3
1.	Свинина	30,5	-	-	-
	Качка мускусна		30,5	25,5	20,5
2.	Яловичина	30,5	-	-	-
3.	Фарш карася сріблястого	-	30,5	34,5	39,5
4.	Хліб пшеничний	12,0	12,0	12,0	12,0
5.	Панірувальні сухарі	4,0	4,0	4,0	4,0
6.	Цибуля ріпчаста	1,5	1,5	1,5	1,5
7.	Перець мелений	0,06	0,06	0,06	0,06
8.	Яйця курячі	2,0	2,0	2,0	2,0
9.	Сіль	1,2	1,2	1,2	1,2
10.	Вода	18,3	18,3	18,3	18,3

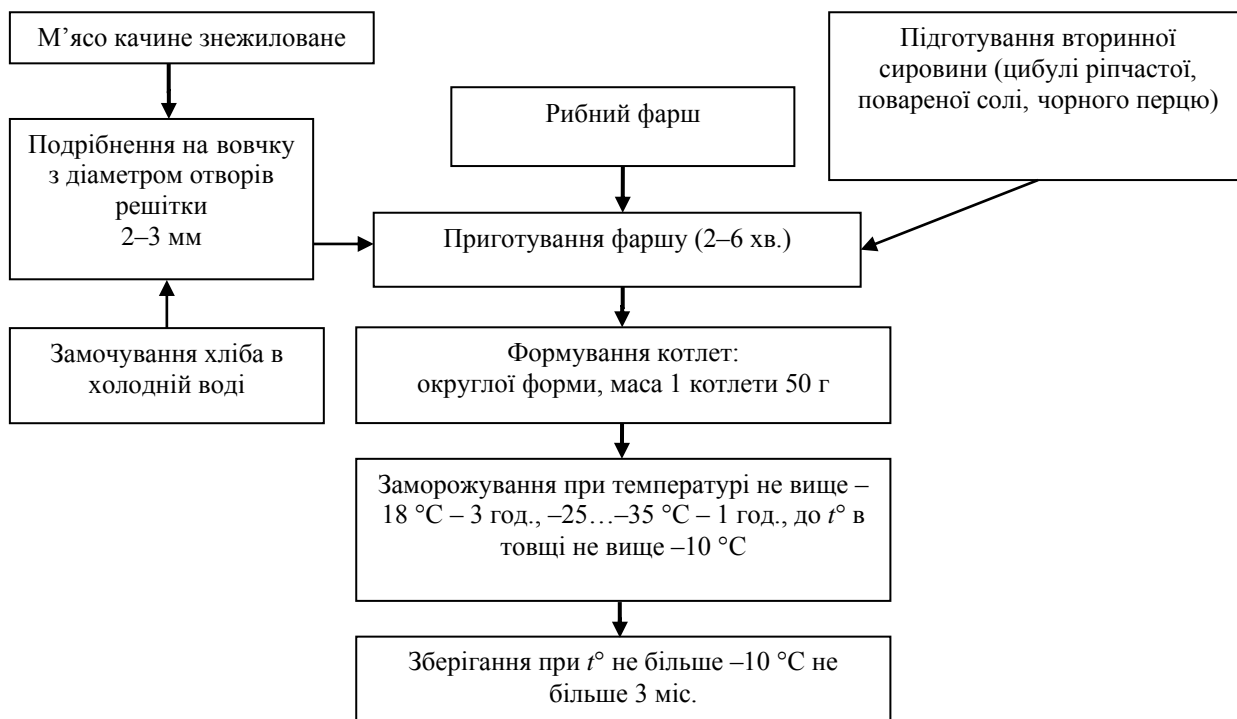


Рис. 1 – Технологічна схема виготовлення посічених напівфабрикатів

Таблиця 2 – Показники харчової цінності дослідних зразків

Найменування	Контроль	Рецептура № 1	Рецептура № 2	Рецептура № 3
Вміст білка, г/100 г	11,49	12,25	12,13	12,15
Вміст жиру, г/100 г	16,21	9,12	8,05	7,03
Вміст вуглеводів, г/100 г	7,79	7,79	7,79	7,79
Вміст мінеральних речовин, г/100 г	0,87	1,16	1,18	1,23
Вміст харчових волокон, г/100 г	0,91	0,91	0,91	0,91
Енергетична цінність, кКал	223	162,24	152,13	143,03

Таблиця 3 – Функціонально-технологічні показники розроблених фаршевих систем

Найменування	Контроль	Рецептура № 1	Рецептура № 2	Рецептура № 3
pH	5,98±0,05	6,28±0,05	6,31±0,03	6,20±0,07
ВЗЗ <sub>м</sub> , %	72,56±0,33	72,34±0,19	73,38±0,11	72,51±0,41
ВЗЗ <sub>а</sub> , %	97,57±0,13	97,73±0,57	97,68±0,31	97,70±0,51
Пластичність, см <sup>2</sup> /г	8,07±0,06	8,30±0,07	8,30±0,01	8,37±0,03

Вологозв'язуюча здатність (ВЗЗ<sub>м</sub> та ВЗЗ<sub>а</sub>) в усіх зразках була достатньо високою, проте відмічена тенденція на збільшення зв'язаної вологи у дослідних зразках у межах 0,6-0,2 %.

В усіх дослідних фаршах показник pH знаходився в інтервалі 5,98-6,31. У даному діапазоні виключається ріст та розвиток нейтрофільних мікроорганізмів, оптимумом для яких є значення pH 5,5-5,7.

Відносно висока емульгуюча здатність білковомістких компонентів в дослідних зразках фаршів забезпечує отримання виробів з підвищеною пластичністю та ніжністю. Так, збільшення частки рибної сировини у рецептурі дослідних зразків підвищує пластичність фаршевої системи на 3,2 %.

На рис. 2 представлені показники вмісту вологи та вологоутримуючої здатності (ВУЗ) напівфабрикатів.

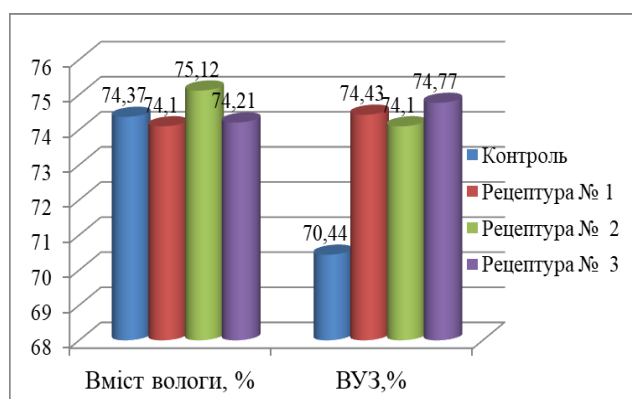


Рис. 2 – Залежність функціонально-технологічних показників від рецептури

З даних рис. 2, видно, що у дослідних зразках відбувається збільшення ВУЗ на 5,20-6,15 %. Це пояснюється внесенням до рецептур м'яса прісноводної риби з більшим вмістом сполучнотканинних білків та ефективним підбором рецептурних інгредієнтів. Результати досліджень показують перспективність використання м'яса мускусної качки та прісноводної риби, у рецептурах м'ясомістких січених напівфабрикатів, які мають високі функціонально-технологічні властивості.

Для отримання готових виробів високої якості на основі багатокомпонентних полідисперсних м'ясомістких систем важливим є підвищення таких функціонально-технологічних показників як емульгуюча здатність (ЕЗ) і стабільність емульсії (СЕ). Отримані результати досліджень даних показників наведені на рис. 3 і 4.

Отримані результати свідчать, що фарші не тільки володіють високими показниками ВЗЗ<sub>а</sub> і ВУЗ, а й можуть ефективно утримувати жир у складі утвореної емульсії. Це дозволяє забезпечити введення жиру в структуру фаршевої системи і отримати стійку емульсію жиру у воді.

Показник ЕЗ у зразках фаршів збільшився на 8,72-18,21 % порівняно з контрольним зразком. Це пояснюється складом фаршевих систем: у рецептурі № 1, в якій вміст м'яса карася становить 30,5 %, а зі збільшенням частки м'яса карася в рецептурі ЕЗ збільшується.

Здатність фаршевої системи утримувати жир залежить від рецептурного складу виробу. Так, стабільність емульсії в контрольному зразку становила 63,51±0,20 %, в той час як цей показник в

дослідних зразках збільшувався від  $64,13 \pm 0,7$  до  $68,37 \pm 1,44$  %.

Розроблені рецептурні композиції володіють достатньою здатністю зв'язувати жир та утримувати його після термічної обробки.

Проведені дослідження свідчать, що розроблені фарші посічених напівфабрикатів мають високі функціонально-технологічні показники.

Дослідження сенсорних показників зразків розроблених котлет дегустаційною комісією з семи експертів представлено на рис. 5.

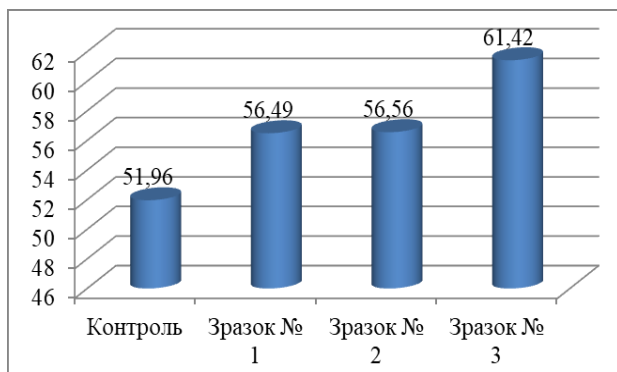


Рис. 3 – Зміна емульгуючої здатності м'ясних фаршів

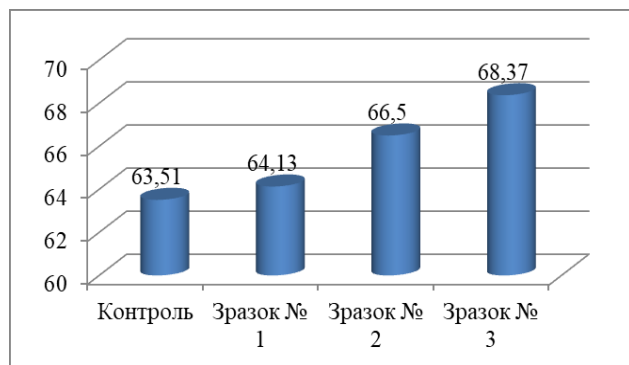


Рис. 4 – Зміна стійкості емульсії м'ясних фаршів

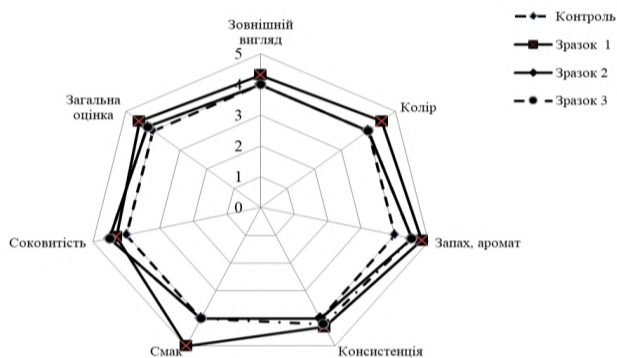


Рис. 5 - Профілограма оцінки якості досліджуваних зразків м'ясомістких напівфабрикатів

Дані рис. 5 засвідчують, що всі зразки котлет відповідають вимогам стандарту за органолептичними показниками. Слід відмітити, що усі зразки дослідних котлет отримали вищі оцінки порівняно з контрольним зразком.

При цьому загальна оцінка зразків м'ясомістких котлет із м'ясом Мускатної качки та сріблястого карася становила 4,2-4,5.

## Висновки

Отримані результати засвідчують, що заміна яловичини і свинини в рецептурі котлет «Домашні» на м'ясо качки мускусної та фарш з м'яса карася сріблястого в певних співвідношеннях дозволяє виробляти посічені напівфабрикати з високими якісними показниками.

Визначено, що при проведенні оптимізаційного комбінування м'ясної, рибної і рослинної сировини досягається збільшення вмісту білків на 5,5-6,6 %, покращується збалансованість напівфабрикатів по вмісту ПНЖК зі зменшенням частки жирів на 43,1-56,6 %. Це дає можливість віднести дані продукти до продуктів дієтичного харчування.

Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення впливу рецептурного комбінування м'яса качки та фаршу з м'яса сріблястого карася на структурно-механічні показники даних продуктів та обґрунтування раціональних термінів їх зберігання в охолодженому і замороженому стані.

## Список літератури

1. **Лилишенцева, А. Н.** Перспективные направления создания комбинированных продуктов / **А. Н. Лилишенцева, Д. А. Сафронова, Н. В. Комарова** // *Пищевая промышленность*. – 2008. – № 2. – С. 16–19.
2. **Абрамова, Л. С.** Поликомпонентные продукты питания на основе рыбного сырья / **Л.С. Абрамова**. – М.: Изд-во ВНИРО, 2005. – 175 с.
3. **Смоляр, В. І.** Сучасне обґрунтування нормативів харчування / **В. І. Смоляр** // *Проблеми харчування*. – 2006. – № 3 (12). – С. 24-30.
4. **Пасічний, В. М.** Перспективи використання пакувальних матеріалів для термічної обробки м'яса та м'ясопродуктів / **В. М. Пасічний, А. І. Українець, О. В. Храпачов, А. І. Маринін** // *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. – 2017. – № 2(97). – С. 71-75.
5. **Косой, В. Д.** Инженерная реология / **В. Д. Косой**. – СПб.: ГИОРД, 2007. – 664 с.
6. **Абрамова, Л. С.** Структурообразование в фаршевых системах / **Л. С. Абрамова** // *Рыбное хозяйство*. – 1989. – № 2. – С. 84-85.
7. **Божко, Н. В.** М'ясо-місткі варені ковбаси з використанням м'яса качки / **Н. В. Божко, В. М. Пасічний, В. В. Бордунова** // *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С. З. Жицького*. – Львів, 2016. – Т. 18. – № 2 (68). – С.143-146.
8. **Маевская, Т. Н.** Реологические свойства рыбных гелей на основе промытых фаршей / **Т. Н. Маевская, А. С.**

- Виннов, В. В. Манк** // *Продовольча індустрія АПК*. – 2013. – № 2. – С.6-9.
9. **Бредихина, О. В.** Научные основы производства рыбопродуктов / **О. В. Бредихина, М. В. Новикова, С. А. Бредихина**. – М.: Колос, 2009. – 152 с.
  10. **Сидоренко, О. В.** Наукове обґрунтування і формування споживних властивостей продуктів з прісноводної риби та рослинної сировини: дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.18.15 «Товарознавство» / **Сидоренко Олена Володимирівна**. – К., 2009. – 292 с.
  11. **Сидоренко, О. В.** Товарознавча характеристика сировини для виробництва функціональних риборослинних продуктів / **О. В. Сидоренко** // *Зб. наук. праць*. – К.: КНТЕУ, 2002. – С. 34-40.
  12. **Mohanty, B. P.** Nutritional composition of food fishes and their importance in providing food and nutritional security / **B. P. Mohanty, A. Mahanty, S. Ganguly, T. Mitra, D. Karunakaran, R. Anandan** // *Food Chemistry*. – 2017. – doi:10.1016/j.foodchem.2017.11.039.
  13. **Маевская, Т. Н.** Усовершенствование технологии промытого фарша из пресноводной рыбы / **Т. Н. Маевская, А. С. Виннов** // *Технічні науки: стан, досягнення і перспективи розвитку м'ясної, олієжирової та молочної галузей*: Друга міжнар. наук.-техн. конф., 20-21 берез. 2013 р.: прогр. і матеріали. – К.: НУХТ, 2013. – Ч. I. – С. 20-21.
  14. **Тищенко, В. І.** Рибний фарш як сировина для виробництва полікомпонентних продуктів харчування / **В. І. Тищенко, Н. В. Божко, В. М. Пасічний** // *Збірник наукових праць «Вісник Харківського нац. техн. унів. с.г. ім. Петра Василенка»*. – Харків, 2016. – С. 100-108.
  15. **Божко, Н. В.** Экстракт журавлины в технологии вареных ковбас с мясом водоплавающей птицы / **Н. В. Божко, В. І. Тищенко, В. М. Пасічний** // *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Гжицького*. – 2017. – Т. 19, № 75. – С. 106-109.
  16. **Bozhko, N.**, Development of meat-containing semi-finished products on the basis of regional raw production / **N. Bozhko, V. Tischenko, V. Pasichnyi, M. Polumbryk, O. Haschuk** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – 4/11(94). – P. 49-54. – doi:10.15587/1729-4061.2018.140052.
  17. **Tischenko, V.** Optimization of the recipes of meat loaves using hydrobionts / **V. Tischenko, N. Bozhko, V. Pasichnyi** // *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*. – 2017. – 19(80). – P. 38-42. – doi:10.15421/nvlvet8008.
  18. **Pasichnyi, V.** Development of cooked smoked sausage on the basis of muskovy duck meat / **V. Pasichnyi, N. Bozhko, V. Tischenko, Ye. Kotliar** // *Food science and technology*. – 2018. – Vol. 12, Issue 4. – P. 102-109.
  19. **Huda, N.** Amino Acid and Fatty Acid Profiles of Peking and Muscovy Duck Meat / **N. Huda, A. Aronal, R. Ahmad**. // *International Journal of Poultry Science*. – 2012. – 11 (3). – P. 229-236. – doi: 10.3923/ijps.2012.229.236.
  20. **Заляліева, Д. Р.** Мясная продуктивность мускусных уток / **Д.Р. Заляліева, В. И. Криштафович** // *Мясная индустрия*. – 2010. – №8. – С. 43-45.
  21. **Лисовой, В. В.** Малоиспользуемая прудовая рыба и отходы ее переработки товарной прудовой рыбы – ценное сырье для получения белковой добавки / **В. В. Лисовой** // *Новые технологии*. – 2010. – № 3. – С. 11–15.
  22. **Ashraf, M.** Nutritional values of wild and cultivated silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) / **M. Ashraf, A. Zafar, A. Rauf** [et al.] // *International Journal of Agriculture and Biology*. – 2011. – Vol. 13, Is. 2. – P. 210-214.
  23. **Fedorova, D. V.** Research of fatty acid composition of lipids of dry fish and plant semi-finished food products / **D. V. Fedorova, P. O. Karpenko, O. O. Vasylieva** // *Kharchova nauka i tekhnolohiya*. – 2017. – 11 (3). – P. 61-70. – doi:10.15673/fst.v11i3.608.
  24. **Гарбуз, В. Г.** Лабораторний практикум з технології м'яса / **В. Г. Гарбуз, Л. В. Агунова, Г. В. Шлапак** // Під загальною редакцією д-ра техн. наук, професора Віннікової Л. Г. – Одеса, 2010. – 285 с.
  25. **Кишенько, І. І.** Технологія м'яса та м'ясопродуктів. Практикум: навч. Посібник / **І. І. Кишенько, В. М. Старцова, Г. І. Гончаров** // *Нац. ун-т харч. технол.* – Київ: НУХТ, 2010. – 367 с.

## References (transliterated)

1. **Lylyshenceva, A. N., Safronova, D. A., Komarova N. V.** Perspektivnye napravleniya sozdaniya kombinyrovannykh produktov [Perspective directions for creating combined products]. *Pyshhevaya promyshlennost'*, 2008, **2**, 16-19.
2. **Abramova, L. S.** Polykomponentnye produkty putanyia na osnove rybnogo syr'ia [Multicomponent food based on fish raw materials]. M.: Yzd-vo VNYRO, 2005, 175.
3. **Smoljar, V. I.** Suchasne obgruntuvannja normatyviv harchuvannja. *Problemy harchuvannja*, 2006, **3** (12), 24-30.
4. **Pasichnyj, V. M., Ukrainec, A. I., Khrapachov, O. V., Marynin, A. I.** Perspektivny vykorystannja pakoval'nyh materialiv dlja termichnoi'obrobky m'jasa ta m'jasoproduktiv. *Tehnika, energetyka, transport APK*, 2017, **2**(97), 71-75.
5. **Kosoj, V. D.** Ynzhenernaja reologija [Engineering rheology]. SPb.: GYORD, 2007, 664.
6. **Abramova, L. S.** Strukuroobrazovanye v farshevyyh systemah. *Rybnoe hozjajstvo*, 1989, **2**, 84-85.
7. **Bozhko, N. V., Pasichnyj, V. M., Bordunova, V. V.** M'jaso-mistki vareni kovbasy z vykorystannjam m'jasa kachky [Meat-cooking cooked sausages using duck meat]. *Naukovyj visnyk LNUVMBT imeni S. Z. Gzhyc'kogo [Scientific collection of LNUWMBT named after S.Z.Gzhyc'ky]*, L'viv, 2016, **18**, **2** (68), 143-146, doi:10.15421/nvlvet6829.
8. **Maevskaja, T. N., Vynnov, A. S. Mank, V. V.** Reologicheske svojstva rybnyh gelej na osnove promytyh farshej [Rheological properties of fish gels based on washed mince]. *Prodovol'cha industrija APK [Food industry of agroindustrial complex]*, 2013, **2**, 6-9.
9. **Bredyhyna, O. V., Novykova, M. V., Bredyhyna, S. A.** Nauchnye osnovy proyzvodstva ryboproduktov [Scientific basis for the production of fish products]. M.: Kolos, 2009, 152.
10. **Sydorenko, O. V.** Naukove obgruntuvannja i formuvannja spozhyvnyh vlastyvostej produktiv z prsnovodnoi' ryby ta roslynnoi' syrovyny: dys. na zdobuttja nauk. stupenja dokt. tehn. nauk: spec. 05.18.15 „Tovaroznnavstvo” [Scientific substantiation and formation of consumer properties of products from freshwater fish and plant material: diss. for the degree of doc. tech sciences: specialty 05.18.15 "Commodity study"]. K., 2009, 292.
11. **Sydorenko, O. V.** Товарознавча характерыстыка сыровyny dlja vyrobnyctva funkcional'nyh ryboroslynnyh produktiv [Commodity characteristics of raw materials for the



- production of functional fish-breeding products]. *zb. nauk. prac'*, K.: KNTEU, 2002, 34-40.
12. **Mohanty, B. P., Mahanty, A., Ganguly, S., Mitra, T., Karunakaran, D., Anandan, R.** Nutritional composition of food fishes and their importance in providing food and nutritional security. *Food Chemistry*, 2017, doi: 10.1016/j.foodchem.2017.11.039 .
  13. **Maevskaja, T. N., Vinnov, A. S.** Usovershenstvovanie tehnologii promyтого farsha iz presnovodnoj ryby [Improving the technology of washed freshwater minced fish]. *Tehnichni nauki: stan, dosjagnennja i perspektivi rozvitku m'jasnoj, oliezhirovoj ta molochnoj galuzej: Druga mizhmar. nauk.-tehn. konf.*, 20-21 berez. 2013 r.: progr. i materialy. – K.: NUHT, 2013, **I**, 20-21.
  14. **Tishhenko, V. I., Bozhko, N. V., Pasichnij, V. M.** Ribnij farsh jak sirovina dlja virobnictva polikomponentnih produktiv harchuvannja [Minced meat as a raw material for the production of polycomponent food products]. *Zbirnik naukovih prac' «Visnik Harkivs'kogo nac. tehn. univ. s.g. im. Petra Vasilenka [Collection of scientific works "Herald of Kharkiv National University. Named after Petr Vasilenko]*, Harkiv, 2016, 100-108.
  15. **Bozhko, N. V., Tishhenko, V. I., Pasichnij, V. M.** Ekstrakt zhuravlinoj ptici [Cranberry Extract in the Technology of Cooked Sausages with Waterfowl]. *Naukovij visnik LNUVMBT imeni S.Z. Izhic'kogo*, 2017, **19**, **75**, 106-109, doi: 10.15421/nvlvet7521.
  16. **Bozhko N., Tishhenko, V., Pasichnij, V., Polumbryk, M., Haschuk, O.** Development of meat-containing semi-finished products on the basis of regional raw production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, **4/11(94)**, 41-54, doi: 10.15587/1729-4061.2018.140052.
  17. **Tischenko, V., Bozhko N., Pasichnij, V.** Optimization of the recipes of meat loaves using hydrobionts. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*, 2017, **19(80)**, 38-42, doi: 10.15421/nvlvet8008.
  18. **Pasichnyi, V., Bozhko, N., Tishhenko, V., Kotliar, Ye.** Development of cooked smoked sausage on the basis of Muscovy duck meat. *Food science and technology*, 2018, **12**, **4**, 102-109, doi: 10.15673/fst.v12i4.1207.
  19. **Huda, N., Aronal, A., Ahmad, R.** Amino Acid and Fatty Acid Profiles of Peking and Muscovy Duck Meat. *International Journal of Poultry Science*, 2012, **11** (3), 229–236, doi: 10.3923/ijps.2012.229.236.
  20. **Zaljalieva, D. R., Krishtafovich, V. I.** Mjasnaja produktivnost' muskusnyh utok [Meat productivity of musk ducks]. *Mjasnaja industrija [Meat industry]*, 2010, **8**, 43-45.
  21. **Lisovoj, V. V.** Maloispol'zuemaja prudovaja ryba i othody ee pererabotki tovarnoj prudovoj ryby – cennoe syr'e dlja poluchenija belkovoju dobavki [Little-used pond fish and waste from its processing of marketable pond fish - valuable raw material for protein supplement]. *Novye tehnologii*, 2010, **3**, 11-15.
  22. **Ashraf, M., Zafar, A., Rauf, A.** [et al.] Nutritional values of wild and cultivated silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *International Journal of Agriculture and Biology*, 2011, **13**, **2**, 210-214.
  23. **Fedorova, D. V., Karpenko, P. O., Vasylieva, O. O.** Research of fatty acid composition of lipids of dry fish and plant semi-finished food products. *Kharchova nauka i tekhnolohiya*, 2017, **11** (3), 61-70, doi: 10.15673/fst.v11i3.608.
  24. **Garbuz, V. G., Agunova, L. V., Shlapak, G. V.** Laboratornij praktikum z tehnologii m'jasa [Laboratory Workshop on meat technology]. Odessa, 2010, 285.
  25. **Kishen'ko, I. I., Starchov, V. M., Goncharov, G. I.** Tehnologija m'jasa ta m'jasoproduktiv. Praktikum: navch. Posibnik [Technology of meat and meat products. Workshop: Teaching Manual]. *National un-t food. Technol.* Kyiv: NUKHT, 2010, 367 .

#### Інформація про авторів (About authors)

**Тищенко Василь Іванович** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Сумський національний аграрний університет, доцент кафедри технології молока і м'яса, м. Суми, Україна, ORCID: 0000-0001-8149-4919; e-mail: tischenko\_1958@ukr.net.

**Vasyl Tischenko** – PhD, Associate Professor, Sumy National Agricultural University, docent of Department of technology of milk and meat, Sumy, Ukraine, e-mail: tischenko\_1958@ukr.net.

**Божко Наталія Володимирівна** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Сумський національний аграрний університет, доцент кафедри технології молока і м'яса, м. Суми, Україна, ORCID: 0000-0001-6440-0175; e-mail: natalybozhko@ukr.net.

**Nataliia Bozhko** – PhD, Associate Professor, Sumy National Agricultural University, docent of Department of technology of milk and meat, Sumy, Ukraine, e-mail: natalybozhko@ukr.net.

**Пасичний Василь Миколайович** – доктор технічних наук, професор, Національний Університет Харчових технологій, професор кафедри технології м'яса та м'ясних продуктів; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-3219-1564; 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; ORCID: 0000-0002-3219-1564; e-mail: pasww1@ukr.net.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Тищенко, В. І.** М'ясомісткі комбіновані продукти з м'ясом качки та сріблястого карася / **В. І. Тищенко, Н. В. Божко, В. М. Пасичний** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 160-168. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.21.

Please cite this article as:

**Tischenko, V. Bozhko, N., Pasichnyi, V.** Meat-containing combined products with muscovy duck and silver carp meat. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 160-168, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.21.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Тищенко, В. И. Божко, В. Н. Пасичный** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 160-168. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.21.

**АННОТАЦИЯ** Комбинированные продукты питания в последнее время стали одним из новых направлений исследований в области пищевых технологий. По функционально-технологическим и реологическим показателям, химическому составу и биологической ценности мясо утки и карася является перспективным сырьем для полноценной замены свинины и говядины в технологии рубленых полуфабрикатов, что подтверждает актуальность исследований разработки комбинированных изделий на основе указанного сырья. Целью исследований было теоретическое и экспериментальное обоснование целесообразности комбинирования мяса утки и рыбного сырья в составе мясосодержащих полуфабрикатов. Моделью для изучения целесообразности комбинирования мяса утки с рыбным фаршем была рецептура котлет «Домашние». В модельных образцах фарша мясосодержащих полуфабрикатов определены функционально-технологические свойства согласно стандартным методикам и в готовой продукции пищевую ценность. Полученные результаты свидетельствуют, что замена говядины и свинины в рецептуре котлет «Домашние» на мясо утки мускусной и фарш из мяса карася серебряного в определенных соотношениях позволяет производить рубленые полуфабрикаты с высокими качественными показателями. Анализ результатов показал, что комбинирование в рецептурах мяса мускусной утки и рыбного фарша улучшает показатели содержания влаги, влагоудерживающей способности, эмульгирующую способность и стабильность эмульсии. Замена говядины и свинины в рецептуре котлет «Домашние» на мясо утки мускусной и фарш из мяса карася серебряного позволяет повысить влагоудерживающую способность на 5,20-6,15%, эмульгирующую способность на 8,72-18,21%, стабильность эмульсии на 7,65%. При этом содержание белков увеличивается на 5,5-6,6%, содержание жиров в изделиях наоборот уменьшается на 43,1-56,6%. Органолептическая оценка качества разработанных полуфабрикатов подтвердила высокое качество сенсорных показателей и соответствие требованиям, которые регулируются стандартами для традиционных полуфабрикатов на основе спецификаций для данного сегмента продукции. Комплекс полученных результатов позволяет рассматривать данный вид продукции как высокобелковый и низкокалорийный, то есть позиционировать ее как продукт диетического питания.

**Ключевые слова:** фарш из мяса карася серебряного; мясо утки мускусной; мясосодержащий полуфабрикат; функционально-технологические показатели

Надійшла (received) 08.03.2019

УДК 628.316.12:66.081.3

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.22

## СОРБЦИЯ МЕДИ И НИКЕЛЯ ФОСФОРИЛИРОВАННЫМИ СОРБЕНТАМИ В СТАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

А. П. ХОХОТВА\*, К. С. МАСЛЯНКА

кафедра экологии и технологии растительных полимеров, инженерно-химический факультет, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского», Киев, УКРАИНА  
\*e-mail: khokhotva@bigmir.net

**АННОТАЦИЯ** Использование древесных отходов лесной промышленности в качестве источника сырья для производства дешевых углеродистых адсорбентов является перспективной стратегией, которая может помочь решить и проблему утилизации отходов. Известно, что наличие поверхностных функциональных групп усиливает способность углеродных сорбентов адсорбировать ионы металлов из водных растворов. Модификация углеродных сорбентов соединениями фосфора приводит к появлению кислотных свойств и повышению сорбционных свойств по отношению к тяжелым металлам. Из сосновых опилок путем термохимической обработки при 170 °С с предварительной пропиткой растворами активатора карбонизации ортофосфата аммония различных концентраций в присутствии карбамида и без него получен ряд фосфорилированных сорбентов и исследованы их сорбционные свойства по отношению к ионам никеля и меди. При исходных концентрациях  $Ni^{2+}$  100 мг/дм<sup>3</sup> и  $Cu^{2+}$  165 мг/дм<sup>3</sup>, наиболее низкие остаточные концентрации металлов – несколько мг/дм<sup>3</sup> – достигались при использовании сорбентов, полученных фосфорилированием в присутствии карбамида при относительно небольшой длительности термообработки. Сорбция сопровождалась снижением pH с 5,38 до 3,5-4,9 для  $Ni^{2+}$  и с 5,12 до 3,05-3,82 для  $Cu^{2+}$ . При извлечении  $Cu^{2+}$  модельные растворы подкислялись более заметно, чем при сорбции  $Ni^{2+}$ , что может в определенной степени свидетельствовать об изменении баланса механизмов фиксации металлов поверхностными группами сорбентов – катионный обмен и комплексообразование. По изменению концентрации металлов и pH была вычислена доля меди и никеля, извлекаемая из растворов по механизму ионного обмена. Она была наименьшей – 0,07% – при сорбции  $Ni^{2+}$  и наибольшей – 25% – при сорбции  $Cu^{2+}$ , возрастала при увеличении содержания  $(NH_4)_3PO_4$  в пропиточном растворе и при увеличении длительности карбонизации. Очевидно, следствием длительной термообработки является более глубокое окисление лигноцеллюлозного материала и разрушение части активных сорбционных центров, которые фиксируют ионы тяжелых металлов по механизму хелатообразования. В совокупности оба процесса приводили к росту поверхностной концентрации карбоксильных катионообменных групп.

**Ключевые слова:** сосновые опилки; фосфорилирование; фосфат аммония; карбамид; медь; никель; адсорбция

## SORPTION OF COPPER AND NICKEL BY PHOSPHORYLATED SORBENTS IN STATIC CONDITIONS

О. КХОКХОТВА, К. МАСЛЯНКА

Department of Ecology and Plant Polymers Technology, Faculty of Chemical Engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Pollution by heavy metal ions are one of the main anthropogenic threat to the nature as they do not decay, are stable in the environment and can accumulate along food chains. Not-sufficiently treated industrial waste waters are the primary source of such pollution. Application of wood waste from forestry industry as a source of raw material for production of cheap carbonaceous adsorbents is a promising strategy, which can help to solve also the waste utilization problem. It is known that the presence of surface functional groups enforces the capability of carbon sorbents to adsorb metal ions from aqueous solutions. The modification of carbon sorbents with phosphorus compounds leads to the creation of acidic properties and increase of sorption properties to heavy metals. Heteroatoms of phosphorus can be introduced into the carbon structure by modification of hydrocarbon raw material both before carbonization and into ready carbon adsorbent. A series of phosphorylated sorbents was obtained from pine sawdust by thermochemical treatment at 170 °C with preliminary impregnation by ammonium orthophosphate (carbonization activator) solutions of various concentrations in the presence of urea and without it. Their sorption properties with respect to nickel and copper ions were studied. The lowest residual concentrations of metals at the level of few mg/l were achieved using sorbents obtained by phosphorylation in the presence of urea with a relatively short duration of heat treatment. Sorption was accompanied by a decrease in pH. With  $Cu^{2+}$ , model solutions were more acidified than in case of  $Ni^{2+}$  sorption, which may to some extent indicate a change in the balance of metal fixation mechanisms by surface groups of sorbents – cation exchange and complexation. The change of protons and metal ions concentration was used to calculate the proportion of copper and nickel, extracted from solutions by the cation exchange mechanism. It was the smallest - 0.07% - for  $Ni^{2+}$  and reached 25% during the sorption of  $Cu^{2+}$  and increased more in the case of sorbents with a long carbonation time. Obviously, the result of long-term heat treatment is a deeper oxidation of lignocellulosic material and the destruction of part of the active sorption centers, which fix heavy metal ions by the chelation mechanism. Together, both processes led to an increase in the surface concentration of carboxyl cation-exchange groups.

**Keywords:** pine sawdust; phosphorylation; ammonium phosphate; urea; copper; nickel; adsorption.

### Введение

Загрязнение природных вод тяжелыми металлами является сегодня одной из основных

экологических проблем. Они не разлагаются в окружающей среде, способны к миграции и накоплению в трофических цепях. Удаление ионов

тяжелых металлов из сточных вод важно для защиты здоровья населения. Основным источником поступления тяжелых металлов в окружающую среду являются недостаточно очищенные промышленные сточные воды многих отраслей: гальванических производств, горно-обогатительных комбинатов, производства удобрений, пестицидов, обработки стали, кожи [1]. Таким образом, удаление тяжелых металлов из сточных вод и их рекуперация имеет важное значение для защиты окружающей среды.

Адсорбция является одним из методов, наиболее широко используемым для удаления загрязнителей из промышленных сточных вод, а активированный уголь – наиболее применяемым адсорбентом для очистки воды с низким содержанием загрязняющего компонента.

Применение дешевых адсорбентов, экономически целесообразных для очистки загрязненных вод, удаления ионов тяжелых металлов, играет важную роль при проведении сорбционных процессов. Использование отходов переработки древесины в качестве исходного сырья для создания дешевых углеродных адсорбентов является перспективной стратегией, которая позволяет решать проблемы утилизации отходов. Высокая себестоимость активированного угля побуждает к поиску и использованию новых разновидностей дешевого сырья для получения углеродных сорбентов. Для решения существующей проблемы современные исследования фокусируются на создании и использовании новых, более дешевых сорбционных материалов. Актуальным является поиск относительно дешевого, экономически оправданного сырья, что позволяет получать уголь с характеристиками, превосходящими характеристики традиционных адсорбентов [1].

Использование адсорбентов на основе полисахаридов и их производных является большим преимуществом благодаря их возобновляемости, биоразлагаемости и нетоксичности [3-5]. Среди полисахаридов целлюлоза является наиболее распространенным природным полимером и, следовательно, одним из наиболее потенциальных ресурсов для замены адсорбентов на основе синтетических полимеров. В этом отношении целлюлоза и ее производные является сырьем для получения материалов, которые могут быть использованы в качестве дешевых адсорбентов [6-10].

Известно, что наличие поверхностных функциональных групп усиливает способность углеродных адсорбентов поглощать катионы металлов из водных сред [11]. Модифицирование углеродных адсорбентов соединениями фосфора приводит к появлению кислотных свойств и увеличению адсорбционной способности по отношению к катионам металлов [12]. Гетероатомы фосфора могут быть введены в структуру угля как модифицированием углеводородного сырья перед

карбонизацией [13], так и в уже готовый углеродный адсорбент [14].

### Цель работы

Фосфорилирование лигноцеллюлозного материала может быть проведено растворами фосфорной кислоты или ее солей различных концентраций, что влияет как на эффективность извлечения ионов тяжелых металлов, так и на внешний вид. Целью работы является получение сорбционного материала на основе древесных опилок с улучшенными сорбционными свойствами путем ее термической обработки с предварительной пропиткой растворами ортофосфата аммония различных концентраций изучение процесса извлечения из модельных растворов ионов  $\text{Ni}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{2+}$ .

### Методики проведения эксперимента

В исследованиях использовали опилки сосны *Pinus sylvestris*. Для улучшения сорбционных свойств древесных опилок была проведена их модификация растворами  $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$  с концентрацией 1,5-15% и смесями  $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$  (1,5-15%) +  $\text{CO}_2(\text{NH}_2)_2$  (5%). Навески опилок помещали в растворы модификаторов (соотношение опилки: раствор = 1:5, при этом соотношение  $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ : m опилок было в диапазоне 0,075 - 0,75) на 6 ч, после чего высушивали при 80 °С, выдерживали в сушильном шкафу при 170 °С в течение 1 или 5 часов, после охлаждения отмывали горячей водой до нейтрального pH и отсутствия фосфатов (по реакции с молибденовой жидкостью), высушивали при 80 °С. Готовые сорбенты держали в эксикаторе.

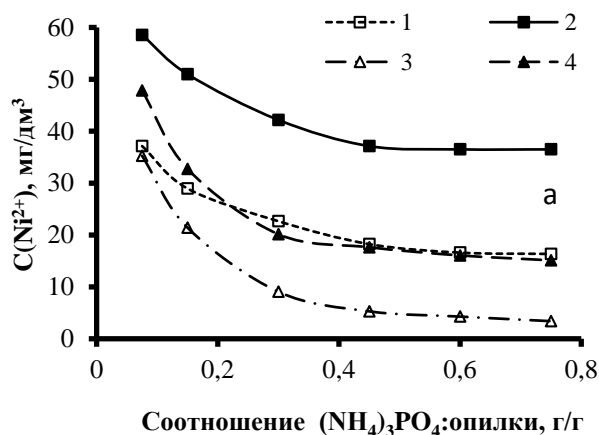
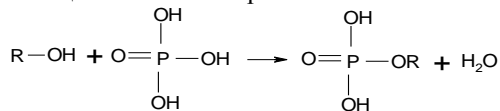
Сорбцию ионов меди и никеля проводили в статических условиях из модельных растворов сульфатных солей объемом 100 см<sup>3</sup> навесками сорбентов 1 г при перемешивании магнитной мешалкой в течение 2 часов.

После фильтрования остаточные концентрации  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Ni}^{2+}$  определяли фотоколориметрическим методом соответственно с диэтилдитиокарбаматом Na и диметилглиоксимом, измеряли pH растворов. На основе полученных данных рассчитывали величину удельного сорбции (мг/г) и извлечение ионов металлов по ионообменному механизму (%).

### Обсуждение результатов

При окислении целлюлозы значительно повышается концентрация карбоксильных групп, участвующих в ионообменном процессе. Однако такие сорбенты имеют невысокую сорбционную емкость и эффективно проявляют себя только в разбавленных растворах. Фосфорилирование целлюлозы приводит к образованию в ее структуре одно-, двух- и трёхзамещённых фосфатных групп, которые формируют основной обменно-сорбционный потенциал получаемых материалов. При разложении

фосфата аммония при температурах выше 155 °C образуется фосфорная кислота, которая имеет сильные водоотнимающие свойства, поэтому при большой продолжительности карбонизации сорбенты имели почти черный цвет. Фосфорная кислота также вступает в реакции этерификации с гидроксидными группами целлюлозной сырья.



Фосфатные аммонийные соли, при сопоставимой рыночной стоимости, как активатор карбонизации являются более безопасной альтернативой, чем фосфорная кислота, которая традиционно используется для пропитки природной целлюлозной сырья для получения фосфорсодержащего активированного угля.

Кривые зависимости сорбции Ni<sup>2+</sup> и Cu<sup>2+</sup> от соотношения (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>:опилки при фосфорилировании с различной продолжительностью карбонизации показаны на рис. 1.

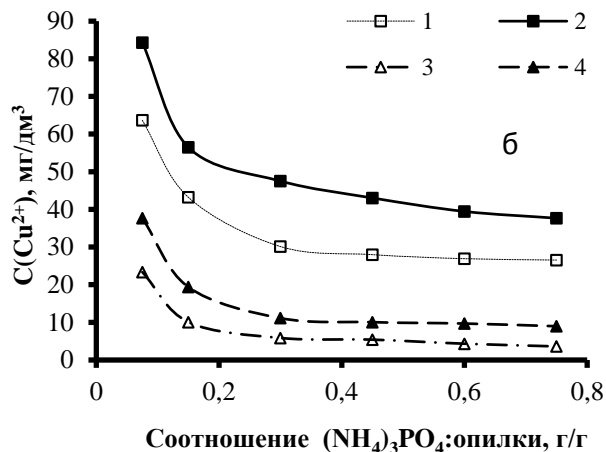


Рис. 1 – Зависимость остаточной концентрации Ni<sup>2+</sup> (а) и Cu<sup>2+</sup> (б) от соотношения (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>: опилки при фосфорилировании и от продолжительности карбонизации (C<sub>нач. (Ni<sup>2+</sup>)</sub> = 100 мг/дм<sup>3</sup>, C<sub>нач. (Cu<sup>2+</sup>)</sub> = 165 мг/дм<sup>3</sup>): 1, 2 - сорбенты получены в отсутствие карбамида; 3, 4 - сорбенты получены с добавлением 5% карбамида; 1, 3 - карбонизация 1 ч; 2, 4 - карбонизация 5 ч

Извлечение металлов было лучше при меньшей продолжительности термической обработки. Более низкие концентрации металлов достигались в случае сорбентов, полученных карбонизацией в присутствии карбамида.

В процессе сорбции тяжелых металлов pH снижалась с 5,38 до 3,5-4,9 для Ni<sup>2+</sup> и с 5,12 до 3,05-3,82 для Cu<sup>2+</sup> (рис. 2).

В случае сорбентов, полученных при карбонизации в течение 1 ч, снижение pH было меньше. Глубина снижения увеличивалась при росте доли фосфата аммония при карбонизации, а также при увеличении продолжительности карбонизации. В растворах с сорбентами, полученными в присутствии карбамида, снижение pH было меньшим, чем в его отсутствие.

Сравнивая снижение концентраций ионов Cu<sup>2+</sup> и Ni<sup>2+</sup> и изменение pH в процессе сорбции, следует отметить, что наибольшая разница наблюдается в случае сорбентов, полученных при низком содержании активатора карбонизации – 0,075 и 0,15. С ростом соотношения активатор:опилки разница концентрации составляла 2-5 мг/дм<sup>3</sup>. При извлечении Cu<sup>2+</sup> модельные растворы подкислялись более заметно, чем при сорбции Ni<sup>2+</sup>, что может в

определенной степени свидетельствовать об изменении баланса механизмов фиксации металлов поверхностными группами сорбентов – катионный обмен и комплексообразование.

Сравнивая рост концентрации протонов и снижение концентрации металлов при сорбции можно заметить (табл. 1 и 2), что доля металлов, которая извлекается из растворов на катионообменных центрах, относительно невелика: наиболее низкой она была при сорбции Ni<sup>2+</sup> - не более 14%, и достигала 25% при сорбции Cu<sup>2+</sup>; она более возрастала в случае сорбентов с длительным временем карбонизации.

Очевидно, следствием длительной термообработки является более глубокое окисление лигноцеллюлозного материала и разрушение части активных сорбционных центров, которые фиксируют ионы тяжелых металлов по механизму хелатообразования. В совокупности оба процесса приводили к росту поверхностной концентрации карбоксильных катионообменных групп. Роль карбамида в реакциях фосфорной кислоты с лигноцеллюлозным материалом заключается в углублении фосфорилирования.

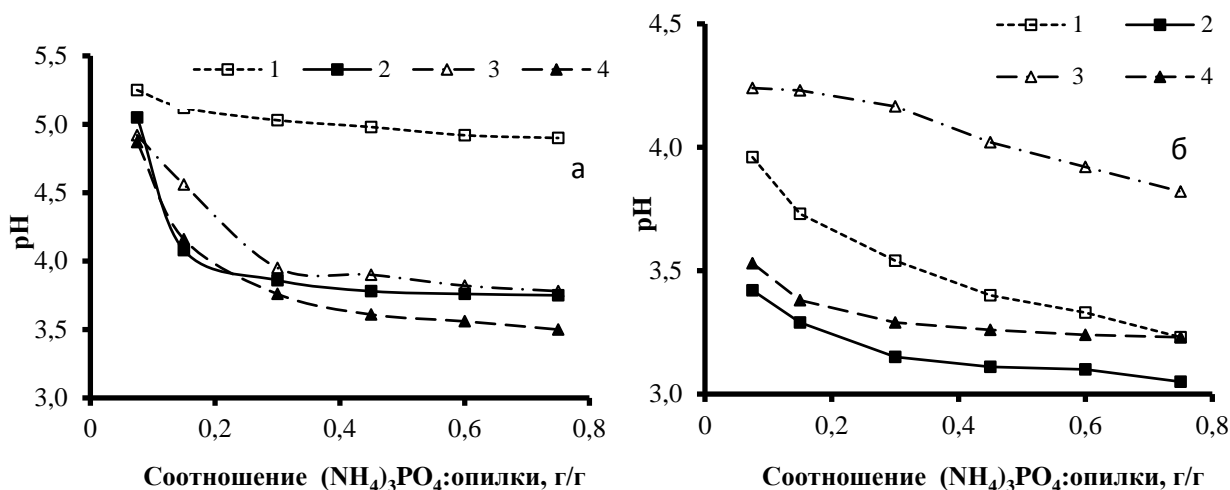


Рис.2 – Снижение рН при сорбции Ni<sup>2+</sup> (а) и Cu<sup>2+</sup> (б) от соотношения (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>:опилки при фосфорилировании и от продолжительности карбонизации: 1, 2 - сорбенты получены в отсутствии карбамида; 3, 4 - сорбенты получены с добавлением 5% карбамида; 1, 3 - карбонизация 1 ч; 2, 4 - карбонизация 5 ч

Таблица 1 – Изменение доли Cu<sup>2+</sup>, извлеченной из растворов за счет ионного обмена сорбентами с различной продолжительностью карбонизации

Соотнош. (NH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> : опилки	1 час			5 час		
	ΔC(H <sup>+</sup> ), ммоль-экв/дм <sup>3</sup>	ΔC(Ni <sup>2+</sup> ) ммоль-экв/дм <sup>3</sup>	доля ион. обмена, %	ΔC(H <sup>+</sup> ), ммоль-экв/дм <sup>3</sup>	ΔC(Ni <sup>2+</sup> ) ммоль-экв/дм <sup>3</sup>	доля ион. обмена, %
0.075	0.105	2.65	3.96	0.375	2.00	17.69
0.15	0.181	3.29	5.52	0.508	2.87	18.73
0.3	0.284	3.70	7.67	0.703	3.15	22.30
0.45	0.3.3	3.76	10.45	0.771	3.29	23.43
0.6	0.463	3.80	12.19	0.790	3.40	23.19
0.75	0.584	3.81	15.34	0.886	3.46	25.61
Карбонизация в присутствии 5% карбамида						
0.075	5.00·10 <sup>-2</sup>	3.91	1.28	0.288	3.46	8.31
0.15	5.13·10 <sup>-2</sup>	4.32	1.19	0.409	4.03	10.15
0.3	6.08·10 <sup>-2</sup>	4.46	1.36	0.505	4.29	11.78
0.45	8.79·10 <sup>-2</sup>	4.47	1.97	0.542	4.32	12.53
0.6	0.113	4.50	2.50	0.568	4.33	13.10
0.75	0.144	4.53	3.18	0.581	4.36	13.34

Таблица 2 – Изменение доли Ni<sup>2+</sup>, извлеченной из растворов за счет ионного обмена сорбентами с различной продолжительностью карбонизации

Соотнош. (NH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> : опилки	1 час			5 час		
	ΔC(H <sup>+</sup> ), ммоль-экв/дм <sup>3</sup>	ΔC(Ni <sup>2+</sup> ) ммоль-экв/дм <sup>3</sup>	доля ион. обмена, %	ΔC(H <sup>+</sup> ), ммоль-экв/дм <sup>3</sup>	ΔC(Ni <sup>2+</sup> ) ммоль-экв/дм <sup>3</sup>	доля ион. обмена, %
0.075	1.45·10 <sup>-3</sup>	2.08	0.07	4.74·10 <sup>-3</sup>	1.35	0.35
0.15	3.42·10 <sup>-3</sup>	2.36	0.14	7.90·10 <sup>-2</sup>	1.61	4.90
0.3	5.16·10 <sup>-3</sup>	2.58	0.20	0.134	1.91	7.00
0.45	6.30·10 <sup>-3</sup>	2.73	0.23	0.162	2.08	7.76
0.6	7.85·10 <sup>-3</sup>	2.78	0.28	0.170	2.11	8.06
0.75	8.42·10 <sup>-3</sup>	2.79	0.30	0.174	2.11	8.25
Карбонизация в присутствии 5% карбамида						
0.075	7.85·10 <sup>-3</sup>	2.15	0.37	9.32·10 <sup>-3</sup>	1.72	0.54
0.15	2.34·10 <sup>-2</sup>	2.62	0.89	6.50·10 <sup>-2</sup>	2.23	2.91
0.3	0.108	3.04	3.55	0.170	2.66	6.37
0.45	0.122	3.17	3.84	0.241	2.75	8.77
0.6	0.147	3.21	4.59	0.271	2.80	9.68
0.75	0.162	3.24	5.00	0.312	2.84	11.00



## Выводы

Исследовано влияние соотношения активатора карбонизации лигноцеллюлозного сырья  $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ :опилки, а также добавки 5% карбамида в пропиточный раствор фосфата на степень извлечения ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Ni}^{2+}$  из модельных растворов. Удельная емкость полученных сорбентов возрастала при росте доли активатора до 9%, после чего менялась мало. Рост продолжительности карбонизации с 1 до 5 часов отрицательно влиял на сорбционные свойства полученных материалов.

С повышением доли  $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ :опилки при получении фосфорилированных сорбентов в процессе сорбции металлов pH растворов падало. Снижение pH было меньшим при добавлении карбамида в пропиточный раствор и углублялось при увеличении продолжительности карбонизации. Преобладающим механизмом в извлечении ионов никеля и меди фосфорилированными углеродными сорбентами является хелатообразование.

## Список литературы

1. Wang, J. L. Biosorbents for heavy metals removal and their future a review / J. L. Wang, C. Chen // *Biotechnology Advances*. – 2009. – 27 – P. 195-226. – doi:10.1016/j.biotechadv.2008.11.002.
2. Ioannidou, O. Agricultural residues as precursors for activated carbon production: A review / O. Ioannidou, A. Zabaniotou // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2007. – 11. – P. 1966-2005. – doi: 10.1016/j.rser.2006.03.013.
3. Crini, G. Recent Developments in Polysaccharide-Based Materials Used as Adsorbents in Wastewater Treatment / G. Crini // *Progress in Polymer Science*. – 2005. – 30, 38-70. – doi:10.1016/j.rser.2006.03.013.
4. Pohontu, C. Acrylates and methylcellulose based hydrogels. Synthesis, swelling properties and applications to inclusion and controlled release of bioactive matters / C. Pohontu, M. Popa, J. Desbrieres, L. Verestiuc // *Cellulose Chemistry and Technology*. – 2016. – 50. – P. 609-620.
5. Хохотва, А. П. Адсорбция тяжелых металлов сорбентом на основе сосновой коры / А. П. Хохотва // *Химия и технология воды*. – 2010. – 6. – С. 604-612.
6. Božić, D. Adsorption of heavy metal ions by beech sawdust – Kinetics, mechanism and equilibrium of the process / D. Božić, M. Gorgievski, V. Stanković, N. Štrbac, S. Šerbula, N. Petrović // *Ecological Engineering*. – 2013. – 58. – P. 202-206. – doi:10.1016/j.ecoleng.2013.06.033.
7. Goel, N. K. Cellulose based cationic adsorbent fabricated via radiation grafting process for treatment of dyes waste water / N. K. Goel, V. Kumar, N. Misra, L. Varshney // *Carbohydrate Polymers*. – 2015. – 132. – P. 444-451. – doi:10.1016/j.carbpol.2015.06.054.
8. Udoetok, I. A. Adsorption properties of cross-linked cellulose-epichlorohydrin polymers in aqueous solution / I. A. Udoetok, R. M. Dimmick, L. D. Wilson, J. V. Headley // *Carbohydrate Polymers*. – 2016. – 136. – P. 329-340. – doi: 10.1016/j.carbpol.2015.09.032.
9. Hokkanen, S. A review on modification methods to cellulose-based adsorbents to improve adsorption capacity /

- S. Hokkanen, A. Bhatnagar, M. Sillanpaa // *Water research*. – 2016. – 91. – P. 156-173.
10. Sadeek, S. A. Metal adsorption by agricultural biosorbents: Adsorption isotherm, kinetic and biosorbents chemical structures / S. A. Sadeek, N. A. Negm, H. H. H. Hefni, M. M. A. Wahab // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2015. – 81. – P. 400-409. – doi: 10.1016/j.ijbiomac.2015.08.031.
11. Ставицкая, С. С. Селективная сорбция и катализ на активных углях и неорганических ионитах / С. С. Ставицкая, И. Л. Тарковская, Б. В. Стрелко // *Под ред. В.В. Стрелко*. – К.: Наук, думка, 2008. – С. 88 – 107.
12. Пузий, А. М. Способы получения, структура и физико-химические свойства фосфорилированных углеродных адсорбентов / А. М. Пузий // *Теоретическая и экспериментальная химия*. – 2011. – № 5. – С. 265-278.
13. Ставицкая, С. С. Адсорбция ионов меди углеродными адсорбентами, модифицированными фосфорной кислотой при различных температурах / С. С. Ставицкая, В. М. Викарчук, М. Ф. Ковтун, О. И. Поддубная, А. М. Пузий // *Химия и технология воды*. – 2014. – т. 36, № 3. – С. 203-210.
14. Пузий, А. М. Структурно-сорбционные свойства активных углей из кокосового ореха, модифицированных гетероатомами фосфора / А. М. Пузий, С. С. Ставицкая, О. И. Поддубная // *Теоретическая и экспериментальная химия*. – 2012. – № 4. – С. 252-256.

## References (transliterated)

1. Wang, J. L., Chen C. Biosorbents for heavy metals removal and their future a review. *Biotechnology Advances*, 2009, **27**, 195-226, doi:10.1016/j.biotechadv.2008.11.002.
2. Ioannidou, O., Zabaniotou, A. Agricultural residues as precursors for activated carbon production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, **11**, 1966-2005, doi:10.1016/j.rser.2006.03.013.
3. Crini, G. Recent Developments in Polysaccharide-Based Materials Used as Adsorbents in Wastewater Treatment. *Progress in Polymer Science*, 2005, **30**, 38-70, doi: 10.1016/j.rser.2006.03.013.
4. Pohontu, C., Popa, M., Desbrieres, J., Verestiuc, L. Acrylates and methylcellulose based hydrogels. Synthesis, swelling properties and applications to inclusion and controlled release of bioactive matters. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2016, **50**, 609-620.
5. Khokhotva, A. Adsorption of heavy metals by a sorbent based on pine bark. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2010, **32** (6), 336-340.
6. Božić, D., Gorgievski, M., Stanković, V., Štrbac, N., Šerbula, S., Petrović, N. Adsorption of heavy metal ions by beech sawdust. Kinetics, mechanism and equilibrium of the process. *Ecological Engineering*, 2013, **58**, 202-206, doi:10.1016/j.ecoleng.2013.06.033.
7. Goel, N., Kumar, V., Misra, N., Varshney, L. Cellulose based cationic adsorbent fabricated via radiation grafting process for treatment of dyes waste water. *Carbohydrate Polymers*, 2015, **132**, 444-451, doi: 10.1016/j.carbpol.2015.06.054.
8. Udoetok, I., Dimmick, R., Wilson, L., Headley, J. Adsorption properties of cross-linked cellulose-epichlorohydrin polymers in aqueous solution. *Carbohydrate Polymers*, 2016, **136**, 329-340, doi: 10.1016/j.carbpol.2015.09.032.

9. **Hokkanen, S., Bhatnagar, A., Sillanpaa, M.** A review on modification methods to cellulose-based adsorbents to improve adsorption capacity. *Water research*, 2016, **91**, 156-173.
10. **Sadeek, S. A.; Negm, N. A.; Hefni, H. H. H.; Wahab, M. M. A.** Metal adsorption by agricultural biosorbents: Adsorption isotherm, kinetic and biosorbents chemical structures. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2015, **81**, 400-409, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2015.08.031.
11. **Stavitskaya, S. S., Tarkovskaya, I. L., Strelko, B. V.** Selective sorption and catalysis on active carbons and inorganic ion exchangers. Kyiv. Naukova dumka, 2008, 88-107.
12. **Puziy, A. M.** Sposoby poluchenija, struktura i fiziko-himicheskie svoystva fosforilirovannyh uglerodnyh adsorbentov. *Teoreticheskaja i jeksperimental'naja himija*, 2011, **47** (5), 265-278.
13. **Stavickaja, S. S., Vikarchuk, V. M., Kovtun, M. F., Poddubnaja, O. I., Puzij, A. M.** Adsorbicija ionov medi uglerodnymi adsorbentami, modifitsirovannymi fosfornoj kislotoj pri razlichnyh temperaturah. *Himija i tehnologija vody*, 2014, **36** (3), 203-210.
14. **Puziy, A. M., Stavitskaya, C. C., Poddubnaya, O. I.** Strukturno-sorbtsionnyye svoystva aktivnykh ugley iz kokosovogo orekha, modifitsirovannykh geteroatomov fosfora. *Theoretical and experimental. chemistry*, 2012, **48** (4), 252-256.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Хохотва Александр Петрович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского», доцент кафедры экологии и технологии растительных полимеров, г. Киев, Украина; ORCID: 0000-0002-2607-9242; e-mail: khokhotva@bigmir.net.

**Oleksandr Khokhotva** – Ph. D., Docent, Associate Professor, Department of Ecology and Plant Polymers Technology, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2607-9242; e-mail: khokhotva@bigmir.net.

**Маслянка Карина Сергеевна** – студентка кафедры экологии и технологии растительных полимеров, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского», г. Киев, Украина; e-mail: maslianka1@gmail.com.

**Karina Maslyanka** – student of Department of Ecology and Plant Polymers Technology, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: maslianka1@gmail.com.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Хохотва, А. П.** Сорбция меди и никеля фосфорилированными сорбентами в статических условиях / **А. П. Хохотва, К. С. Маслянка** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 169-174. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.22.

*Please cite this article as:*

**Khokhotva, O., Maslyanka, K.** Sorption of copper and nickel by phosphorylated sorbents in static conditions. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 169-174, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.22.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Хохотва О. П.** Сорбція міді й нікелю фосфорильованими сорбентами в статичних умовах / **О. П. Хохотва, К. С. Маслянка** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 169-174. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.22.

**АНОТАЦІЯ** Використання деревних відходів лісової промисловості як джерела сировини для виробництва дешевих вуглецевих адсорбентів є перспективною стратегією, яка може допомогти вирішити і проблему утилізації відходів. Відомо, що наявність поверхневих функціональних груп посилює здатність вуглецевих сорбентів адсорбувати іони металів з водних розчинів. Модифікація вуглецевих сорбентів сполуками фосфору призводить до появи у них кислотних властивостей і підвищення сорбційних властивостей по відношенню до важких металів. З основою тирси термохімічною обробкою за 170 °С з попереднім просоченням розчинами активатора карбонізації ортофосфату амонію різних концентрацій в присутності карбаміду і без нього отримано ряд фосфорильованих сорбентів і досліджено їх сорбційні властивості по відношенню до іонів нікелю та міді. За вихідних концентрацій  $Ni^{2+}$  100 мг/дм<sup>3</sup> і  $Cu^{2+}$  165 мг/дм<sup>3</sup>, найнижчі залишкові концентрації металів – кілька мг/дм<sup>3</sup> – досягалися при використанні сорбентів, отриманих фосфорильованням у присутності карбаміду за відносно невеликої тривалості термообробки. Сорбція супроводжувалася зниженням рН з 5,38 до 3,5-4,9 для  $Ni^{2+}$  і з 5,12 до 3,05-3,82 для  $Cu^{2+}$ . Під час вилучення  $Cu^{2+}$  модельні розчини подкислювалися помітніше, ніж при сорбції  $Ni^{2+}$ , що може певною мірою свідчити про зміну балансу механізмів фіксації металів поверхневими групами сорбентів – катіонний обмін і комплексоутворення. За зміною концентрації металів і рН була обчислена частка міді і нікелю, яка вилучалася із розчинів за механізмом іонного обміну. Вона була найменшою – 0,07% – при сорбції  $Ni^{2+}$  і найбільшою – 25% – при сорбції  $Cu^{2+}$ , зростала при збільшенні вмісту  $(NH_4)_3PO_4$  в просочувальному розчині і при збільшенні тривалості карбонізації. Очевидно, наслідком тривалої термообробки є більш глибоке окислення лігноцелюлозного матеріалу і руйнування частини активних сорбційних центрів, які фіксують іони важких металів за механізмом хелатоутворення. В сукупності обидва процеси приводили до зростання поверхневої концентрації карбоксильних катіонообмінних груп.

**Ключові слова:** деревна тирса; фосфорильовання; фосфат амонію; карбамід; мідь; нікель; адсорбція

Поступила (received) 15.02.2019

UDK 664.144

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.23

## INFLUENCE OF THE "MAGNETOFOOD" FOOD SUPPLEMENT ON THE STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MOLDED FRUIT JELLY WITH VARIOUS STRUCTURE-FORMING AGENTS

I. V. TSYKHANOVSKA<sup>1\*</sup>, V. V. YEVLASH<sup>2</sup>, B. M. KHAMITOVA<sup>3</sup>, K. A. URAZBAIEVA<sup>3</sup>,  
O. V. ALEKSANDROV<sup>1</sup>, N. S. KAIDA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Food and Chemical Technologies Department, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Chemistry, Microbiology and Food Hygiene Department, Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Kharkiv, UKRAINE

<sup>3</sup> Food Engineering Department, M. Auezov South Kazakhstan State University, Shymkent, KAZAKHSTAN

\*e-mail: cikhanovskaja@gmail.com

**ABSTRACT** Development of resource- and energy-saving technologies for the production of high-quality jelly and pastille products with an extended shelf life is one of the most urgent challenges of the modern confectionery industry. It is proposed to use the "Magnetofood" mineral food supplement, which holds a high functional and technological potential and may independently form the structural and mechanical properties of jelly pastes, and also affect the gelling agents, entering into chemical and electrostatic interactions therewith. Therefore, the "Magnetofood" food supplement may influence several technological properties in the food jelly system at once: acting as a stabilizer, a thickener, a gelling agent, while improving the quality, consumer properties and extending the shelf life of molded fruit jelly products. The aim of the study is to improve the structural and mechanical properties of molded fruit jelly products by introducing the "Magnetofood" food supplement. Standard and generally accepted methods were used in the course of structural and mechanical studies (viscosity and thixotropic characteristics on the Reotest-2 rotation viscometer, strength characteristics on the AR-4/1 penetrometers). It has been established that the introduction of the "Magnetofood" food supplement into jelly pastes in the amount of 0.15% of the total weight of raw material improves the consistency, structure, strength and form: the degree of structuring and viscosity of the jelly pastes increases over the entire shear stress range ( $1.5-40 \text{ s}^{-1}$ ) 2.9 times for pastes on agar and 1.85 times for pastes on pectin; the temperature effect on the effective viscosity of jelly pastes is slowed down by (50–75) Pa · s on average, destruction processes are also slowed down 1.1 times, and the recovery processes of the jelly structure after the mechanical effect ceases are accelerated by 3.8%, increasing its thixotropic ability by 7.5% in jelly pastes on agar and by 6.0% in jelly pastes on pectin; jelly strength on agar increases by (10–12)%, and by (7–9)% on pectin; the speed of structurization of jelly pastes on agar increases by a factor of 1.3–1.7, and by a factor of 1.1–1.6 on pectin.

**Keywords:** fruit jelly; jelly pastes; "Magnetofood" food supplement; structural and mechanical properties

## ВПЛИВ ХАРЧОВОЇ ДОБАВКИ "МАГНЕТОФУД" НА СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ФОРМОВОГО ЖЕЛЕЙНОГО МАРМЕЛАДУ З РІЗНИМИ СТРУКТУРОУТВОРЮВАЧАМИ

I. V. ЦИХАНОВСЬКА<sup>1\*</sup>, В. В. ЄВЛАШ<sup>2</sup>, Б. М. ХАМІТОВА<sup>3</sup>, К. А. УРАЗБАЄВА<sup>3</sup>,  
О. В. АЛЕКСАНДРОВ<sup>1</sup>, Н. С. КАЙДА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> кафедра Харчових та хімічних технологій, Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра Хімії, мікробіології та гігієни харчування, Харківський державний університет харчування та торгівлі, м. Харків, УКРАЇНА

<sup>3</sup> кафедра Харчова інженерія, Південно-Казахстанський державний університет ім. М. Ауезова, м. Шимкент, КАЗАХСТАН

**АНОТАЦІЯ** Однією з актуальних проблем сучасної кондитерської промисловості є розробка ресурсо- і енергозберігаючих технологій виробництва високоякісних мармеладо-пастильних виробів зі збільшеним терміном придатності. Пропонується використання мінеральної харчової добавки "Магнетофуд", яка володіє високим функціонально-технологічним потенціалом і може як самостійно формувати структурно-механічні властивості желейних мас, так і впливати на желеутворювач, вступаючи з ним в хімічні і електростатичні взаємодії. Тому, харчова добавка "Магнетофуд" може впливати відразу на кілька технологічних властивостей в харчовій желейній системі: бути стабілізатором, загусником, драглеутворювачем, при цьому покращуючи якість, споживчі властивості і продовжуючи терміни зберігання формового желейного мармеладу. Метою дослідження є покращення структурно-механічних властивостей формового желейного мармеладу шляхом введення харчової добавки "Магнетофуд". Під час проведення структурно-механічних (в'язкостних і тиксотропних характеристик на ротаційному віскозиметрі Реотест-2, міцності на пенетрометрі АР-4/1) досліджень були використані загальноприйняті та стандартні методики. Встановлено, що введення харчової добавки "Магнетофуд" в желейні маси в кількості 0,15 % до маси сировини покращує консистенцію, структуру, міцність і форму: підвищується ступінь структурування і в'язкість желейних мас у всьому діапазоні напруги зсуву ( $1,5-40 \text{ c}^{-1}$ ) в 2,9 рази – для мас на агарі і в 1,85 раз – для мас на пектині; сповільнюється вплив температури на ефективну в'язкість желейних мас в середньому на (50–75) Па·с, а також процеси руйнування в 1,1 рази і прискорюються процеси відновлення желейної структури після

припинення механічного впливу на 3,8 %, підвищуючи її здатність до тиксотропії на 7,5 % в желейних масах на агарі і на 6,0 % – на пектині; збільшується міцність студню на агарі на (10–12) %, на пектині – на (7–9) %; зростає швидкість структуривання желейних мас на агарі в 1,3–1,7 разів, а на пектині в 1,1–1,6 разів.

**Ключові слова:** желейний мармелад; желейні маси; харчова добавка "Магнетофуд"; структурно-механічні властивості

## Introduction

Fruit jelly belongs to the sugar confectionery group of products, with a distinguished gelatinous consistency. In the modern food market, fruit jelly products occupy the third place of honor among confectionery products in terms of popularity, second only to the recognized confectionery industry leaders - chocolate products and caramel and candy products. Currently, mold and carved fruit jelly has become most widespread in Ukraine and other countries.

Fruit jelly products stand out among the multitude of confectionery products with their elastic, gelatinous consistency due to the use of gelling agents, consistency regulators, and their combinations (gelatin, agar, pectin, carrageenan, alginates, galactomannans, etc.). In our country, such gelling agents as agar and pectin are widely used in the fruit jelly production technology. It is worth noting that the use of expensive imported gelling agents, such as pectin, agar, xanthan, gum arabic and carrageenan increases the costs of production of finished products.

Fruit jelly products are obtained by boiling down the solution with gelling agents, granulated sugar and molasses, followed by the introduction of various additives (food acids, dyes, flavors, modifying salts) into the cooled mass [1–4]. Today, in the face of fierce competition, the manufacturers are in constant search for new forms, tastes and even new types of fruit jelly products, developing and improving their recipes and technologies; using natural (fruit juices, puree) and synthetic (food additives, enhancers) ingredients, imparting useful properties and strong consumer attributes to the finished products [4–6].

Thus, introduction of innovative technologies to expand the range, consistent with market demand and the use of new raw materials, making it possible to alter or regulate the structure of semi-finished and finished products, while improving their quality indicators, is among the priority areas for improving the range and methods of producing fruit jelly products [6–8].

There has been a significant body of research on the search for new low cost gelling components that do not cause deterioration of the normative structural and mechanical, physical and chemical, and organoleptic indicators of jelly masses and finished products, as well as for partial or complete replacement of traditional gelling agents, agar and pectin in particular – imported products with high cost of production [7–12].

When selecting a gelling agent, one should take into account the specifics of the fruit jelly product manufacture based on the gelatinization process, ensuring the stability and effectiveness of which being the main technological task [10,11]. Obtaining the desired texture of fruit jelly products, which is a combination of texture and structure - is always influenced by many factors

introduced by the recipe components. Therefore, when selecting a gelling agent that contribute to the creation of specified texture characteristics most effectively, it is necessary to take their functional and technological properties into account.

This study explores the possibility of using the "Magnetofood" food supplement [Patent UA No. 126502, MPK A 23L 13/40, A23L 33/10. "Magnetofood" food supplement] as a structure-forming additive and stabilizer of jelly pastes. "Magnetofood" food additive is finely divided powder with a particle size of ~ 80 nm and low cost of 250 UAH / kg [13].

Nano-objects, which include "Magnetofood", have great potential and are able to form new functional and technological properties of various food systems [14–17]. Interaction of "Magnetofood" with food substances (proteins, proteids, carbohydrates, water) is a complex of composite chemical and electrostatic interactions. Supramolecular organization of nanoparticles "Magnetofood" and organic matrix structure plays an important role in this process. The result is the formation of spatial nanostructures, significantly affecting the functional and technological properties of raw materials and semi-finished products and, ultimately, the quality indicators and shelf life of finished products [15,17].

The processes of the fruit jelly products formation was studied in the works of such scientists as A.M. Dorohovych, V.F. Pertsevyi, V.I. Obolkina, I.O. Krapivnytska, E.H. Iorhachev, Y.V. Kambulova, etc. [1,5–12]. However, there is no data on the effects of nanopowder supplements, in particular, of the "Magnetofood" food supplement on the structure formation of jelly pastes in the production of fruit jelly and further studies are necessary.

Therefore, studying the influence of the "Magnetofood" food supplement on the structural and mechanical properties of mold fruit jelly with various structure-forming additives is well-timed and relevant.

## Literature Data Analysis and Target Setting

Fruit jelly products are useful and light confectionery products, thus, their assortment and level of consumption has increased in recent years [3]. Much of the fruit jelly products are made by foreign companies, for which reason the fruit jelly manufacturers must constantly improve the recipes and technologies, using a variety of food ingredients, supplements, improvers and technological methods [6–12,18–35].

In order to improve the structural and mechanical properties of jelly pastes, it is proposed to use pectic substances obtained from non-traditional raw materials, such as food industry waste (canning, wine-making, sugar-beet industries) and agriculture (seed-growing state farms, cotton growing, melon-growing) sectors [18,19];

as well as alternative raw materials: chitosan, vegetable, vegetable, and fruit and vegetable products [7,8,18–20].

Combined gel-forming systems for regulating the rheological and structural and mechanical properties of semi-finished and finished fruit jelly products are proposed, in particular the combination of gelatin and pectin, sulfated polysaccharides, gelatin - k-carrageenan, gelatin - LM pectin, [21–23]; pectin and hydrocolloids (Herbagel SW-010, ricogel 8100), LM pectin - k-carrageenan [23–25]; agar and Scanpro animal protein concentrate [26].

To improve the plastic strength of the jelly and the texture of fruit jelly products, various hydrogels are widely used in the production of fruit jelly and marmalade products, possessing the properties of thickeners, gelling agents and stabilizers - carrageenan and its sodium, potassium, ammonium salts, including furcellaran; xanthan, tara, guar gum, locust bean gum, xanthan gum, etc. [25,27,28].

Numerous studies had been conducted to explore the effect of modifying supplements on the structural and mechanical properties of jellies: sodium carboxymethylcellulose (Na-CMC) and iron chloride to increase the ability of sulfate polysaccharides [22, 29]; sodium lactate, sodium citrate and glycerol in the amount of (0,1-0,2)% of the total weight to increase the gelatinous ability of red seaweed polysaccharides and, as a result, to reduce their content by (35-40)% [30,31]; mannitol or sodium alginate in the amount of (0,08–0,09)% to increase the strength of the jelly to (40–60) % and to reduce the amount of agar (agaroid, furcellaran) used [32].

The most important factors in the formation of the quality of fruit jelly products is the correct selection and preparation of raw materials, compliance with the recipes and technological production flow diagram. Currently, Ukrainian manufacture of fruit jelly products mainly use two gelling agents: agar (0.8-10)% and pectin (1.0-1.5)%. Agaroid (Black Sea agar) and furcellaran (estagar) are of limited prevalence [2,9].

Introduction of gelling agents to the recipe yields a fairly strong jelly, the formation of which may be explained by the association of macromolecules or fragments with the formation of a three-dimensional network maintaining the liquid phase and providing resistance to external loads. The choice of gelling agents is very important for manufacturers, since it affects both the parameters of the technological process: the standard addition of other recipe components, use of appropriate equipment; and the texture properties of the product, and ultimately the quality indicators of the finished products [8,33].

Among the factors shaping the consumer preferences in choosing the fruit jelly and marmalade products, texture is most significant [1,11,32,33]. Therefore, the rheological properties of the jelly pastes and the process of gelation based on the transition of the solution containing the gelling agent from its liquid fluid state to a semi-solid gel-like structure, are predetermining

in the production technology of fruit jelly and marmalade. The structure, mechanical strength of the mold jelly pastes and, ultimately, the quality of the finished products and their stability during storage depend on the gelation process.

The use of and research in ingredients and food supplements, improvers, correcting the rheological properties of jelly pastes and forming the necessary structural and mechanical characteristics, is an important task in the fruit jelly technology, as it contributes to the development of resource-saving technologies, expanding the range, increasing shelf life, saving raw materials and reducing the cost of finished products.

Analysis of information sources [1-35] shows the lack of data on fruit jelly technologies using nanopowder additives, improving the structural and mechanical properties of jelly pastes and finished products. We have developed and proposed the "Magnetofood" food additive [TU U 10.8-2023017824-001:2018] as an additive improver for food systems. This is an ultra-fine powder with a large specific and highly active surface.

In food systems, "Magnetofood" exhibits deoxidizing, antioxidant, sorption, bacteriostatic, complexing, emulsifying, water-retentive, fat-holding, water-binding, stabilizing, structuring properties [13–17].

In this regard, it is relevant to study the rheological and structural and mechanical properties of jelly pastes with various structure-forming agents when introducing the "Magnetofood" food supplement into the recipe composition.

### Purpose and Objectives of Research

The aim of the work is to study the structural and mechanical properties of mold fruit jelly with various structure-forming agents when introducing the "Magnetofood" food supplement into the recipe composition.

To achieve the goal, the following tasks were set: to investigate the influence of the "Magnetofood" food supplement on:

- viscosity of test samples of jelly pastes on agar and pectin in the range of shear stress:  $\gamma = (1,5–40) \text{ s}^{-1}$ ;
- effective viscosity of test samples of jelly pastes on agar and pectin at different temperatures;
- time and intensity of thixotropic destruction and recovery for test samples of jelly pastes on agar and pectin;
- strength of jellies for test samples of jelly pastes on agar and pectin;
- rate of structuring test samples of jelly pastes on agar and pectin;
- to establish a rational mass fraction of the "Magnetofood" food supplement in the fruit jelly formulations on agar and pectin.

### Statement of Basic Materials

Object of research: technology of mold fruit jelly on agar and pectin. Subjects of research: for modeling test

samples of jelly pastes, the following basic recipes were selected: Formulation No. 11 (mold fruit jelly on agar [DSTU 4333:2004]) in Table 1, Formulation No. 49 (mold fruit jelly on pectin [DSTU 4333:2004]) in Table 2 [2].

*Preparation of test samples of jelly pastes.* Weighted amounts of dry gelling agent (agar or pectin — see Table 1 and Table 2), taking into account the amount of “Magnetofood” food supplement introduced (1.0 g, 1.5 g, 2.0 g per 1 kg of raw material) were added to 263 ml of drinking water, the mixture was heated with thorough stirring until complete dissolution of the gelling agents and solvation of the “Magnetofood” food supplement particles. Following that, the sugar was added in accordance with the formulation and boiled down to achieving the dry matter content: (73-74)% for agar and (70-72)% for pectin. At the end of boiling, 262.7 g of molasses was added. The resulting syrup was cooled to the temperature of: (50-60) °C for agar and (76-80) °C for pectin (such temperatures for processing the jelly pastes are contingent upon different gelation temperatures of gelling agents), and stirred. After that, the structural and mechanical parameters in test samples of jelly pastes were determined.

Table 1 – Mold fruit jelly formulations on agar (control) and with different mass fractions of the “Magnetofood” food supplement

Raw materials	Raw material consumption per 1 ton of finished products, kg			
	Sample 1 – control	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Sanding sugar for sprinkling	86.6	86.6	86.6	86.6
Sanding sugar for jelly	525.6	525.6	525.6	525.6
Molasses	262.7	262.7	262.7	262.7
Agar	10.5	10.5	10.5	10.5
Citric acid	11.8	11.8	11.8	11.8
Various essences	1.6	1.6	1.6	1.6
Various dyes	0.5	0.5	0.5	0.5
“Magnetofood” food supplement	–	1.0	1.5	2.0

In the process of performing test works, standard and generally accepted research methods were used [36-39]. Viscous and thixotropic characteristics were determined on the Reotest-2 rotation viscometer in accordance with the instructions [34]. The basis of the Reotest-2 working principle is measurement of one-dimensional displacement, arising from the tangential displacement of the layers of the test sample. In this case, the measuring system of N/N cylinders was used.

Table 2 – Mold fruit jelly formulations on pectin and with different mass fractions of the “Magnetofood” food supplement

Raw materials	Raw material consumption per 1 ton of finished products, kg			
	Sample 5 – control	Sample 6	Sample 7	Sample 8
Sanding sugar for sprinkling	86.6	86.6	86.6	86.6
Sanding sugar for jelly	718.9	718.9	718.9	718.9
Molasses	262.7	262.7	262.7	262.7
Agar	18.0	18.0	18.0	18.0
Citric acid	12.0	12.0	12.0	12.0
Various essences	10.0	10.0	10.0	10.0
Various dyes	1.6	1.6	1.6	1.6
“Magnetofood” food supplement	0.6	0.6	0.6	0.6
Sanding sugar for sprinkling	–	1.0	1.5	2.0

Determination of the strength properties of test jelly samples was carried out on an AP-4/1 penetrometer by the cone dipping method with a cone opening angle of 30 ° and 60 ° using the standard method [5, 35, 36]. Average rate of structuring  $V_{cmp}$  was found by the formula (1):

$$V_{cmp} = \frac{\tau_{max} - \tau_0}{B_{cmp}} \quad (1)$$

where

$\tau_{max}$  – maximum strength value, kPa;

$\tau_0$  – initial strength value, kPa;

$B_{cmp}$  – structuring duration, minutes.

### Findings

An important structural and rheological characteristic affecting the course of the technological process, the quality of finished products and determining the behavior of the jelly paste at the stages of pipeline transportation, mixing and molding, is its viscosity. This indicator, determined by the forces of adhesion between the molecules, characterizes the resistance of the paste, its flow under the action of external forces and depends on many factors, such as dry matter content, composition and ratio of recipe components, temperature, etc. Previous studies have shown that the food additive “Magnetofood” affects the structural and mechanical properties of food systems, such as meat and dough [13,14,17]. In this regard, the effect of the “Magnetofood” food supplement on the viscosity of test samples of jelly pastes on agar and pectin (see Fig. 1, a–b) was studied. from fig. 1 it follows that the rheological curves of the prototypes of jelly masses in the interval of the considered shear rates are pseudo-plastic liquids, whose viscosity is a characteristic



of the equilibrium state between the destruction and recovery processes.

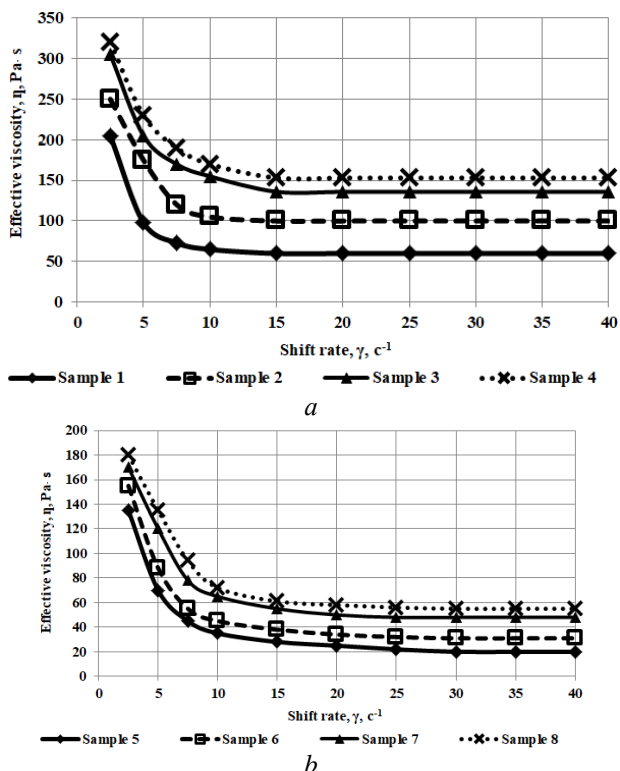


Fig. 1 – Effective viscosity of test samples of jelly pastes: a - on agar; b - on pectin

All test samples of jelly pastes (see Fig. 1, a-b) are characterized by a fairly high degree of structuring, and, consequently, the viscosity itself in the range of low shear stress:  $\gamma = (1,8-9) s^{-1}$ , since the structure being destroyed by such a slow current has time to recover. As the shear rate increases, through asymmetric molecules taking an ordered position and being oriented in the direction of flow, the shear stress decreases, and, consequently, so does the viscosity. At the shift rate of  $\gamma = (9,0-25) s^{-1}$  for jelly pastes on agar and  $\gamma = (7,5-12) s^{-1}$  – on pectin, an intense destruction of the spatial framework is observed. With a further increase in shear rate, viscosity becomes minimal, characteristic of a destroyed structure, and constant regardless of the shear rate. It should be noted that the viscosity increases in the whole range of shear stress with the introduction of the “Magnetofood” food supplement in the amount of (0.10-0.20)% of the total weight of the raw material in all test samples of jelly pastes:  $\gamma = (1,5-40) s^{-1}$  by a factor of 2.9– for pastes on agar and by a factor of 1.85 - for pastes on pectin as compared to control samples. Moreover, the rational amount of the “Magnetofood” food supplement is 0.15%, and a further increase has virtually no effect on the change in viscosity of the jelly pastes. The increase in the viscosity of the jelly pastes is caused by the ability of the “Magnetofood” food supplement to structure formation. In the process of jelly pastes – the food gel - intermolecular, electrostatic and hydrophobic interactions

between the saccharic components, gelling agents and nanoparticles of the “Magnetofood” food supplement are of significant importance. Due to this, a three-dimensional network is formed, built by hydrocolloid molecules, structured by the “Magnetofood” nanoparticles.

Since temperature is a factor that has the greatest effect on the fluidity of thermally unstable jelly pastes, the temperature regimes for studying the viscosity properties were chosen in accordance with the technological parameters of the jelly paste process at the introduction of flavoring, aromatic substances and dyes. The maintained temperature depended on the type of gelling agent used and exceeded its gelation temperature by (5–7) °C: (82–5) °C for jelly pastes on pectin, (52–5) °C for jelly pastes on agar, preventing the process of sucrose and gelling agent hydrolysis as a result of the introduction of acid, as well as the loss of aromatic substances [35,36].

During the technological process of fruit jelly production, the jelly paste while being pumped through the pipeline and mixed is subjected to mechanical stress, which affects its rheological properties and, as a result, the quality of the finished products. The occurring reverse destructions and recovery of connections between the components of the jelly paste, thixotropy, depend on its formulation. Therefore, most methods for determining the thixotropic properties are based on the determination of the rheological characteristics of jelly masses pastes in two states – those prior to destruction and afterwards [35].

However, based on the fact that the recommended parameters of the technological processes correspond to the shear rates at which the structure is destroyed –  $\gamma = 5,4 s^{-1}$ , the study of the influence of the mechanical processing duration on the rheological properties of test samples of jelly pastes, as well as the determination of the time of thixotropic recovery of their gel structure (see Fig. 2, a–b) is of particular interest.

It is seen from Fig. 2 a that an intensive decrease in viscosity of test samples of jelly pastes on agar occurs in the first (25-27) minutes of mechanical effect, after which an insignificant decrease in the values of this indicator is observed. So, the viscosity of the control sample (sample 1) within the time specified decreases from 99.5 kPa to 10.5 kPa, that is, by a factor of 9.5. As the “Magnetofood” food supplement content increases from 0.10% to 0.20%, the thixotropic destruction of the jelly masses somewhat slows down in samples 2, 3, 4 with the content of the “Magnetofood” food supplement in the amount of 0,10%; 0,15%; 0,20 %, as a result of constant mechanical influence within 25 minutes, the viscosity decreases from 175 kPa, 225 kPa and 228 kPa to 108 kPa, 148 kPa and 150 kPa - that is, by a factor of 1.6; 1.5; 1.5, respectively. After the mechanical effect ceases, a gradual recovery of the structure occurs within (15-20) minutes. Moreover, if we take the viscosity values at the initial time point prior to the structure destruction as 100%, this indicator for the control sample (sample 1) decreases by 9.8% after its recovery, and on average by 3.8% for test samples with the “Magnetofood” food supplement (samples 2, 3, 4).

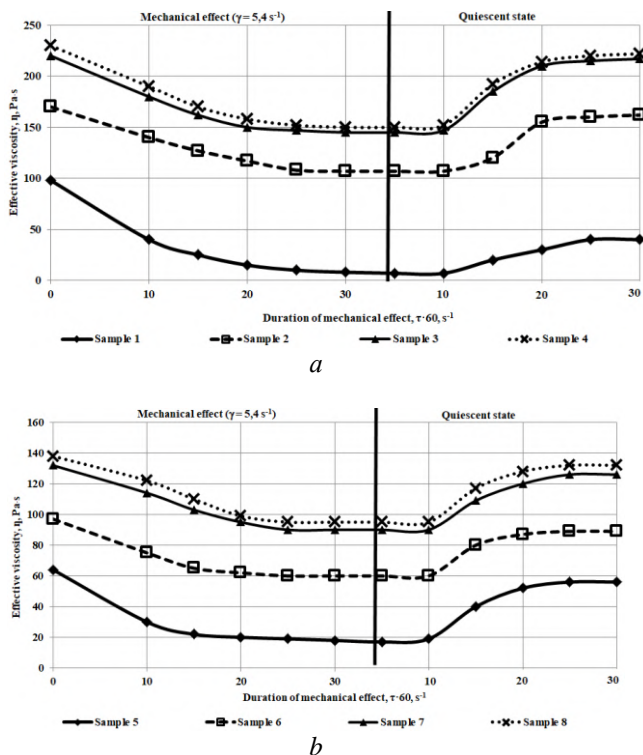


Fig. 2 – Dependence of the effective viscosity on the duration of mechanical effect with the subsequent quiescent state of the test samples of jelly pastes: a – on agar; b - on pectin

Thus, the use of “Magnetofood” food supplement in the formulation of fruit jelly on agar slows down the processes of destruction by a factor of 1.1 and accelerates the processes of jelly structure recovery after mechanical effect ceases by 3.8%, increasing its thixotropy ability by 7.5%.

Time and intensity of thixotropic destruction and recovery for jelly pastes on pectin (see Fig. 2, b) are somewhat different. Thus, after (20–22) minutes of mechanical effect, viscosity of the jelly paste on pectin reaches its minimum value, and remains constant afterwards. At the same time, the time required for thixotropic recovery is (10-14) minutes. In accordance with research results, the introduction of the “Magnetofood” food supplement into the formulation affects the ability of jelly pastes to recover their original structure. So, viscosity of the control sample (sample 5) after mechanical effect with subsequent maturation is reduced by 9.4%, and of the test samples 6, 7, 8 with the addition of “Magnetofood” - by 3.3%. That is, the use of the “Magnetofood” food supplement in the formulation of fruit jelly on pectin also slows down the destruction processes by a factor of 1.11 and speeds up the recovery processes of the jelly structure after the mechanical effect ceases by 3.82%, increasing thixotropic ability by 6.0%.

This occurs due to the fact that although the “Magnetofood” food supplement is not a surface active agent, however, “Magnetofood” nanoparticles are able to stabilize disperse systems such as emulsions and

suspensions through their thickening and thixotropic properties, preventing the separation of the disperse system. A change in the current properties of a liquid disperse system in the presence of “Magnetofood” nanoparticles leads not only to its stabilization, but also to the formation of a certain consistency.

Changes in temperature and composition are reflected in the viscosity of test samples of jelly pastes. Therefore, the change in the rheological properties of test samples of jelly pastes depending on temperature was studied in order to determine the possibility of its regulation. In the hot jelly paste, the gelling molecules, forming different structures in an unpredictable manner, converge randomly as a result of Brownian motion and repel in the dispersion medium, which is an aqueous sugar solution. When the jelly paste is cooled to a temperature close to the gelation temperature, hydrogen bonds are formed between the macromolecules of the gelling agent and the process of formation of spatial structures occurs, the further aggregation of which is accompanied by emergence of jelly [11]. The temperature at which the process of gelation begins in the cooled jelly paste depends on the type of gelling agent used, the method of its production, etc. Fig. 3, a–b presents dependence of the viscosity of test samples of jelly pastes on agar and pectin on temperature.

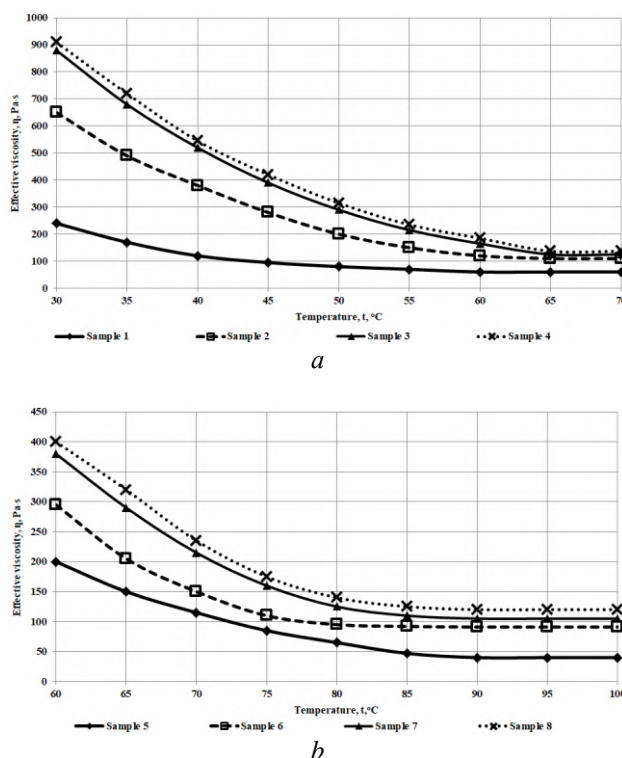


Fig. 3 – Dependence of viscosity on the temperature of test samples of jelly pastes: a – on agar; b - on pectin

It follows from Fig. 3 that the effect of changes in component composition on viscosity is insignificant at high temperatures (65-100) °C for test samples of jelly

pastes on agar and (85-100) °C for test samples on pectin, since the forces of intermolecular bonds between the recipe components of the system are weakened by their increased thermal vibrations. The speed and magnitude of the change in viscosity with decreasing temperature depends on the composition of the dispersion medium [37].

It follows from Fig. 3 *a* that the increase in viscosity of test samples of jelly pastes on agar when using the "Magnetofood" food supplement with a decrease in temperature becomes more pronounced. This increases the temperature effect on the rheological properties of jelly pastes. For example, the viscosity of the control sample 1 in the temperature range of (30-50) °C decreases 3.3 times, and the viscosity of samples 2, 3, 4 with the "Magnetofood" food supplement - only 3.25; 3.07; 2.89 times, respectively.

Similar changes are also observed in test samples 5-8 for pectin (Fig. 3, *b*): the viscosity of the control sample in the temperature range of (60-80) °C decreases by a factor of 3.2, and the viscosity of samples 6, 7, 8 with the "Magnetofood" food supplement - only 3.1; 3.02; 2.85 times, respectively.

It may be assumed that the use of the "Magnetofood" food supplement in test samples of jelly pastes leads to an increase in intermolecular bonds, which will be less affected by temperature, and less likely to break down during an elementary act of flow.

It follows from Fig. 3, *a-b* that the viscosity in test samples 5-8 on pectin is increased less with decreasing temperature compared to test samples 1-4 on agar. Perhaps, the number of active sites on the surface of pectin molecules insufficient for the formation of new intermolecular bonds contributes to this effect, causing an increase in the viscosity of the jelly paste with decreasing temperature [38].

At the temperature of (50-55) °C for jelly pastes on agar and (75-80) °C for jelly pastes on pectin (see Fig. 3, *a-b*), an increase in viscosity is observed, which indicates that the structuring temperature is approached, which must be taken into account when mixing after addition of flavoring substances and when molding.

Considering the increase in the viscosity of test samples of jelly pastes on agar (2-4) and on pectin (6-8) when using the "Magnetofood" food supplement, the paste temperature must be increased to (60 ± 2.5) °C (for jelly pastes on agar) to approximate its value for control samples during such technological operations as mixing when adding flavor substances and molding. For jelly pastes on pectin, a temperature rise to (80 ± 2,5) °C is possible.

*Study of Plastic Strength of Jelly Paste Test Samples.* In the fruit jelly production technology, the determining factor of quality of a product is the process of gelation taking place as a result of the transition of the gelling agent from a liquid, fluid state to a semi-solid, jelly-like structure. This process is accompanied by a gradual increase in strength as a result of the emergence of homeopolar, ionic and associative bonds between the

gelling agent molecules with the formation of a three-dimensional network holding the liquid phase in its cells - a solution of sugars that are part of the formulation. The structure, mechanical strength of the molded pastes and, as a result, the quality of the finished products and their stability during storage depend on the gelation process. At the same time, the structural and mechanical properties of the jelly, as well as the intensity of its formation in the maturing process, largely depends on the type and concentration of the gelling agents used, the composition and ratio of the recipe components, as well as on the temperature of the jelly paste during molding [39].

To study the influence of the "Magnetofood" food supplement and the temperature on the process of the formation of jelly pastes, a change in the strength of the jelly formation (see Fig. 4, *a-b*) was determined. The strength measurement was carried out 60 minutes after the formation of jelly pastes on agar and after 5 minutes - on pectin, which allows to achieve the level of structurization at which the penetration tool is dipped into the volume under study without violating its integrity. In determining the duration of the jelly paste maturation, we were guided by the fact that the strength of the jelly, at which it may be removed from the mold, cut and packaged, is 6.5 kPa for jelly and marmalade pastes on agar and 4.5 kPa - for pastes on pectin [36, 40].

Analysis of experimental data in Fig.4, *a-b* shows that the control sample on pectin reaches the given value in 17 minutes at the temperature of jelly paste of 63 °C, and in 90 minutes on agar, when the temperature inside the paste is 22 °C.

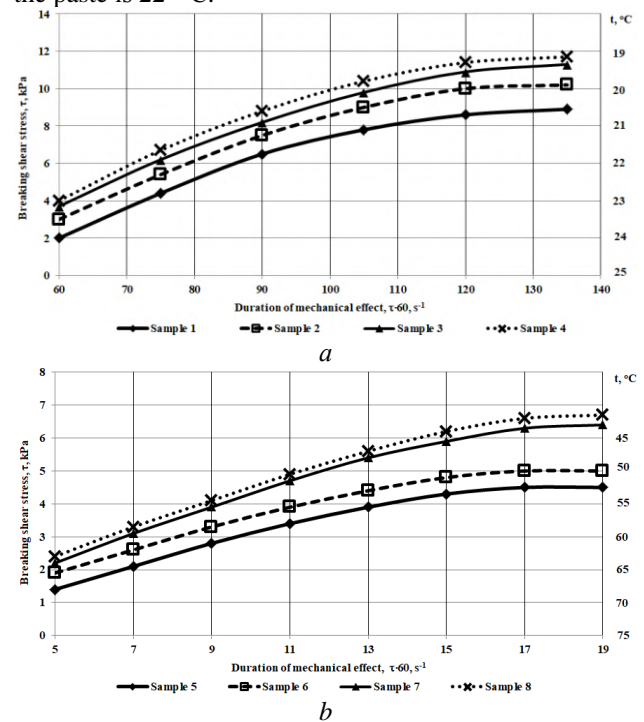


Fig. 4 – Dependence of the breaking shear stress on the time of the mechanical effect of the gel-like layer of the test samples of jelly pastes: *a* – on agar; *b* – on pectin

As a result of determining the influence of the "Magnetofood" food supplement on the process of structure formation, it was established that in experimental samples of jelly pastes on agar (2-4) and on pectin (6-8) (see Fig. 4, *a-b*), addition of the "Magnetofood" food supplement in the amount of (0.10-0.20)% of the total weight of raw materials leads to an increase in the strength of the jelly by (10-12)% for agar and (7-9)% for pectin as compared to the control samples (1, 5). Moreover, the rational amount of the "Magnetofood" food supplement amounts to 0.15% of the total weight of raw materials, since a further increase in the share of the "Magnetofood" food supplement to 0.20% did not have a significant effect on the plastic strength of the jelly.

The effect of the formulation on the intensity of the process of jelly formation was judged by the average rate of structuring (see Formula (1)).

Table 3 shows the effect of the "Magnetofood" food supplement on the rate of structuring of test samples of jelly pastes.

Table 3 – Structuring speed of test samples of jelly pastes ( $n = 3, p \leq 0,05$ )

Indicators / test samples	$\tau_0$ , kPa	$\tau_{max}$ , kPa	$t_{cmp}$ , min	$V_{cmp}$ , kPa/min
Test samples of jelly pastes on agar				
Sample 1 – control	3.4	10.1	60	0.11
Sample 2	3.9	11.5	60	0.15
Sample 3	4.4	11.9	60	0.19
Sample 4	4.5	12.1	60	0.20
Test samples of jelly pastes on pectin				
Sample 5 – control	1.8	5.6	12	0.28
Sample 6	2.3	6.7	12	0.37
Sample 7	2.8	7.2	12	0.47
Sample 8	2.9	7.4	12	0.49

From the experimental data of Table 3 it follows that the addition of the "Magnetofood" food supplement in the amount of (0.10-0.20)% of the total weight of raw materials leads to an increase in the rate of structuring of the jelly pastes on agar by a factor of (1.1-1.6), and (1.3-1.7) on pectin. This is caused by the structuring and stabilizing properties of the "Magnetofood" food supplement: the ability to electrostatic and coordination interaction with the molecules of the gelling agents and the macromolecular aggregates of the system, forming the ordered spatial framework that strengthens gel-like structures. As a result, a good jelly texture is formed, which ensures high consumer properties and prolongs the shelf life, in particular, no moisture is released during storage.

Thus, the study of the structural and mechanical characteristics of the test samples of jelly pastes on agar and pectin showed that the "Magnetofood" food supplement contributes to the improvement of the gel-forming ability of agar and pectin, the formation and

further strengthening of the spatial framework of the gel in the course of samples' maturation. As a result, the jelly solidifies as a homogeneous monolithic and coagulation structure, and does not consist of jelly granules of various shapes and sizes. This improves the structural and mechanical characteristics of jelly and marmalade significantly.

Thus, the study of the structural and mechanical parameters of jelly pastes with various structure-forming agents confirms the hypothesis of stabilization of the structure of jelly pastes with the use of the "Magnetofood" food supplement. This also proves that the introduction of the "Magnetofood" food supplement in the amount of 0.15% of the total weight of raw material at the gelling agent soaking stage, reduces its quantity: by 10% for agar and by 8% for pectin and also contributes to the strength of jelly and marmalade: by 10% for agar, by 8% for pectin.

The studies conducted and the results obtained form the basis for confirming the rational content of the "Magnetofood" food supplement in the formulations of mold fruit jelly - 0.15% of the total weight of raw material. Tables. 4 and 5 show the formulations of molded jelly "Ranok" (on agar) and "Veselka" (on pectin), respectively.

Table 4 – "Ranok" molded jelly formulation (on agar)

Raw material	Raw material consumption per 1 ton of finished products, kg
Sanding sugar for sprinkling	86.6
Sanding sugar for jelly	525.6
Molasses	262.7
Agar	9.5
Citric acid	11.8
Various essences	1.6
Various dyes	0.5
"Magnetofood" food supplement	1.5

Table 5 – "Veselka" molded jelly formulation (on pectin)

Raw material	Raw material consumption per 1 ton of finished products, kg
Sanding sugar for sprinkling	86.6
Sanding sugar for jelly	718.9
Molasses	262.7
Agar	16.6
Citric acid	12.0
Various essences	10.0
Various dyes	1.6
"Magnetofood" food supplement	0.6
Sanding sugar for sprinkling	1.5

### Conclusions

The results obtained confirm the hypothesis of stabilization of the structure of the jelly pastes with the use of the "Magnetofood" food supplement:



–viscosity of the jelly pastes increases in all test samples of jelly pastes with the introduction of the “Magnetofood” food supplement in the amount of (0.10-0.20)% of the total weight of raw material in the whole range of shear stress:  $\gamma = (1,5-40) \text{ s}^{-1}$  by a factor of 2.9– for pastes on agar and 1.85– for pastes on pectin in comparison with control samples;

– use of the “Magnetofud” food supplement in test samples of jelly pastes slows down the processes of destruction of the jelly structure 1.1 times (on agar) and 1.11 times (on pectin), accelerates the processes of recovery of the jelly structure after the mechanical action ceases by 3.8% (on agar) and by 3.82% (on pectin), increases its thixotropy ability by 7.5% (on agar) and by 6.0% (on pectin);

– in test samples of jelly pastes with the use of the “Magnetofood” food supplement, the effect of temperature on the effective viscosity is on average slowed down by (50-75) Pa · s compared to control samples;

–introduction of the “Magnetofood” food supplement in test samples of jelly pastes in the amount of (0.10-0.20)% of the total weight of raw materials leads to an increase in the strength of jelly by (10-12)% for agar and (10-12)% for pectin and to an increase in the rate of structuring of jelly pastes by a factor of (1.1-1.6) on agar, and (1.3-1.7) on pectin compared to control samples.

The rational content of “Magnetofood” food supplement in mold fruit jelly formulations was determined - 0.15% of the total weight of the raw material. Formulations of mold fruit jelly “Ranok” (on agar) and “Veselka” (on pectin) was developed.

#### Список літератури

1. **Дорохович, А. М.** Технологія галузі кондитерське виробництво. Курс лекцій / **А. М. Дорохович, С. Г. Бондаренко, Л. М. Недєліна.** - Київ: НУХТ, 2006. - 110 с.
2. **Иванушко, Л. С.** Рецептуры на мармелад, пастилу и зефир / **Л. С. Иванушко.** – Москва: Пищевая промышленность, 1974. – 208 с.
3. **Стасієвич, С. А.** Ринок кондитерських виробів України: пропозиція і попит / **С. А. Стасієвич, С. М. Валявський** // *Продукты & ингредиенты.* – 2013. – № 1. – С. 14–17.
4. **Сарафанова, Л. А.** Применение пищевых добавок в кондитерской промышленности / **Л. А. Сарафанова.** – СПб. Профессия, 2005. – 304 с.
5. **Юргачева, Е. Г.** Технологія кондитерського виробництва. Практикум / **Е. Г. Юргачева, О. В. Макарова, Л. В. Гордієнко, Г. В. Коркач.** – Одеса: Сімекс-прінт, 2011. – 204 с.
6. **Камбулова, Ю. В.** Удосконалення технології мармеладу желейного з пониженим вмістом цукру / **Ю. В. Камбулова, Д. С. Матяс** // *Міжнародний науковий журнал “Інтернаука”.* – 2018. – №15. – 14 с.
7. **Крапивницкая, И. А.** Овощные и фруктово-овощные пектиносодержащие продукты в отделочных полуфабрикатах с желейной структурой / **И. А. Крапивницкая, В. И. Оболкина, У. С. Йовбак** // *Кондитерское производство.* – 2014. – № 5. – С. 33–34.
8. **Юргачева, Е. Г.** Альтернативные виды сырья в технологии получения пастило-мармеладных изделий / **Е. Г. Юргачева, К. В. Аветисян, А. В. Куц** // *Хлібопекарська і кондитерська промисловість України.* – 2009. – № 1. – С. 14–16.
9. **Дорохович, А. М.** Тиксотропія кондитерських агарових гелів / **А. М. Дорохович, А. В. Мурзін, І. Л. Клепиков** // *Хлебный и кондитерский бизнес.* – 2014. – 6(19). – С.34–37.
10. **Дорохович, А. М.** Використання гідроколоїдів у кондитерському виробництві / **А. М. Дорохович, В. І. Оболкіна, О. О. Кохан (Гавва), С. Г. Кияниця** // *Хлібопекарська і кондитерська промисловість України.* – 2005. – № 2. – С. 9–11.
11. **Перцевої Ф. В., Крапивницкая І. О., Омельчук Є. О.** Наукові та практичні аспекти пектину і пектинопродуктів: монографія. Суми: Сумський національний аграрний університет, 2015. – 314 с.
12. **Юргачева, Е. Г.** Регулирование качества желейного мармелада с измененным углеводным составом / **Е. Г. Юргачева, К. В. Аветисян** // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2016. – Т. 2/11. – № 80. – С. 48–56. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.65768.
13. **Pyukha, N. G.** Production technology and quality indices of a food additive based on magnetite / **N. G. Pyukha, I. V. Tsykhanovska, Z. V. Barsova, V. A. Kovalenko** // *East European Journal of Advanced Technologies.* – 2010. – Vol. 6, No. 10 (48). – P. 32 – 35.
14. **Tsykhanovska, I. V.** Development of technology of rye-wheat bread “Kharkiv Rodnichok” with the addition of a multifunctional nutritional supplement “Magnetofood” / **I. V. Tsykhanovska, O. V. Aleksandrov, V. V. Evlaz, T. A. Lazareva, K. V. Svidlo, T. B. Gontar** // *East European Journal of Advanced Technologies.* – 2017. – Vol. 6, No. 11 (90). – P. 48 – 58. – doi: 10.15587/1729-4061.2017.117279.
15. **Tsykhanovska, I.** Substantiation of the interaction mechanism between the lipo- and glucoproteids of rye-wheat flour and nanoparticles of the food additive “Magnetofood” / **I. Tsykhanovska, A. Alexandrov, V. Evlash, T. Lazareva, O. Bryzyska** // *East European Journal of Advanced Technologies.* – 2018. – Vol. 4 /11, No 94. – P. 61–68. – doi: 10.15587/1729-4061.2018.140048.
16. **Tsykhanovska, I.** Substantiation of the mechanism of interaction of carbohydrates of rye-wheat flour and nanoparticles of the polyfunctional food additive “Magnetofood” / **I. Tsykhanovska, A. Alexandrov, V. Evlash, T. Lazareva, T. Yevlash** // *East European Journal of Advanced Technologies.* – 2018. – Vol. 3 /11, No 93. – P. 59–68. – doi: 10.15587/1729-4061.2018.133373.
17. **Tsykhanovska, I.** Formation of the functional and technological properties of the beef minced meat by using the food ad-ditive on the nanopowder basis of double oxide of two- and trivalent iron / **I. Tsykhanovska, L. Skurikhina, V. Evlash, L. Pavlotska** // *Ukrainian food journal.* – 2018. – Vol. 7, Issue 3. – P. 379–396. – doi: 10.24263/2304-974X-2018-7-3-4.
18. **Бабаходжаев, С. Ф.** Мармелад на хлопковом пектине / **С.Ф. Бабаходжаев** // *Пищевая промышленность.* – 1991. – № 2. – С. 54.
19. **Призарова, У.** Пектиновые вещества из отходов пищевых производств / **У. Призарова, А. Х. Арифходжаев, Х. Т. Саломов** // *Пищевая промышленность.* – 1991. – № 2. – С. 55.
20. **Гурьянов, И. Д.** Хитозан в производстве желейного мармелада / **И. Д. Гурьянов, З. И. Фаизрахманова, Д. И. Фаизрахманова** // *Вестник Казанского*

- технологического университета. – 2014. – № 7. – С. 205–208.
21. **Фощан, А. Л., Григоренко, А. М.** Патент № 61370 UA, МПК А 23 L 1/06. Спосіб підвищення міцності драглів сульфатних полісахаридів, 2011. Бюл. № 14. 4 с.
  22. **Фощан, А. Л.** Регулювання реологічних та структурно-механічних властивостей желейних виробів та напівфабрикатів на основі комбінованих систем драглеутворювачів / **А. Л. Фощан** // *Хлібопекарська і кондитерська промисловість України*. – 2010. – № 2. – С. 29–30.
  23. **Гриненко, И. Г.** Некоторые закономерности образования инулиновых гелей / **И. Г. Гриненко, Р. И. Грушецкий, Л. М. Хомичак** // *Сахар: Научно-технический и производственный журнал*. – 2014. – № 11. – С. 54–55.
  24. **Шебершнева, Н. Н.** Использование рикогеля 8100 в производстве желейного мармелада / **Н. Н. Шебершнева** // *Кондитерское производство*. – 2013. – № 6. – С. 15–16.
  25. **Игнатова, Т. А.** Использование гидрогелей каррагинанов в технологии желейных продуктов / **Т. А. Игнатова, А. В. Подкорытова** // *Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов мирового океана: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. в 2 частях*. Владивосток: Дальрыбвтуз. – 2014. – С.58–63.
  26. **Теймурова, А. Т.** Розробка технологій желейної продукції з використанням концентратів тваринних білків: автореф. дис. канд. техн. наук. Харків: Харківський державний університет харчування та торгівлі, 2010. 18 с.
  27. **Осипов, А.** Пектины и каррагинаны для кондитерских изделий. Новые возможности традиционных ингредиентов / **А. Осипов** // *Кондитерское производство*. – 2012. – № 5. – С.18–19.
  28. **Маренкова, Т. І.** Патент № 94598 UA, МПК А23L 1/00. Спосіб отримання мармеладу желейного формового на каппа-караганіні з якісно зміненими функціонально-технологічними властивостями, 2014. Бюл. № 22. 6 с.
  29. **Артамонова, М. В., Лисюк, Г. М., Туз, Н. Ф.** Технологія мармеладу желейного з використанням криаспорошків рослинного походження: монографія. Харків: ХДУХТ, 2015. – 134 с.
  30. **Овсянникова, Л. Г.** Использование кислых полисахаридов для сокращения расхода студнеобразователей из красных морских водоростей / **Л. Г. Овсянникова** // *Сборник материалов науч.-техн. конференции «Прогрессивные технологии и оборудование пищевых производств»*. СПб: ГАХПТ, 1999. – С.183.
  31. **Евалева, В. В.** Лактатсодержащие пищевые добавки и мармелад функционального назначения / **В. В. Евалева, Т. М. Черпалова, Т. А. Никифорова** // *Кондитерское производство*. – 2013. – № 6. – С. 13–16.
  32. **Свиридов, В. В.** Влияние природы студнеобразователя на свойства пищевых студней / **В. В. Свиридов, А. В. Банникова, Н. М. Птичкина** // *Известия вузов. Пищевая технология*. – 2012. – № 1. – С. 59–61.
  33. **Шеховцова, Т. Г.** Разработка технологии желейного мармелада с заданными потребительскими свойствами / **Т. Г. Шеховцова, Ю. И. Сидоренко** // *Хранение и переработка сельхозсырья*. – 2008. – № 8. – С. 65–67.
  34. **Ростет:** инструкция по эксплуатации. ГДР, 1978.
  35. **Косой, В. Д.** Инженерная реология биотехнологических сред / **В. Д. Косой, Я. И. Виноградов, А. Д. Мальшев**. – СПб.: ГИОРД, 2005. – 648 с.
  36. **Золотарева, Л. А.** Структурообразователи и прочностные свойства желейных изделий / **Л. А. Золотарева, К. В. Аветисян** // *Хлібопекарська і кондитерська промисловість України*. – 2007. – № 4. – С. 40–41.
  37. **Аймесон, А.** Пищевые загустители, стабилизаторы, гелеобразователи / пер. С. В. Макарова / **А. Аймесон**. СПб.: ИД «Профессия», 2012. – 408 с.
  38. **Голубев, В. Н.** Функциональные свойства пектинов и крахмала / **В. Н. Голубев, С. Ю. Беглов, А. В. Поджуев** // *Пищевые ингредиенты. Сырье и добавки*. – 2000. – № 1. – С. 14–18.
  39. **Мазур, Л. М.** Физико-химические процессы гелеобразования пектинов в пищевых технологиях / **Л. М. Мазур, А. А. Олехнович** // *Сахар*. – 2014. – 1. – С.2-5.
  40. **Карнаушенко, Л. И.** Реологические свойства желейных масс / **Л. И. Карнаушенко, Э. И. Погонцева, А. Д. Чмырь** // *Кондитерская и хлебопекарная промышленность*. – 1981. – № 3. – С. 41–42.

## References (transliterated)

1. **Dorohovich, A. M., Bondarenko, Ye. G., Nedelina, L. M.** Tehnologija galuzi konditers'ke virobnictvo. Kurs lekcij. Kiiv: NUHT, 2006, 110.
2. **Ivanushko, L. S.** Receptury na marmelad, pastilu i zefir. Moskva: Pishhevaja promyshlennost', 1974, 208.
3. **Stasinevy`ch, S. A., Valyavs`ky`j, S. M.** Ry`nok kondy`ters`ky`x vy`robiv Ukrainy`n: propozy`ciya i popy`t. *Produkty & y`ngredy`enty*, 2013, 1, 14–17.
4. **Sarafanova, L. A.** Primenenie pishhevyyh dobavok v konditerskoj promyshlennosti. SPb. Professija, 2005, 304.
5. **Iorgacheva, E. G., Makarova, O. V., Gordiyenko, L. V., Korkach, G.V.** Tehnologiya kondy`ters`kogo vy`robny`cztva. Prakty`kum. Odesa: Simeks-print, 2011, 204.
6. **Kambulova, Yu. V., Matyas, D. S.** Udoskonalennaya tehnologiya marmeladu zhelejnogo z pony`zheny`m vmistom czukri. *Mizhnarodny`j naukovy`j zhurnal "Internauka"*, 2018, 15, 14.
7. **Krapivnickaja, I. A., Obolkina, V. I., Jovbak, U. S.** Ovoshhnye i fruktovo-ovoshhnye pektinosoderzhashhie produkty v otdelochnyh polufabrikatah s zhelejnoj strukturoj. *Konditerskoe proizvodstvo*, 2014, 5, 33–34.
8. **Iorgacheva, E. G., Avetisjan, K. V., Kuc, A. V.** Al'ternativnye vidy syr`ja v tehnologii poluchenija pastilo-marmeladnyh izdelij. *Xlibopekars`ka i kondy`ters`ka promy`slovis`t` Ukrainy`n*, 2009, 1, 14–16.
9. **Doroxovy`ch, A. M., Murzin, A. V., Klepikov, I. L.** Ty`ksotropiya kondy`ters`ky`x agarovy`x geliv. *Hlebnyj i konditerskij biznes*, 2014, 6 (19), 34–37.
10. **Doroxovy`ch, A. M., Obolkina, V. I., Koxan (Gavva), O.O., Ky`yany`cya, S. G.** Vy`kory`stannya gidrokoloyidiv u kondy`ters`komu vy`robny`cztvi. *Xlibopekars`ka i kondy`ters`ka promy`slovis`t` Ukrainy`n*, 2005, 2, 9–11.
11. **Percevoyi, F. V., Krapy`vny`cz`ka, I. O., Omel`chuk, Ye. O.** Naukovi ta prakty`chni aspekty` pekty`nu i pekty`noproduktiv: monografiya. Sumy`: Sums`ky`j nacional`ny`j agrarny`j universy`tet, 2015, 314.
12. **Iorgachova, K., Avetisian, K.** Quality adjustment for jelly marmalade of a modified carbohydrate structure *East European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, 2/11, 80, 48–56, doi: 10.15587/1729-4061.2016.65768.
13. **Plyukha, N. G., Tsykhanovska, I. V., Barsova, Z. V., Kovalenko, V. A.** Production technology and quality indices of a food additive based on magnetite. *East European Journal of Advanced Technologies*, 2010, 6, 10 (48), 32 – 35.



14. **Tsykhanovska, I. V., Aleksandrov, O. V., Evlaz, V. V., Lazareva, T. A., Svidlo, K. V., Gontar, T. B.** Development of technology of rye-wheat bread "Kharkiv Rodnichok" with the addition of a multifunctional nutritional supplement "Magnetofood". *East European Journal of Advanced Technologies*, 2017, **6**, No. 11 (90), 48–58.
15. **Tsykhanovska, I., Alexandrov, A., Evlash, V., Lazareva, T., Bryzyska, O.** Substantiation of the interaction mechanism between the lipo- and glucoproteids of rye-wheat flour and nanoparticles of the food additive "Magnetofood". *East European Journal of Advanced Technologies*, 2018, **4**/11, No 94, 61–68.
16. **Tsykhanovska, I., Alexandrov, A., Evlash, V., Lazareva, T., Yevlash, T.** Substantiation of the mechanism of interaction of carbohydrates of rye-wheat flour and nanoparticles of the polyfunctional food additive "Magnetofood". *East European Journal of Advanced Technologies*, 2018, **3**/11, No 93, 59–68.
17. **Tsykhanovska, I., Skurikhina, L., Evlash, V., Pavlotska, L.** Formation of the functional and technological properties of the beef minced meat by using the food additive on the nanopowder basis of double oxide of two- and trivalent iron. *"Ukrainian food journal"*, 2018, **7**, Issue 3, 379–396.
18. **Babahodzaev, S. F.** Marmelad na hlopkovom pektine. *Pishhevaja promyshlennost'*, 1991, **2**, 54.
19. **Prnazarova, U., Arifhodzaev, A. H., Salomov, H. T.** Pektinovy veshhestva iz othodov pishhevyykh proizvodstv. *Pishhevaja promyshlennost'*, 1991, **2**, 55.
20. **Gur'janov, I. D., Faizrahmanova, Z. I., Faizrahmanova, D. I.** Hitozan v proizvodstve zhelejnego marmelada. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 2014, **7**, 205–208.
21. **Foscan, A. L., Hryhorenko, A. M.** Patent 61370 UA, MPK A 23 L 1/ 06. Sposib pidvyshchennja micnosti drahliv sul'fatnykh polisaxarydiv, 2011. Bjul. 14, 4.
22. **Foscan, A. L.** Reholjuvannja reolohichnykh ta strukturno-mexaniichnykh vlastyvostej zhelejnnykh vyrobiv ta napivfabrykativ na osnovi kombinovanykh system drahle utvorjuvachiv. *Xlibopekars'ka i kondyters'ka promyslovist' Ukrainy*, 2010, **2**, 29–30.
23. **Grinenko, I. G., Grusheckij, R. I., Homichak, L. M.** Nekotorye zakonomernosti obrazovaniya inulinovykh gelej. *Sahar: Nauchno-tehnicheskij i proizvodstvennyj zhurnal*, 2014, **11**, 54–55.
24. **Shebershneva, N. N.** Ispol'zovanie rikogelja 8100 v proizvodstve zhelejnego marmelada. *Konditerskoe proizvodstvo*, 2013, **6**, 15–16.
25. **Ignatova, T. A., Podkorytova, A. V.** Ispol'zovanie gidrogelej karraginanov v tehnologii zhelejnnykh produktov. *Aktual'nye problemy osvoeniya biologicheskikh resursov mirovogo okeana: materialy III Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. v 2 chastjah*. Vladivostok: Dal'rybvuz, 2014, 58–63.
26. **Tejmurova, A. T.** Rozrobka tehnologij zhelejnoj produkciji z vykorystannjam koncentrativ tvarynnykh bilkiv: avtoref. dys. kand. texn. nauk. Xarkiv: Xarkivskij derzavnyj universytet xarčuvannja ta torhivli, 2010, 18.
27. **Osipov, A.** Pektiny i karraginy dlja konditerskix izdelij. *Novye vozmozhnosti tradicijnykh ingredientov. Konditerskoe proizvodstvo*, 2012, **5**, 18–19.
28. **Marenkova, T. I.** Patent 94598 UA, MPK A23L 1/00. Sposib otrymannja marmeladu zhelejnoho formovoho na kappa-karaginanah z jakisno zminenyj funkcionāl'no-texnologichnyj vlastyvostjamy, 2014. Bjul. 22, 6.
29. **Artamonova, M. V., Ly'syuk, G. M., Tuz, N. F.** Tehnologiya marmeladu zhelejnoho z vy`kory`stannjam kriasporoshkiv rosly`nnoho pochodzhennja: monografiya. Xarkiv: XDUXT, 2015, 134.
30. **Ovsjannikova, L. G.** Ispol'zovanie kislykh polisaharidov dlja sokrashhenija rashoda studneobrazovatelej iz krasnykh morskikh vodorostej. *Sbornik materialov nauch.-tehn. konferencii «Progressivnye tehnologii i oborudovanie pishhevyykh proizvodstv»*. SPb: GAHPT, 1999, 183.
31. **Evaleva, V. V., Cherpilova, T. M., Nikiforova, T. A.** Laktatsoderzhashhie pishhevye dobavki i marmelad funkcionāl'nogo naznachenija. *Konditerskoe proizvodstvo*, 2013, **6**, 13–16.
32. **Sviridov, V. V., Bannikova, A. V., Ptichkina, N. M.** Vlijanie prirody studneobrazovatelja na svojstva pishhevyykh studnej. *Izvestija vuzov. Pishhevaja tehnologija*, 2012, **1**, 59–61.
33. **Shehovcova, T. G., Sidorenko, Ju. I.** Razrabotka tehnologii zhelejnego marmelada s zadannymi potrebitel'skimi svojstvami. *Hranenie i pererabotka sel'hozsyr'ja*, 2008, **8**, 65–67.
34. Reotest: instrukcija po jekspluatacii. GDR, 1978.
35. **Kosoj, V. D., Vinogradov, Ja. I., Malyshev, A. D.** Inzhenernaja reologija biotehnologicheskix sred. SPb.: GIORD, 2005, 648.
36. **Zolotareva, L. A., Avetesjan, K. V.** Strukuroobrazovatel i prochnostnye svojstva zhelejnnykh izdelij. *Hlibopekars'ka i konditers'ka promyslovist' Ukraini*, 2007, **4**, 40–41.
37. **Ajmeson, A.** Pishhevye zagustiteli, stabilizatory, geleobrazovatel / per. S. V. Makarova. SPb.: ID «Professija», 2012, 408.
38. **Golubev, V. N., Beglov, S. Ju., Podzhuev, A. V.** Funkcionāl'nye svojstva pektinov i krahmala. *Pishhevye ingrediency. Syr'e i dobavki*, 2000, **1**, 14–18.
39. **Mazur, L. M., Olehnovich, A. A.** Fiziko-himicheskie processy geleobrazovaniya pektinov v pishhevyykh tehnologijah. *Sahar*, 2014, **1**, 2–5.
40. **Karnaushenko, L. I., Pogonceva, Je. I., Chmyr', A. D.** Reologicheskie svojstva zhelejnnykh mass. *Konditerskaja i hlibopekarnaja promyshlennost'*, 1981, **3**, 41–42.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Iryna Tsykhanovska** – Candidate of Chemical Sciences, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Associate Professor of the Food and Chemical Technologies Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9713-9257; e-mail: Cikhanovskaja@gmail.com.

**Цихановська Ірина Василівна** – кандидат хімічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри харчових та хімічних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-9713-9257; e-mail: Cikhanovskaja@gmail.com.

**Viktoriia Yevlash** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Professor, Head of the Chemistry, Microbiology and Food Hygiene Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7479-1288, e-mail: evlashvv@gmail.com.

**Євлаш Вікторія Владленівна** – доктор технічних наук, професор, Харківський державний університет харчування та торгівлі, професор, завдувач кафедри хімії, мікробіології та гігієни харчування, м.Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7479-1288, e-mail: evlashvv@gmail.com.

**Barna Khamitova** – Candidate of Technical Sciences, M. Auezov South Kazakhstan State University, Associate Professor of Technology and Food Safety Department, Shymkent, Kazakhstan, ORCID: 0000-0002-4435-3345, e-mail: barno\_007@mail.ru.

**Хамітова Барна Махаметовна** – кандидат технічних наук, Південно-Казахстанський державний університет ім. М. Ауезова, доцент кафедри технології та безпеки харчових продуктів, м. Шимкент, Казахстан, ORCID: 0000-0002-4435-3345, e-mail: barno\_007@mail.ru.

**Klara Urazbaieva** – Candidate of Technical Sciences, M. Auezov South Kazakhstan State University, Associate Professor, Head of the Food Engineering Department, Shymkent, Kazakhstan, ORCID: 0000-0002-6922-5940, e-mail: klara\_abdrzak@mail.ru.

**Уразбаєва Клара Абдирахмановна** – кандидат хімічних наук, Південно-Казахстанський державний університет ім. М. Ауезова, доцент, завдувач кафедри харчова інженерія, м. Шимкент, Казахстан, ORCID: 0000-0002-6922-5940, e-mail: klara\_abdrzak@mail.ru.

**Oleksandr Aleksandrov** – Candidate of Chemical Sciences, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Associate Professor, Food and Chemical Technology Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3592-285X; e-mail: alexandrov.a.v.a.v@gmail.com.

**Александров Олександр Валентинович** – кандидат хімічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент завдувач кафедри харчових та хімічних технологій; м.Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-3592-285X; e-mail: alexandrov.a.v.a.v@gmail.com.

**Nataliia Kaida** – Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Assistant Professor of Food and Chemical Technology; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6856-8247; e-mail: karonac@gmail.com.

**Кайда Наталія Сергіївна** – Українська інженерно-педагогічна академія, асистент кафедри харчових та хімічних технологій; м.Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6856-8247; e-mail: karonac@gmail.com.

*Please cite this article as:*

**Tsykhanovska, I., Yevlash, V., Khamitova, B., Urazbaieva, K., Aleksandrov, O., Kaida, N.** Influence of the “magnetofood” food supplement on the structural and mechanical properties of molded fruit jelly with various structure-forming agents. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2019, **5** (1330), 175–186, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.23.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Цихановська, І. В.** Вплив харчової добавки “магнетофуд” на структурно-механічні властивості формового желейного мармеладу з різними структуроутворювачами / **І. В. Цихановська, В. В. Євлаш, Б. М. Хамітова, К. А. Уразбаєва, О. В. Александров, Н. С. Кайда** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 175–186. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.23.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Цихановская, И. В.** Влияние пищевой добавки “магнетофуд” на структурно-механические свойства формового желейного мармелада с разными структурообразователями / **И. В. Цихановская, В. В. Евлаш, Б. М. Хамитова, К. А. Уразбаева, А. В. Александров, Н. С. Кайда** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 175–186. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.23.

**АННОТАЦІЯ** Одной из актуальных проблем современной кондитерской промышленности является разработка ресурсо- и энергосберегающих технологий для производства высококачественных мармеладо-пастильных изделий с увеличенным сроком годности. Предлагается использование минеральной пищевой добавки “Магнетофуд”, которая обладает высоким функционально-технологическим потенциалом и может как самостоятельно формировать структурно-механические свойства желейных масс, так и влиять на гелеобразователь, вступая с ним в химические и электростатические взаимодействия. Поэтому, пищевая добавка “Магнетофуд” может влиять сразу на несколько технологических свойств в пищевой желейной системе: быть стабилизатором, загустителем, студнеобразователем, при этом улучшая качество, потребительские свойства и продляя сроки хранения формового желейного мармелада. Целью исследования является улучшение структурно-механических свойств формового желейного мармелада путем введения пищевой добавки “Магнетофуд”. Во время проведения структурно-механических (вязкостных и тиксотропных) характеристик на ротационном вискозиметре реотест-2, прочности на пенетрометры AP-4/1 исследований были использованы общепринятые и стандартные методики. Установлено, что введение пищевой добавки “Магнетофуд” в желейные массы в количестве 0,15% к массе сырья улучшает консистенцию, структуру, прочность и форму: повышается степень структурирования и вязкость желейных масс во всем диапазоне напряжения сдвига ( $1,5-40 \text{ c}^{-1}$ ) в 2,9 раза – для масс на агаре и в 1,85 раз – для масс на пектине; замедляется влияние температуры на эффективную вязкость желейных масс в среднем на (50-75) Па·с, а также процессы разрушения в 1,1 раза и ускоряются процессы восстановления желейной структуры после прекращения механического воздействия на 3,8%, повышая её способность к тиксотропии на 7,5% в желейных массах на агаре и на 6,0% – на пектине; увеличивается прочность студня на агаре на (10-12)%, на пектине – на (7-9)%; возрастает скорость структурирования желейных масс на агаре в 1,3-1,7 раз, а на пектине в 1,1-1,6 раз.

**Ключевые слова:** желейный мармелад; желейные массы; пищевая добавка “Магнетофуд”; структурно-механические свойства

*Поступила (received) 16.02.2019*

УДК 004.942:615.224: 678.016

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.24

## РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЧНЫХ ТАБЛЕТОК С ЗАДАНЫМ ВРЕМЕНЕМ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ ИЗОСОРБИДА ДИНИТРАТА МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. А. ЧЕРНЫЙ<sup>1\*</sup>, С. А. КОНДРАТОВ<sup>2</sup>, Д. С. ОЛЕЙНИКОВ<sup>1</sup>, Р. П. САВЯК<sup>1</sup>

<sup>1</sup> отдел фармацевтической разработки, ООО НПФ "Микрохим", Рубежное, УКРАИНА

<sup>2</sup> кафедра высшей математики и компьютерной технологии, Институт химических технологий Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля, Рубежное, УКРАИНА

\*e-mail: chornyi@microkhim.com

**АННОТАЦИЯ** Изучена кинетика высвобождения изосорбида динитрата из покрытых и непокрытых гранул диаметром 0,5–0,8 мм и 0,8–1,25 мм, используемых для приготовления матричных таблеток. Проведен статистический анализ полученных результатов. Для одного и того же значения времени и разных значений pH рассчитано средние значения высвобождения и эмпирические значения критерия Шапиро–Уилка. Для набора серий при одном и том же времени и разных pH рассчитаны эмпирические значения критерия Кохрена и непараметрического критерия Краскелла–Уоллиса с учетом повторяющихся групп и поправкой Имана–Дэвенпорта на количество элементов в выборке. Установлено слабое влияние pH на кинетику высвобождения. При моделировании высвобождения из таблеток на основе гранул использованы характеристики нормального распределения для каждого из типов гранул и каждого значения времени. Рассчитано количество каждого типа гранул, входящего в состав ядра таблеток, для достижения желательного профиля высвобождения в среде Excel с использованием надстройки «Поиск решения». Для средних значений высвобождения для гранул трех типов методом наименьших квадратов получены значения масс суммарного содержания изосорбида динитрата. Для экспериментальной проверки модели разработана партия матричных таблеток с использованием покрытых и непокрытых гранул диаметром 0,5–0,8 мм. Проведено исследование кинетики высвобождения изосорбида динитрата из таблеток при pH 1,2; 4,5; 6,8. Проведены статистический анализ полученных данных и сравнение результатов с расчетами по модели. Установлено, что использованный подход позволяет с приемлемой точностью описать высвобождение изосорбида динитрата из таблеток. Установлен критерий точности – попадание экспериментального профиля высвобождения разработанной композиции в границы между максимальным и минимальным желательным профилем. В результате проведенных исследований разработан композиционный препарат пролонгированного действия «Дикор Лонг» на основе изосорбида динитрата. Препарат прошел государственные испытания, в ООО НПФ «Микрохим» налажен его промышленный выпуск.

**Ключевые слова:** изосорбида динитрат; матричные таблетки; гранулы; статистический анализ; кинетика высвобождения; математическое моделирование

## DEVELOPMENT COMPOSITE POLYMER MATRIX TABLETS WITH A PRESET TIME OF ISOSORBIDE DINITRATE RELEASE BY THE METHOD OF MATHEMATICAL MODELING

A. CHORNYI<sup>1</sup>, S. KONDRATOV<sup>2</sup>, D. OLEYNIKOV<sup>1</sup>, R. SAVYAK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pharmaceutical Development Department, Research and Production Company "Microkhim", Rubizhne, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of mathematics and computer technologies, Institute of Chemical Technology Volodymyr Dahl's East Ukrainian National University, Rubizhne, UKRAINE

**ABSTRACT** The kinetics of release of isosorbide dinitrate from coated and uncoated granules with a diameter of 0.5–0.8 mm and 0.8–1.25 mm used for the preparation of matrix tablets was studied. A statistical analysis of the results is made. For the same time value and different pH values, the mean values of release and empirical values of the Shapiro – Wilk criterion were calculated. For a series of series at the same time and different pH, the empirical values of the Cochren test and the non-parametric Cruskell – Wallis test are calculated considering the repeating groups and the Iman – Davenport correction for the number of elements in the sample. A low pH effect on release kinetics has been established. When modeling the release of pellet-based tablets, the characteristics of the normal distribution for each of the granule types and each time value are used. The amount of each type of granules that make up the tablet core is calculated to achieve the desired release profile in Excel using the Search Solver add-in. For the mean values of release for the granules of three types by the least square's method, we obtained the mass values of the total content of isosorbide dinitrate. For experimental verification of the model, a batch of matrix tablets was prepared using coated and uncoated granules with a diameter of 0.5–0.8 mm. A study of the kinetics of release of isosorbide dinitrate from tablets at pH 1.2; 4.5; 6.8. A statistical analysis of the obtained data and a comparison of the results with calculations by the model were carried out. It has been established that the approach used makes it possible to describe the release of isosorbide dinitrate from tablets with an acceptable accuracy. The accuracy criterion is established - the experimental profile of release of the developed composition falls within the boundaries between the maximum and minimum desired profile. As a result of the research, a composite drug of prolonged action Dikor Long

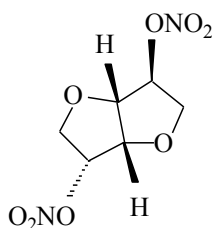
based on isosorbide dinitrate has been developed. The drug has passed state tests, its industrial production has been adjusted in Research and Production Company "Microkhim".

**Keywords:** isosorbide dinitrate; matrix tablets; granules; statistical analysis; release kinetics; math modeling

## Введение

В настоящее время ишемическая болезнь сердца (ИБС) является одной из основных причин смерти в развитых странах. Наряду с профилактическими мерами по предотвращению ИБС, актуальной проблемой является разработка новых подходов к лечению, новых эффективных лекарственных средств. Лечение ИБС направлено на предотвращении приступов и риска развития осложнений и предусматривает прием антиишемических препаратов, нитратов, бета-адреноблокаторов, блокаторов кальциевых каналов, статинов, антиагрегантов и др. [1].

Начиная с 1879 г., в лечении ИБС с успехом применяют нитроэфиры: нитроглицерин, изосорбида моно- и динитраты и др., эффект которых обусловлен образованием оксида азота (NO) [2–4]. Благодаря этому нитраты являются эффективными средствами для предотвращения и купирования приступов стенокардии [5,6]. Среди них в последние годы с успехом используют препараты на основе изосорбида динитрата (ИСДН), имеющего следующую структурную формулу:



Актуальной проблемой является разработка лекарственных форм с контролируемым высвобождением препарата в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ). Применение препаратов такого типа позволяет поддерживать в крови эффективные концентрации препаратов без проявления пиковых участков концентраций за счет частого приема таблеток. В настоящее время одним из наиболее перспективных методов разработки препаратов с контролируемым высвобождением является использование матричных гранул и таблеток [7,8].

Матричные таблетки получают прямым прессованием смесей лекарственных препаратов и вспомогательных веществ, подвергнутых предварительной грануляции [8]. Профиль высвобождения лекарственного средства из гранул регулируется путем подбора матрицеобразующего полимера, размера гранул, наличия покрытия гранул [9,10]. С этой точки зрения матричные таблетки можно рассматривать, как своеобразные композитные материалы, для которых также характерна матричная

структура и наличие поверхностей раздела между компонентами [11]. Среди матрицеобразующих полимеров наиболее универсальными являются эудражиты – продукты сополимеризации этилакрилата и метилметакрилата, скорость набухания которых не зависит от pH [9].

Матрица медленно набухает в содержимом желудочно-кишечного тракта и выводится из организма естественным путем в виде пористой массы. Набухающая, но не разрушающаяся матрица является ограничивающим и регулирующим фактором поступления жидкости внутрь таблетки и выделения раствора с препаратом в окружающую ее среду. Матричные таблетки высвобождают лекарственный препарат посредством диффузии раствора через барьерные мембраны и, частично, через микрокапилляры [8].

Проблемой при проектировании и создании матричных таблеток является подбор состава гранул для обеспечения профиля высвобождения, наиболее близкого к заданному. Современный подход к разрешению таких проблем заключается в разработке и использовании математических моделей.

В настоящее время в области моделирования процессов высвобождения разрабатываются математические модели, описывающие механизмы диффузии, эрозия и деградация матрицеобразующего полимера. Можно выделить следующие типы моделей: диффузионно-контролируемые модели [12]; модели на основе растворения полимера [13]; модели на основе эрозии [14,15]; модели для многокомпонентных систем – учитывают несколько стадий – высвобождение, диффузию и деградацию [16]. Эти модели обычно описываются сложными системами дифференциальных уравнений и содержат параметры, которые трудно или невозможно определить независимым экспериментальным путем, например, коэффициенты диффузии из гранул внутри таблетки в условиях сред ЖКТ. Поэтому такие модели хороши для понимания сущности и механизма пролонгированного действия лекарственных средств, но мало приспособлены для решения практических задач.

## Цель работы

Базовая идея настоящей работы заключается в использовании для производства таблеток композитного препарата пролонгированного действия нескольких составляющих с разной скоростью высвобождения. Такими компонентами могут быть два типа гранул: матричные непокрытые для сравнительно быстрого высвобождения (приготовлены грануляцией смеси матричной основы, ИСДН и наполнителя) и покрытые для более

медленного высвобождения препарата (поверхность гранул дополнительно покрыта слоем эудражита).

Целью настоящей работы является разработка экспериментально-статистической модели для подбора состава таких матричных таблеток с профилем высвобождения ИСДН, максимально близким к заданному, на основе выявления статистических закономерностей высвобождения препарата из гранул при разных значениях pH буферных растворов, имитирующих разные разделы ЖКТ.

### Экспериментальная часть

Исходными веществами служили: субстанция изосорбида динитрата производства ООО НПФ «Микрохим», Украина, полимер EUDRAGIT® NE 30 D (30 %-ная водная дисперсия) производства Evonik Health Care, Германия, инертные компоненты: микрокристаллическая целлюлоза (JRS Pharma, Германия) и лактоза (Alpavit, Германия). Все компоненты были фармакопейного качества.

**Получение непокрытых гранул:** в водную дисперсию полимера EUDRAGIT® NE 30 D (15 % масс.) диспергировали изосорбида динитрат (40 % масс.) в смесителе Kenwood KM070. Полученную дисперсию добавляли в микрокристаллическую целлюлозу (45 % масс.). Полученную смесь перемешивали в течение 20 минут. Влажную массу экструдировали на грануляторе НГ-12 с диаметром отверстий 1,5 мм. Полученные гранулы сферонизировали на сферонизаторе с рифленным диском диаметром 320 мм и шагом рифления 2 мм, при скорости вращения диска 2000 об./мин (производства ООО НПФ «Микрохим», Украина) с последующей сушкой в сушильном шкафу СП-100С при 30 °С. Путем калибрования получали гранулы сферической формы размерами 0,5-0,8 мм и 0,8-1,25 мм

**Получение покрытых гранул:** на непокрытые гранулы размерами 0,5-0,8 мм наносили пленочное покрытие (8 % масс. от начальной массы гранул) путем распыления 30 %-ной дисперсии EUDRAGIT® NE 30 D в воде, с одновременным высушиванием в токе горячего воздуха (40 °С) в сферонизаторе производства ООО НПФ "Микрохим", Украина.

**Получение таблеток.** Непокрытые гранулы (25 % масс.), покрытые гранулы (27 % масс.) и лактозу (48 % масс.) смешивали и прессовали в двояковыпуклые таблетки на гидравлическом прессе ПГР-10 при давлении 10 атм. Диаметр таблеток 7 мм, масса 100 мг.

**Изучение кинетики высвобождения ИСДН** из гранул и таблеток проводили по методике теста «Растворение» в соответствии с требованиями Государственной Фармакопеи Украины [17]. Исследования проводили в аппарате Pharma Test PT DT-70, перемешивающее устройство – лопасть, 75 об/мин. Среды растворения – стандартные водные

буферные растворы с pH 1,2; 4,5; 6,8. Объем среды 1000 мл.

Количество ИСДН, перешедшее в раствор, определяли методом ВЭЖХ, хроматограф SHIMADZU LC-2010 СНТ с УФ-детектором, колонка Zorbax SB-C18 4,6 мм × 150 мм × 5 мкм, подвижная фаза: смесь метанол (55 % об.) – вода (35 % об.) – ацетатный буфер с pH=4,7 (10 % об.).

### Анализ данных по высвобождению ИСДН из гранул

На первом этапе исследований было проведено изучение кинетики высвобождения ИСДН из компонентов матричных таблеток – покрытых и непокрытых гранул препарата и проведен статистический анализ полученных результатов. Все исследования проводили в диапазоне времени высвобождения от 1 до 12 часов при pH водной фазы 1,2; 4,5 и 6,8, что имитирует кислотность среды в желудке, тонком и толстом кишечнике и общее время пребывания в ЖКТ [17]. Целью этих исследований было установления наличия или отсутствия влияния pH среды на кинетику высвобождения.

Измерения в каждый момент времени при каждом значении pH дублировали 12 раз. Полученные данные подвергали статистической обработке: для одного и того же значения времени и разных значений pH рассчитывали средние значения высвобождения (в % от содержания ИСДН в гранулах, которое составляло 100 мг), среднее квадратическое отклонение (СКО). Далее для каждой серии параллельных измерений при одном и том же значении pH и времени выдержки рассчитывали эмпирические значения критерия Шапиро–Уилка [18] для проверки гипотезы о нормальном распределении. После этого для набора серий при одном и том же времени и разных pH рассчитывали эмпирические значения:

- критерия Кохрена [18,19] для проверки однородности дисперсий;
- непараметрического критерия Краскелла–Уоллиса с учетом повторяющихся групп и поправкой Имана–Дэвенпорта на количество элементов в выборке [20] для проверки гипотезы об отсутствии смещения в средних характеристиках (медианах) каждой выборки (гипотезу однородности выборок).

Результаты статистических расчетов для каждого типа гранул приведены в табл. 1–3. В таблицах 1–3 также приведены критические значения каждого из критериев для уровня значимости  $\alpha = 0,05$ , заимствованные из литературы [18,20] или рассчитанные с помощью статистических функций Excel [19]. Как следует из этих результатов, для большинства серий эмпирическое значение критерия Шапиро–Уилка превышает критическое, что позволяет принять гипотезу о наличии нормального распределения. Этот критерий является одним из

наиболее эффективных для проверки наличия нормального распределения в выборках [18].

Однако в большинстве случаев проверка однородности дисперсий по сериям при разных значениях рН по критерию Кохрена дает отрицательные результаты: практически во всех случаях эмпирическое значение этого критерия оказывается выше критического, что вынуждает отвергнуть гипотезу однородности. Сопоставление отдельных выборок друг с другом выявило, что серии при рН 1,2 и 4,5 с помощью критериев Фишера об однородности дисперсий [21] и Крамера–Уэлча о равенстве средних [22] выявило следующие закономерности:

– во всех случаях средняя степень высвобождения ИСДН и среднеквадратичное отклонение при рН 6,8 оказывались на несколько процентов выше, чем при рН 1,2 и 4,5;

– для пар (рН 1,2) – (рН 4,5) во всех случаях принимались гипотезы об однородности дисперсий и равенстве средних значений

– для выборок (рН 1,2) – (рН 6,8) и (рН 4,5) – (рН 6,8) в 80 процентах случаев дисперсии были

однородными, однако примерно в 50 % случаев отвергалась гипотеза о равенстве средних.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. В целом, на уровне невысоких значений СКО, значения степени высвобождения ИСДН из гранул при разных рН с точки зрения статистики нельзя считать однородными. По-видимому, причиной неоднородности являются отмеченные особенности высвобождения при рН 6,8. Однако, в целом, влияние рН на степень высвобождения оказывается слабым (табл. 1–3). Поэтому в первом приближении можно пренебречь различиями и считать, что рН не влияет на скорость высвобождения ИСДН из гранул различного типа.

Отметим, что из 17 серий при одинаковых рН и разных значениях времени и типов гранул только в 3 случаях наблюдалась неоднородность в рамках непараметрического критерия Краскела–Уиллиса, с помощью которого проверяется гипотеза о равенстве медиан [18, 20]. Это также служит доводом в пользу пренебрежения влиянием рН. При этом, очевидно, наблюдаются сильные различия для разных типов гранул (табл. 1–3).

Таблица 1 – Статистические характеристики кинетики высвобождения ИСДН из покрытых таблеток диаметром 0,5–0,8 мм. В круглых скобках приведены теоретические значения критериев при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и число степеней свободы. Для критерия Краскела–Уоллиса количество групп 3, количество элементов в группах: 12

Время, ч	рН	Степень высвобождения, %		Эмпирические значения критериев			Объединенные выборки		
		Среднее	СКО	Шапиро–Уилка (0,859; 12)	Кохрена (0,3482; 3; 11)	Краскела–Уоллеса (6,281)	Среднее	СКО	Шапиро–Уилка (0,935; 36)
1	1,2	15,0	0,9	0,984	0,347	12,63	15,1	1,1	0,995
	4,5	14,5	0,9	0,942					
	6,8	15,9	0,9	0,975					
2	1,2	29,0	2,0	0,86	0,478	2,7	29	2,6	0,934
	4,5	28,2	2,6	0,89					
	6,8	29,7	3,2	0,908					
4	1,2	48,8	3,7	0,809	0,521	2,08	49,5	3,9	0,942
	4,5	49,3	2,9	0,9					
	6,8	50,5	4,9	0,879					
6	1,2	62,5	3,1	0,925	0,471	3,81	62,8	4	0,962
	4,5	61,4	3,8	0,928					
	6,8	64,6	4,6	0,932					
8	1,2	73,8	3,2	0,856	0,456	2,98	73,7	4,3	0,966
	4,5	71,8	4,3	0,948					
	6,8	75,4	4,9	0,932					
10	1,2	83,3	3,1	0,918	0,419	3,21	83,2	4,1	0,956
	4,5	81,6	4,2	0,936					
	6,8	84,7	4,4	0,936					
12	1,2	91,3	3,4	0,894	0,409	2,64	91,1	3,8	0,935
	4,5	89,8	3,8	0,971					
	6,8	92,1	4,2	0,862					



Таблица 2 – Статистические характеристики кинетики высвобождения ИСДН из непокрытых таблеток диаметром 0,5–0,8 мм. В круглых скобках приведены теоретические значения критериев при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и число степеней свободы. Для критерия Краскела–Уоллеса количество групп 3, количество элементов в группах: 12

Время, ч	pH	Степень высвобождения, %		Эмпирические значения критериев			Объединенные выборки		
		Среднее	СКО	Шапиро–Уилка (0,859; 12)	Кохрена (0,3482; 3; 11)	Краскела–Уоллеса (6,281; 12; 3)	Среднее	СКО	Шапиро–Уилка (0,935; 36)
1	1,2	46,3	4,4	0,822	0,485	7,017	48,5	4,6	0,967
	4,5	48,1	3,0	0,854					
	6,8	51,1	5,1	0,906					
2	1,2	61,5	3,2	0,949	0,506	5,911	62,5	4,5	0,966
	4,5	60,8	3,9	0,922					
	6,8	65,3	5,1	0,927					
4	1,2	81,7	3,4	0,937	0,485	5,112	82,3	4,4	0,969
	4,5	80,4	3,9	0,939					
	6,8	84,7	5,0	0,907					
6	1,2	96,0	26,5	0,952	0,349	9,761	96,6	3,7	0,952
	4,5	95,0	25,3	0,79					
	6,8	99,0	25,8	0,807					

Таблица 3 – Статистические характеристики кинетики высвобождения ИСДН из непокрытых таблеток диаметром 0,8–1,25 мм. В круглых скобках приведены теоретические значения критериев при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и число степеней свободы. Для критерия Краскела–Уоллеса количество групп 3, количество элементов в группах: 12

Время, ч	pH	Степень высвобождения, %		Эмпирические значения критериев			Объединенные выборки		
		Среднее	СКО	Шапиро–Уилка (0,859; 12)	Кохрена (0,3482; 3; 11)	Краскела–Уоллеса (6,281; 12; 3)	Среднее	СКО	Шапиро–Уилка (0,935; 36)
1	1,2	28,0	2,9	0,843	0,389	2,38	29,1	2,7	0,945
	4,5	29,2	1,9	0,822					
	6,8	30,0	2,9	0,98					
2	1,2	48,4	2,8	0,925	0,609	1,16	49,5	3,2	0,967
	4,5	49,8	2,0	0,94					
	6,8	50,2	4,3	0,896					
4	1,2	74,2	2,7	0,871	0,5	1,04	74,6	3,6	0,951
	4,5	73,9	3,4	0,843					
	6,8	75,8	4,4	0,946					
6	1,2	83,3	3,1	0,894	0,502	1,11	83,9	3,1	0,958
	4,5	83,5	2,3	0,995					
	6,8	85,1	3,9	0,93					
8	1,2	91,6	3,3	0,852	0,39	0,69	92,3	3,3	0,91
	4,5	92,5	2,8	0,874					
	6,8	92,7	3,3	0,931					
10	1,2	96,3	3,7	0,88	0,428	3,67	97,8	3,5	0,956
	4,5	97,7	2,3	0,863					
	6,8	99,4	3,8	0,987					

Таблица 4 – Желательный профиль высвобождения ИСДН в препарате пролонгированного действия

Время, ч	0	1	2	4	6	8	10	12
Нижний предел высвобождения, %	0	20	40	55	70	75	80	90
Верхний предел высвобождения, %	0	40	60	75	90	95	100	100
Средний профиль, %	0	30	50	65	80	85	90	95

**Анализ объединенных выборок**

Учитывая слабое влияние рН на кинетику высвобождения, мы объединили выборки при разных рН для каждого значения времени и проанализировали полученные объединенные выборки. Результаты представлены в табл. 1–3. Как следует из этих данных, средние значения и СКО для объединенных выборок оказываются близкими к соответствующим значениям исходных выборок. Проверка гипотезы соответствия распределения объединенных выборок нормальному распределению по критерию Шапиро–Уилка показало, что для 15 выборок из 17 эту гипотезу можно принять для уровня значимости 0,05, а для двух других – на уровне значимости 0,01–0,02. Поэтому далее при моделировании высвобождения из таблеток на основе гранул использовали характеристики нормального распределения для каждого из типов гранул и каждого значения времени.

**Математическое моделирование состава таблеток с заданным профилем высвобождения ИСДН**

При составлении модели исходили из следующих допущений:

- а) гранулы разных типов высвобождают ИСДН независимо друг от друга;
- б) кинетика высвобождения ИСДН из гранул одного типа в составе таблеток такая же, как для свободных гранул.

Модели строили в расчете на высвобождение суммарного количества ИСДН в количестве 100 мг, входящего в состав гранул. Тогда полученные результаты численно равны доле высвободившегося препарата в % в каждый момент времени. Исходя из массовой доли ИСДН в составе каждого типа гранул и дозировки субстанции в мг, можно рассчитать количество каждого типа гранул, входящего в состав ядра таблеток.

Для составления модели необходимо задать желательный профиль высвобождения в виде табличной зависимости степени высвобождения препарата от времени, в пределах от 0 до 12–14 часов (среднее полное время пребывания желудочно-кишечном тракте человека лекарственных средств от момента введения до выведения). По опыту практического применения изосорбида динитрата в медицинской практике, для препарата пролонгированного действия был предложен профиль высвобождения, представленный в табл. 4. Данные представлены в виде желательного нижнего и верхнего предела высвобождения ИСДН, по которым

был рассчитан средний профиль. Расчет состава проводили по среднему профилю.

Рассмотрим модель в общем виде. Пусть профиль состоит из  $N$  точек времени  $t_1, t_2, \dots, t_N$ , а композиция препарата состоит из  $r$  типов гранул. При этом  $r < N$ . Каждый тип гранул содержит  $m_i$  мг субстанции ИСДН ( $i = 1, 2, \dots, r$ ) и высвобождает  $\pi_{ji}$  % масс. ИСДН за время  $t_j$ . Тогда суммарное количество ИСДН ( $M_j$ ), мг, выделившееся за время  $t_j$  из гранул всех типов составит:

$$M_j = \frac{\sum_{i=1}^r \pi_{ji} m_i}{100} \tag{1}$$

Это количество численно равно массовой доле выделившегося ИСДН в расчете на суммарное содержание 100 мг. Тогда для подбора профиля ИСДН для каждого типа гранул следует решать переопределенную систему из  $N$  линейных уравнений:

$$\frac{\sum_{i=1}^r \pi_{ji} m_i}{100} - P_j = 0, \quad (j = 1, \dots, N) \tag{2}$$

где  $P_j$  – среднее значение степени высвобождения в точке  $t_j$  желательного профиля.

Эту систему можно решать методом наименьших квадратов, как оптимизационную задачу:

$$\sum_{j=1}^N \left[ \frac{\sum_{i=1}^r \pi_{ji} m_i}{100} - P_j \right]^2 \rightarrow \min \tag{3}$$

Для получения решений  $m_1, \dots, m_r$ , имеющих физический смысл, на решения надо наложить дополнительные ограничения в виде равенства:

$$\sum_{i=1}^r m_i = 100 \tag{4}$$

и  $r$  неравенств:

$$m_i \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, r \tag{5}$$

Рассмотренная задача без дополнительной формализации может быть решена в среде Excel с использованием надстройки «Поиск решения». В результате получается вектор значений масс ИСДН в гранулах каждого типа, описывающего оптимальный профиль, наиболее близкий к желательному профилю (в смысле метода наименьших квадратов).

Используя этот метод для средних значений высвобождения для гранул трех типов (табл. 1–3), методом наименьших квадратов получены следующие значения масс на 100 мг суммарного содержания ИСДН:

- масса ИСДН из покрытых гранул диаметром 0,5–0,8 мм – 50,3 мг;
- масса ИСДН из непокрытых гранул диаметром 0,5–0,8 мм – 49,7 мг;
- масса ИСДН из непокрытых гранул диаметром 0,8–1,25 мм – 0 мг.

Это указывает, что для построения оптимального профиля в данном случае достаточно двух типов данных.

### Экспериментальная проверка модели

Для экспериментальной проверки модели была наработана партия матричных таблеток с использованием покрытых и непокрытых гранул диаметром 0,5–0,8 мм. Масса ИСДН в каждом типе гранул была одинакова и составляла 10 мг. Проведено исследование кинетики высвобождения ИСДН из таблеток по методике, описанной выше, при pH 1,2; 4,5; 6,8. В каждой точке времени проводили 12 параллельных определений степени высвобождения. Далее провели статистический анализ полученных данных и сравнение результатов с расчетами по модели.

Статистический анализ результатов высвобождения ИСДН из таблеток проводили по схеме, аналогичной для гранул. При этом были выявлены закономерности, аналогичные описанным для гранул:

а) в большинстве выборок, по критерию Шапиро–Уилка, принимается гипотеза о нормальном распределении;

б) несмотря на близость средних, выборки для одного и того же времени и разных pH, неоднородны по Кохрену. Неоднородность обусловлена статистическими различиями для выборок при pH 6,8 по сравнению с выборками при pH 1,2 и 4,5, которые оказались однородными;

в) в объединенных выборках (для разных pH), по критерию Шапиро–Уилка, принимается гипотеза о нормальном распределении.

Для объединенных выборок получены значения средних, которые сравнили с расчетным (по модели (3–5)) и желательным профилем. Как следует из рис. 1, разница между этими данными невелика: расчетный и экспериментальный профили различаются в пределах среднеквадратической погрешности (2,5–5% абс.). При этом все значения степени высвобождения для экспериментального профиля находятся в заданных пределах.

### Обсуждение результатов

Из изложенных результатов следует, что использованный подход, основанный на всесторонних статистических исследованиях свойств выборок,

характеризующих высвобождение ИСДН во времени, с последующей разработкой математической модели вида (3–5), позволяет с приемлемой точностью описать высвобождение ИСДН из таблеток. Критерием точности в нашем случае является попадание экспериментального профиля высвобождения разработанной композиции в границы между максимальным и минимальным желательным профилем. Эффективность и корректность этого подхода связана со следующими условиями:

1) Наличием нормального распределения (или распределения, близкого к нормальному) выборок результатов параллельных определений высвобождения при каждом значении времени и pH.

2) Независимостью или слабой зависимостью степени высвобождения от pH среды.

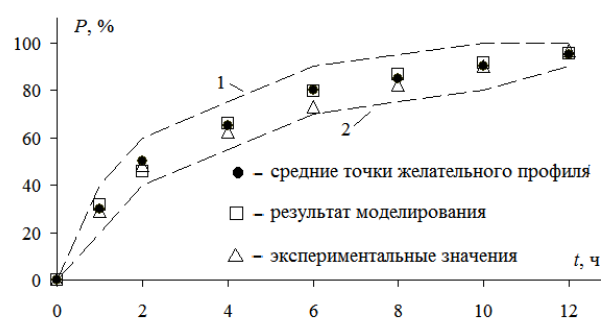


Рис. 1 – Желательный, расчетный и экспериментальный профиль высвобождения ИСДН из таблеток. 1, 2 – верхний и нижний пределы желательного профиля

Первое условие сильно облегчает расчеты по установлению однородности выборок, однако, наличие нормального распределения не является определяющим: в общем случае эту задачу можно решать численным моделированием на компьютере, например, с использованием бутстреп-метода [23–25]. Второе условие является более серьезным. В общем случае разработка модели при pH зависимом высвобождении – это отдельная и более сложная задача. Вместе с тем, при создании препаратов пролонгированного действия, очевидно, важным является равномерное (и замедленное) высвобождение препарата, поэтому в этих случаях следует подбирать композиции полимеров, которые обеспечивают высвобождение, слабо зависящее от pH. Таким образом, разработанный подход может служить методологической основой для создания комбинированных лекарственных препаратов пролонгированного действия.

В результате проведенных исследований был разработан композиционный препарат пролонгированного действия «Дикор» на основе ИСДН. Препарат прошел государственные испытания, в НПФ «Микрохим» (г. Рубежное) налажен его промышленный выпуск и поставка в аптечную сеть Украины.

**Выводы**

1. Исследованы профили высвобождения изосорбида динитрата из гранул различных типов в зависимости от pH, размеров и трех типов гранул, наличия покрытия.

2. На основании статистического анализа показано слабое влияние pH на степень высвобождения в каждый момент времени, что позволяет объединить выборки при разных pH. Показано, что объединенные выборки имеют нормальное распределение, рассчитаны характеристики для каждой точки времени.

3. Разработана аддитивная математическая модель высвобождения ИСДН в виде системы линейных уравнений с ограничениями на значения определяемых параметров. Методом наименьших квадратов определены параметры модели – вклад каждого типа гранул в общую массу препарата, обеспечивающие близость к среднему желательному профилю высвобождения, который задается.

4. Экспериментально показано, что предложенный состав таблеток обеспечивает высвобождение препарата с профилем, близким к заданному.

5. В результате проведенных исследований был разработан композиционный препарат пролонгированного действия «Дикор Лонг» на основе ИСДН. Препарат прошел государственные испытания, в НПФ «Микрохим» (г. Рубежное) налажен его промышленный выпуск.

**Список литературы**

- Клінічні рекомендації з діагностики та лікування гострої серцевої недостатності: оновлення 2014 року. Спільні рекомендації Асоціації кардіологів, Асоціації з невідкладної кардіології та Асоціації анестезіологів-реаніматологів України. – УКЖ, 2014; додаток 2.
- Жиляев, Е. В.** Нитраты в лечении стабильной стенокардии: новые горизонты / **Е. В. Жиляев.** // *Медицинское маркетинговое агентство «МедиаМедика»*. – 2010. – №1. – С. 14-18. – doi: 10.26442/2079-5696\_2010.1.14-18.
- Лупанов, В. П.** Терапия нитратами больных хронической ишемической болезнью сердца (вопросы и ответы) / **В. П. Лупанов.** // *Справочник поликлинического врача*. – 2009. – №9. – С. 13-19.
- Привалов, Д. В.** Применение внутривенного нитроглицерина в неотложной кардиологии / **Д. В. Привалов.** // *Фарматека*. – 2003. – №6. – С. 29-32.
- Лупанов, В. П.** Нитраты в лечении больных ишемической болезнью сердца: фокус на изосорбида динитрат / **В. П. Лупанов.** // *Медицинский совет*. – 2015. – №8. – С. 86-90. - doi:10.21518/2079-701X-2015-8-86-90.
- Перепеч, Н. Б.** Нитраты в лечении больных ишемической болезнью сердца / **Н. Б. Перепеч, А. О. Недошивин** // *Пособие для врачей*. – СПб.: НИИ кардиологии МЗ РФ СПб. – 1998. – 23 с.
- Rathbone, M. J.** Modified-release drug delivery technology / **M. J. Rathbone, J. Hadgraft, M. S. Roberts** et al. // *CRC Press*. – 2008. – P. 962. – doi: 10.1201/9780203910337.
- Чуешов, В. И.** Промышленная технология лекарств / **В. И. Чуешов, М. Ю. Чернов, Л. М. Хохлова**. – Харьков: Изд-во НФАУ, 2002. – Т. 2. – 716 с.
- Bölskei, E.** Optimization of preparation of matrix pellets containing Eudragit® NE 30D / **É. Bölskei, G. Regdon, T. Sovány** et al // *Chem Eng Res Des*. – 2012. – № 90. – P. 651-657. – doi: 10.1016/j.cherd.2011.09.005.
- Bryan, M. P.** Stages in spheronisation: evolution of pellet size and shape during spheronisation of microcrystalline cellulose-based paste extrudates / **M. P. Bryan, L. N. Atherton, S. Duffield** et al. // *Powder Technol.* – 2015. – №270. – P. 163-175. – doi: 10.1016/j.powtec.2014.10.014.
- Бондалетова, Л. И.** Полимерные композиционные материалы (Ч.1): учебное пособие / **Л. И. Бондалетова, В. Г. Бондалетов**. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
- Ferrero, C.** Towards elucidation of the drug release mechanism from compressed hydrophilic matrices made of cellulose ethers. II. Evaluation of a possible swelling-controlled drug release mechanism using dimensionless analysis / **C. Ferrero, D. Massuelle, E. Doelker** // *Journal of Controlled Release*. – 2010. – № 2. – P. 223-233. – doi: 10.1016/j.jconrel.2009.09.011.
- Narasimhan, B.** Mathematical models describing polymer dissolution: consequences for drug delivery / **B. Narasimhan.** // *Advanced drug delivery reviews*. – 2001. – №2. – P.195-210. - doi:10.1016/S0169-409X(01)00117-X.
- Hopfenberg, H. B.** Controlled release from erodible slabs, cylinders, and spheres / **H. B. Hopfenberg** // *Controlled release polymeric formulations*. – 1976. – Vol. 33. – P. 26-32. – doi: 10.1021/bk-1976-0033.ch003.
- Karasulu, H. Y.** Modeling of theophylline release from different geometrical erodible tablets / **H. Y. Karasulu, G. Ertan, T. Köse** // *European journal of pharmaceuticals and biopharmaceutics*. – 2000. – Vol. 49. – № 2. – P. 177-182. – doi: 10.1016/S0939-6411(99)00082-X.
- Lao, L. L.** Modeling of drug release from biodegradable polymer blends / **L. L. Lao, S. S. Venkatraman, N. A. Peppas** // *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. – 2008. – Vol. 70. – № 3. – P. 796-803. – doi: 10.1016/j.ejpb.2008.05.024.
- Державна Фармакопея України** [Текст]: в 3 т. / Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів». – 2-е вид. – Харків: Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів», 2015. – Т. 1 – 1126 с.
- Кобзарь, А. И.** Прикладная математическая статистика / **А. И. Кобзарь**. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
- Лапач, С. Н.** Статистические методы в медико-биологических исследованиях с использованием Excel / **С. Н. Лапач, А. В. Чубенко, П. Н. Бабич**. – Киев: Морион, 2001. – 408 с.
- Лагутин, М. Б.** Наглядная математическая статистика / **М. Б. Лагутин**. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 474 с.
- Володарский, Е. Т.** Проверка однородности по критерию Фишера как дополнительный инструмент контроля при проверке условий повторяемости в исследуемых лабораториях / **Е. Т. Володарский, Е. В. Козыр** // *Системы обработки информации*. – 2008. – № 4. – С. 55-58.
- Орлов, А. И.** Проверка статистической гипотезы однородности математических ожиданий двух независимых выборок: критерий Крамера-Уэлча вместо критерия Стьюдента / **А. И. Орлов** //

*Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета.* – 2015. – №. 110(06). – С. 1-22.

23. **Эфрон, Б.** Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа: Сборник статей / **Б. Эфрон.** – М.: Финансы и статистика, 1988. – 263 с.
24. **Шитиков, В. К.** Использование рандомизации и бутстрепа при обработке результатов экологических наблюдений / **В. К. Шитиков** // Принципы экологии. – 2012. – Т. 1. – № 1. – С. 4-24.
25. **Chorny, A.** Development of a bootstrap-model for determining the release of medicinal preparations in the human organism / **A. Chorny, R. Savyak, S. Kondratov** // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2017. – №. 3 (6). – С. 43-49. – doi: 10.15587/1729-4061.2017.102182.

#### References (transliterated)

1. Klinichni rekomendatsiyi z diahnozyky ta likuvannya hostroyi sertsevoyi nedostatnosti: onovlennya 2014 roku. Spil'ni rekomendatsiyi Asotsiatsiyi kardiologiv, Asotsiatsiyi z nevidkladnoyi kardiologiyi ta Asotsiatsiyi anesteziologiv-reanimatologiv Ukrainy. [Clinical recommendations for the diagnosis and treatment of acute heart failure: 2014 update. Joint recommendations of the Association of Cardiologists, the Association for Emergency Cardiology and the Association of Ukrainian Anesthetists and Resuscitation Technicians], UKZH, 2014; dodatok 2.
2. **Zhylyayev, Ye. V.** Nitraty v likuvanni stabil'noyi stenokardiyi: novi horizonty [Nitrates in the treatment of stable angina: new horizons]. Medical marketing agency "Media Medica", 2010, 12, 1, 14-18, doi: 10.26442/2079-5696\_2010.1.14-18.
3. **Lupanov, V. P.** Terapiya nitratomy khvorykh na khronichnu ishemichnu khvorobu sertsya (pytannya i vidpovidi) [Therapy with nitrates of patients with chronic coronary heart disease (questions and answers)]. *Dovidnyk poliklinichnoho likarya [Polyclinic doctor's guide]*, 2009, 9, 13-19.
4. **Pryvalov, D. V.** Zastosuvannya vnutrish'ovennoho nitrohlitserynu v nevidkladnoyi kardiologiyi. *Farmateka*, 2003, 6, 29-32.
5. **Lupanov, V. P.** Nitraty v likuvanni khvorykh na ishemichnu khvorobu sertsya: fokus na yzosorbyda dynytrat. *Medychna rada*, 2015, 8, 86-90, doi: 10.21518/2079-701X-2015-8-86-90.
6. **Perepech, N. B., Nedoshyvin, A. O.** Nitraty v likuvanni khvorykh na ishemichnu khvorobu sertsya [Nitrates in the treatment of patients with coronary heart disease] *Posibnyk d / likariv.* SPb.: NDI kardiologiyi MOZ RF SPb, 1998, 23.
7. **Rathbone, M. J., Hadgraft, J., Roberts, M. S., Lane, M. E.** (Eds.). Modified-release drug delivery technology. *CRC Press*, 2008, 962, doi: 10.1201/9780203910337.
8. **Chuyeshov, V. I., Chernov, M. U., Khokhlova, L. M.** Promyshlennaya tekhnologiya lekarstv [Industrial Drug Technology]. *Uchebnik dlya vuzov*, 2002, 2, 716.
9. **Bölschei E., Regdon G., Sovány T., et al.** Optimization of preparation of matrix pellets containing Eudragit® NE 30D. *Chem Eng Res Des*, 2012, 90, 651-657, doi: 10.1016/j.cherd.2011.09.005.
10. **Bryan, M. P., Atherton, L. N., Duffield, S., et al.** Stages in spheronisation: evolution of pellet size and shape during spheronisation of microcrystalline cellulose-based paste extrudates. *Powder Technol*, 2015, 270, 163-175, doi: 10.1016/j.powtec.2014.10.014.

11. **Bondaletova, L. I., Bondaletov, V. H.** Polimerni kompozytsiyini materialy (chastyna 1): navchal'nyy posibnyk [Polymer Composite Materials (Part 1): Tutorial]. Toms'k: Yzd-vo Toms'koho politekhnichnoho universytetu, 2013, 32-36.
12. **Ferrero, C., Massuelle, D., Doelker, E.** Towards elucidation of the drug release mechanism from compressed hydrophilic matrices made of cellulose ethers. II. Evaluation of a possible swelling-controlled drug release mechanism using dimensionless analysis. *Journal of Controlled Release*, 2010, 141, 2, 223-233, doi: 10.1016/j.jconrel.2009.09.011.
13. **Narasimhan, B.** Mathematical models describing polymer dissolution: consequences for drug delivery. *Advanced drug delivery reviews*, 2001, 48, 2, 195-210, doi: 10.1016/S0169-409X(01)00117-X.
14. **Hopfenberg, H. B.** Controlled release from erodible slabs, cylinders, and spheres. *Controlled release polymeric formulations*, 1976, 33, 26-32, doi: 10.1021/bk-1976-0033.ch003.
15. **Karasulu, H. Y., Ertan, G., Köse, T.** Modeling of theophylline release from different geometrical erodible tablets. *European journal of pharmaceuticals and biopharmaceutics*, 2000, 49, 2, 177-182, doi: 10.1016/S0939-6411(99)00082-X.
16. **Lao, L. L., Venkatraman, S. S., Peppas, N. A.** Modeling of drug release from biodegradable polymer blends. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2008, 70, 3, 796-803, doi: 10.1016/j.ejpb.2008.05.024.
17. **Derzhavna Farmakopeya Ukrainy:** v 3 t. / Derzhavne pidpryyemstvo «Ukrayins'kyi naukovyyi farmakopeynyy tsentr yakosti likars'kikh ZASOBIV» [State Enterprise "Ukrainian Scientific Pharmacopoeial Center for Quality of Medicines"]. – 2-e vyd. – Kharkiv: Derzhavne pidpryyemstvo «Ukrayins'kyi naukovyyi farmakopeynyy tsentr yakosti likars'kikh ZASOBIV», 2015, 1, 1126.
18. **Kobzar, A. I.** Prykladna matematychna statystyka. M: Fyzmatlyt, 2006, 816.
19. **Lapach, S. N., Chubenko, A. V., Babych, P. M.** Statystychni metody v medyko-biologichnykh doslidzhennyakh z vykorystanniam Excel. [Statistical methods in biomedical research using Excel. [Text], Kyiv: Morion, 2001, 408.
20. **Lahutin, M. B.** Naochna matematychna statystyka. M: BYNOM, Laboratoriya znan', 2015, 474.
21. **Volodars'kyi, Ye. T., Kozyr, Ye. V.** Perevirka odnoridnosti za kryteriyem Fishera yak dodatkovyy instrument kontrolyu pry perevirtsi umov povtoryuvanosti v doslidzhuvaniyakh laboratoriyakh. *Systemy obrobky ynfymatsyy*, 2008, 4, 55-58.
22. **Orlov, A. I.** Perevirka statystychnoyi hipotezy odnoridnosti matematychnykh ochikuvan' dvokh nezaleznykh vybirok: kryteriy Kramera-Uelcha zamist' kryteriyu St'yudenta [Testing the statistical hypothesis of the homogeneity of the mathematical expectations of two independent samples: the Kramer-Welch criterion instead of the Student's criterion]. *Politematychnoyi merezhevyi elektronnyy naukovyy zhurnal Kubans'koho derzhavnoho ahrravnoho universytetu*, 2015, 110(06), 1-22.
23. **Efron, B.** Netradytsiyini metody bahatovymirnoho statystychnoho analizu: Zbirnyk statey. [Tekst] Nontraditional methods of multivariate statistical analysis: Collection of articles. M: Finansy i statystyka, 1988, 263.
24. **Shytikov, V. K.** Vykorystannya randomizatsiyi i but- strepa pry obrobtsi rezul'tativ ekolohichnykh sposterzhen'. [The use of randomization and bootstrap when processing the

results of environmental observations. *Pryntsypy ekolohiyi [Principles of ecology]*, 2012, **1**, 1, 4-24.

25. **Chorny, A., Savyak, R., Kondratov, S.** Development of a bootstrap-model for determining the release of medicinal

preparations in the human organism. *Skhidno-Yevropeys'kyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy*, 2017, **3** (6), 43-49, doi: 10.15587/1729-4061.2017.102182.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Черный Александр Александрович** – аспирант, Институт химических технологий Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля, аспирант кафедры высшей математики и компьютерной технологии; г. Рубежное, Украина. Научный сотрудник отдела фармацевтической разработки ООО НПФ «Микрохим»; г. Рубежное, Украина; ORCID :0000-0002-6949-9247; e-mail: chorny@microkhim.com.

**Alexandr Chorny** – postgraduate, Institute of Chemical Technology Volodymyr Dahl's East Ukrainian National University, postgraduate of the department of mathematics and computer technologies; Rubizhne, Ukraine. Research Fellow, Pharmaceutical Development Department, Research and Production Company "Microkhim" Ltd; Rubizhne, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6949-9247; e-mail: chorny@microkhim.com.

**Кондратов Сергей Алексеевич** – доктор химических наук, профессор, Институт химических технологий Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля, профессор кафедры высшей математики и компьютерной технологии; г. Рубежное, Украина; ORCID:0000-0002-1963-0155; e-mail: kondratovsa@gmail.com.

**Serhii Kondratov** – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Institute of Chemical Technology Volodymyr Dahl's East Ukrainian National University, Professor of the department of mathematics and computer technologies; Rubizhne, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1963-0155; e-mail: kondratovsa@gmail.com.

**Олейников Дмитрий Сергеевич** – начальник отдела фармацевтической разработки ООО НПФ «Микрохим»; г. Рубежное, Украина; ORCID:0000-0002-8777-5815; e-mail: oleynikov@microkhim.com.

**Dmitriy Oleynikov** – Head of Pharmaceutical Development Department, Research and Production Company "Microkhim" Ltd; Rubizhne, Ukraine; ORCID:0000-0002-8777-5815; e-mail: oleynikov@microkhim.com.

**Савяк Роман Прокопович** – кандидат химических наук, доцент, научный сотрудник отдела фармацевтической разработки ООО НПФ «Микрохим»; г. Рубежное, Украина; ORCID: 0000-0001-9691-9473; e-mail: savyak@microkhim.com.

**Roman Savyak** – PhD, Associate Professor, Research Fellow, Pharmaceutical Development Department, Research and Production Company "Microkhim" Ltd; Rubizhne, Ukraine; ORCID :0000-0001-9691-9473; e-mail: savyak@microkhim.com.

*Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Черный, А. А.** Разработка композиционных полимерных матричных таблеток с заданным временем высвобождения изосорбида динитрата методом математического моделирования / **А. А. Черный, С. А. Кондратов, Д. С. Олейников** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 187-196. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.24.

*Please cite this article as:*

**Chorny, A., Kondratov, S., Oleynikov, D.** Development composite polymer matrix tablets with a preset time of isosorbide dinitrate release by the method of mathematical modeling. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 187-196, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.24.

*Будь ласка, посилайте на цю статтю наступним чином:*

**Черный, О. О.** Розробка композиційних полімерних матричних таблеток із заданим часом вивільнення ізосорбиду динітрату методом математичного моделювання / **О. О. Черный, С. О. Кондратов, Д. С. Олійников** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 187-196. – doi: 10.20998/2413-4295.2019.05.24.

**АНОТАЦІЯ** Вивчено кінетику вивільнення ізосорбиду динітрату з покритих і непокритих гранул діаметром 0,5–0,8 мм і 0,8–1,25 мм, які використовуються для приготування матричних таблеток. Проведено статистичний аналіз отриманих результатів. Для одного і того ж значення часу і різних значень рН розраховано середні значення вивільнення і емпіричні значення критерію Шанпіро-Уїлкі. Для набору серії при одному і тому ж часу і різних рН розраховані емпіричні значення критерію Кохрена і непараметричного критерію Краскелла-Уолліса з урахуванням повторюваних груп і поправкою Імана-Девенпорта на кількість елементів у вибірці. Встановлено мало впливав рН на кінетику вивільнення. При моделюванні вивільнення з таблеток на основі гранул використані характеристики нормального розподілу для кожного з типів гранул і кожного значення часу. Розраховано кількість кожного типу гранул, що входить до складу ядра таблеток, для досягнення бажаного профілю вивільнення в середовищі Excel з використанням надбудови «Пошук рішення». Для середніх значень вивільнення для гранул трьох типів методом найменших квадратів отримані значення мас сумарного змісту ізосорбиду динітрату. Для експериментальної перевірки моделі напрацьована партія матричних таблеток з використанням покритих і непокритих гранул діаметром 0,5–0,8 мм. Проведено дослідження кінетики вивільнення ізосорбиду динітрату з таблеток при рН 1,2; 4,5; 6,8. Проведено статистичний аналіз отриманих даних і порівняння результатів з розрахунками за моделлю. Встановлено, що використаний підхід дозволяє з прийнятною точністю описати вивільнення ізосорбиду динітрату з таблеток. Встановлено критерій точності – потрапляння експериментального профілю вивільнення розробленої композиції в кордону між максимальним і мінімальним бажаним профілем. В результаті проведених досліджень розроблений композиційний препарат пролонгованої дії «Дикор Лонг» на основі ізосорбиду динітрату. Препарат пройшов державні випробування, в ТОВ НВФ «Мікрохім» налагоджений його промисловий випуск.

**Ключові слова:** ізосорбиду динітрат; матричні таблетки; гранули; статистичний аналіз; кінетика вивільнення; математичне моделювання

Поступила (received) 18.02.2019



УДК 679.7:678:544

doi:10.20998/2413-4295.2019.45.25

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНГРЕДІЄНТІВ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОМОДИФІКОВАНИХ ПОЖЕЖОБЕЗПЕЧНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ З ДИГІДРАТАМИ ОКСИДУ МАГНІЮ

**О. В. ЧУЛЄЄВА\*, В. М. ЗОЛОТАРЬОВ**

Приватне акціонерне товариство «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», Харків, УКРАЇНА  
e-mail: echuleeva@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Метою статті є визначення впливу фізико-хімічних властивостей та концентрації модифікаторів, типу і дисперсності дигідратів оксиду магнію та полімерної матриці на електрофізичні властивості пожежеобезпечних композиційних матеріалів кополімеру етилену з вінілацетатом. Досліджували композиції кополімеру з показником плинності розлаву 2,5 г/10 хв та 5 г/10 хв., дигідрати оксиду магнію з середнім медіанним діаметром часточок 3 мкм та 3,7 мкм, аміносилани з динамічною в'язкістю 2 МПа · с та 2,5 МПа · с. Для проведення досліджень використовували методи визначення електричної міцності, об'ємного електричного опору, тангенсу кута діелектричних втрат, діелектричної проникності. Для цього використовували апарат випробування ізоляції, вимірювач електричного опору ізоляції, міст змінного струму. З метою порівняння для кожної полімерної композиції будували графіки залежності цих показників від вмісту інгредієнтів. Отримано електрофізичні характеристики, які дозволяють визначити склад, що забезпечує оптимальні значення для ізоляційних матеріалів з підвищеними вимогами пожежної безпеки. Вперше використано методи електрофізичних досліджень з метою визначення впливу властивостей інгредієнтів полімерних композицій на електричну міцність, питомий об'ємний електричний опір, тангенс кута діелектричних втрат, діелектричну проникність. Електрична міцність підвищується з 25,5 кВ/мм до 30 кВ/мм, питомий об'ємний електричний опір підвищується від  $4 \cdot 10^{12}$  Ом · см до  $6 \cdot 10^{14}$  Ом · см, діелектрична проникність зменшується до 3,8, а тангенс кута діелектричних втрат до 0,0055. Результати досліджень доцільно використовувати для розробки складу пожежеобезпечних полімерних композицій для кабельної продукції.

**Ключові слова:** композиційні матеріали; модифікатор; кополімер етилену з вінілацетатом; дигідрат оксиду магнію; електрофізичні властивості.

## RESEARCH OF THE INFLUENCE OF INGREDIENTS ON ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF NANOMODIFIED FIRE-SAFE POLYMER COMPOSITIONS WITH MAGNESIUM OXIDE DIHYDRATES

**O. CHULIEIEVA, V. ZOLOTARYOV**

Private joint stock company pjsc «YUZHicable WORKS», Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The purpose of the article is to determine the influence of physico-chemical properties and concentration of modifiers, the type and dispersion of magnesium oxide dehydrates and the polymer matrix on the electrophysical properties of fire-fighting composite materials of copolymer ethylene with vinyl acetate. Copolymer compositions with a flux rate of 2,5 g/10 min and 5 g/10 min, magnesium oxide dihydrates with a mean median diameter of particles of 3 μm and 3,7 μm were studied, amino silanes with a dynamic viscosity of 2 MPa · s and 2,5 MPa · s. Methods for determination of electric strength, volume electric resistance, tangent of dielectric loss angle, dielectric permittivity were used for conducting researches. For this purpose, a device for testing isolation, an electric resistive resistance meter, and an AC bridge were used. In order to compare these indices, for each polymer composition, the graphs were based on the content of the ingredients. Electrophysical characteristics have been obtained, which allow determining the composition that provides optimal values for insulating materials with increased fire safety requirements. Electrophysical investigations were first used to determine the effect of the properties of polymer compositions on electrical strength, specific volumetric electrical resistance, tangent of the angle of dielectric losses, dielectric permeability. The electrical strength rises from 25,5 kV/mm to 30 kV/mm, the specific volumetric electric resistance rises from  $4 \cdot 10^{12}$  Ω cm to  $6 \cdot 10^{14}$  Ω cm, the dielectric constant decreases to 3,8 and the tangent of the angle of dielectric loss to 0,0055. The results of researches should be used for the development of the composition of fire-safe polymer compositions for cable products.

**Keywords:** composite materials; modifier; ethylene-vinyl acetate copolymer; magnesium oxide dihydrate; electrophysical properties.

### Вступ

За останні роки підвищилися технічні вимоги щодо кабельних виробів та, як слідство, необхідність розробки нових прогресивних матеріалів, в тому числі

пожежеобезпечних полімерних композиційних матеріалів. Створення безгалогенних рецептур досягається за рахунок введення в базовий полімер антипіренів – гідроксидів металів [1]. Основними технічними характеристиками для пожежеобезпечних

полімерних композицій впродовж експлуатації є електрофізичні показники. Однак, дослідження їх проведено недостатньо. Тому, дослідження залежності електрофізичних властивостей від складу полімерних композицій, враховуючи модифікатор, хімічний склад, дисперсність дигідратів оксиду магнію є актуальною проблемою. Одним із засобів зниження горючості полімерних матеріалів поліолефінів є введення до полімерної композиції наповнювачів-антипіренів [2]. З цією метою використовують неорганічні наповнювачі-антипірени [3]. В умовах реальної пожежі ПВХ пластикати, що є елементами кабелів, які мають значення КІ до 40 одиниць, є джерелом виділення корозійноактивних газів HCl та значного задимлення. Тому, з метою вирішення проблем, що пов'язані з виділенням HCl та задимленням, було створено полімерні композиції, які не виділяють корозійноактивних газів та мають значно нижчий рівень виділення диму [4]. Ці матеріали не тільки збільшують вогнестійкість за рахунок поглинання більшої кількості тепла, але й нейтралізують кислі гази, що призводить до зниження димоутворення [5]. В якості полімерної бази цих матеріалів зазвичай використовують поліолефіни, а в якості антипіренів – дигідрати оксиду магнію. [6]. Вивчали вогнетривкі властивості композиційних матеріалів, базовим полімером в яких є LDPE/EVA. В якості наповнювачів використовували гідроксид магнію та тригідрат оксиду алюмінію. Вогнетривкі властивості оцінювали за горизонтальним горінням та за кисневим індексом [7]. За допомогою методів TGA/DSC проводились дослідження полімерних композицій з використанням в якості антипірену діоксиду магнію. Визначали теплоємність цих матеріалів [8]. Досліджено вогнестійкість кополімеру етилену з вінілацетатом, який наповнювали тригідратом оксиду алюмінію, дигідратами оксиду магнію та діоксидом кремнію [9]. Встановлено, що задля забезпечення пожежобезпечних властивостей композиційних матеріалів для ізоляції та оболонки кабелів та кращої безпеки електричного обладнання та пристроїв, має бути дуже високий ступень наповнення полімерної матриці гідратами металів, що може призвести до втрати гнучкості та низьким механічним властивостям з одночасними проблемами під час переробки [10]. Вивчали можливість використання гідроксиду магнію, борату цинку, та їх сумісну дію, як інгібітору горіння поліпропіленового волокна. Показана ефективність використання борату цинку. Використання гідроксиду магнію є малоефективним. Перевірялись теплові, механічні та морфологічні властивості [11]. Показано ефективність використання аміноалкоксиланів як апретів для поліпшення контактів полімер-наповнювача в композиційних матеріалах та обробки неорганічних субстратів для підвищення адгезії різних полімерів і покриттів [12,13].

Наведені дослідження показують, що властивості полімерних композицій змінюються в

залежності від складу. Рівень електрофізичних властивостей пожежобезпечних полімерних композиційних матеріалів впродовж експлуатації кабельної продукції має важливе значення. Однак багато запитань, які пов'язано зі створенням пожежобезпечних полімерних композицій все ще недостатньо вивчено. Особливо це стосується впливу модифікаторів, дигідратів оксиду магнію та полімерної матриці на електрофізичні властивості.

### Мета роботи

Вивчення впливу фізико-хімічних властивостей та концентрації модифікаторів, типу і дисперсності наповнювачів-антипіренів та полімерної матриці на електрофізичні властивості пожежобезпечних композиційних матеріалів кополімеру етилену з вінілацетатом. Це дасть можливість обґрунтовано підходити до визначення типу полімеру, модифікатора, та дисперсності наповнювача-антипірену. Це також дозволить швидко скорегувати рецептуру композиції в залежності від наявної сировини або від бажаних електрофізичних властивостей кінцевого продукту.

Для досягнення поставленої мети необхідно дослідити залежність електричної міцності, питомого об'ємного електричного опору, тангенса кута діелектричних втрат, діелектричної проникності від кількості модифікатору та властивостей інгредієнтів полімерних композицій.

### Матеріали та обладнання для вивчення електрофізичних властивостей

Досліджували кополімери етилену з вінілацетатом (КЕВ-1, КЕВ-2), характеристики яких наведено в табл. 1, а також наповнювачі-антипірени, в якості яких використовували дигідрати оксиду магнію. Характеристики наповнювачів-антипіренів наведено в табл. 2. Модифікатор 1 – 3-амінопропілтриетоксисилан, модифікатор 2 – аminosилан (N-(3-триметоксисилан) пропілбутіламін). Характеристики наведено в табл. 3.

Вимірювання електрофізичних показників полімерних композицій проводилися на зразках завтовшки  $(1,0 \pm 0,1)$  мм, виготовлених вальцево-пресовим методом за температури 448 К.

Серію експериментів з визначення електричної міцності, питомого електричного опору, діелектричної проникності, тангенса кута діелектричних втрат було проведено з використанням апарату типу АІІ-70, вимірювача електричного опору КИСИ-1, мосту змінного струму Р589.

Обробку результатів та побудову графіків виконували за допомогою програмного забезпечення Microsoft Office Excel 2007.

Адекватність рівняння регресії проводили перевіркою статистичної значимості коефіцієнта

детермінації  $R^2$  по  $F$ -критерію, визначеному за формулою [14]:

$$F_p = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m},$$

де  $n$  – кількість спостережень;  $m$  – кількість факторів у рівнянні регресії.

### Результати досліджень електрофізичних властивостей полімерних композицій

Вимірювання електричної міцності полімерних композицій проводили змінною напругою до 50 кВ, частотою 50 Гц.

Результати досліджень наведено на рис. 1, 2.

Дослідження залежностей показників електричної міцності полімерних композицій від хімічного складу та дисперсності наповнювачів-антипіренів демонструє вплив кожного з них на її величину.

Аналіз цих характеристик показує, що найвищі значення електричної міцності можливо досягнути під час використання в якості наповнювача-антипірену зразок 4: для полімерної композиції на основі КЕВ-1 – (25,5 – 30,0) кВ/мм; на основі КЕВ-2 – (20,8 – 28,0) кВ/мм. Ці значення електричної міцності досягаються під час використання наповнювача-антипірена з меншим середнім діаметром часточок та модифікатору 1.

Як показано в [9] реологічні характеристики полімерних композицій значно покращуються під час використання модифікатору 2. Доцільно встановити як впливає на електричну міцність суміш модифікаторів.

Складаємо рівняння регресії модифікаторів 1 та 2 для врахування вкладу кожного із модифікаторів:

$$1. y = (25,46e^{0,102x}) \cdot k_1 + (24,84e^{0,058x}) \cdot k_2.$$

$$2. y = (20,78e^{0,215x}) \cdot k_1 + (20,66e^{0,188x}) \cdot k_2.$$

Зміною кількості модифікаторів в їх сумішах одержували оптимальні значення кількості модифікованої суміші (рис. 1 крива 3, 4; рис. 2 крива 3, 4).

Розрахунок питомого об'ємного електричного опору проводили за формулою:

$$\rho_v = \frac{\pi \cdot \left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2}{4 \cdot t} \cdot R_v,$$

де  $d_1$  – діаметр вимірювального електроду, м;  
 $d_2$  – внутрішній діаметр охоронного електроду, м;  
 $t$  – товщина зразка;  $R_v$  – вимірний опір, Ом.

Результати досліджень наведено на рис. 3.

Таблиця 1 – Характеристики кополімеру етилену з вінілацетатом

Показник	КЕВ-1	КЕВ-2
Густина, кг/м <sup>3</sup>	939	951
Показник плинності розплаву, 2,16 кг, г/10 хв	2,5	5
Вміст вінілацетату, %	18	28

Таблиця 2 – Характеристики наповнювачів-антипіренів

Показник	Mg(OH) <sub>2</sub>	
	Зразок № 3	Зразок № 4
Масова доля, %:		
– Mg(OH) <sub>2</sub>	>93	>93,2
– SiO <sub>2</sub>	<0,05	2,2±0,2
– Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0,3	0,12±0,02
– Na <sub>2</sub> O	<0,05	–
– CaO	–	2,2±0,2
Медіанний діаметр часточок, мкм:		
– середній (D <sub>50</sub> )	3	3,7
– макс. (D <sub>98</sub> )	20	12,5

Таблиця 3 – Характеристики аміносилану

Показник	Значення	
	Аміносилан 1	Аміносилан 2
Густина, кг/м <sup>3</sup> , 20 °С	950	947
Динамічна в'язкість, МПа·с, 20 °С	2	2,5
pH	11,3	10,9

З підвищенням питомого об'ємного електричного опору покращуються електроізоляційні властивості матеріалу. Питомий об'ємний електричний опір значно підвищується (від  $4 \cdot 10^{12}$  до  $6 \cdot 10^{14}$ ) Ом · см для полімерних композицій на основі КЕВ-2, антипірену 4 та в разі використання модифікатору 2 (рис. 3 крива 1). Рівняння регресії з урахуванням вкладів кожного із модифікаторів в суміші:

$$3. y = (2E + 12e^{1,862x}) \cdot k_1 + (2E + 12e^{-2,31x}) \cdot k_2$$

Досліджено зміни питомого об'ємного електричного опору від вологості полімерних композицій. Результати досліджень наведено на рис. 4.

Показано зниження питомого об'ємного електричного опору для полімерних композицій.

Рівняння регресії для сумішей модифікаторів:

$$4. y = (4E + 17e^{-39,9x}) \cdot k_1 + (3E + 21e^{-96,4x}) \cdot k_2$$

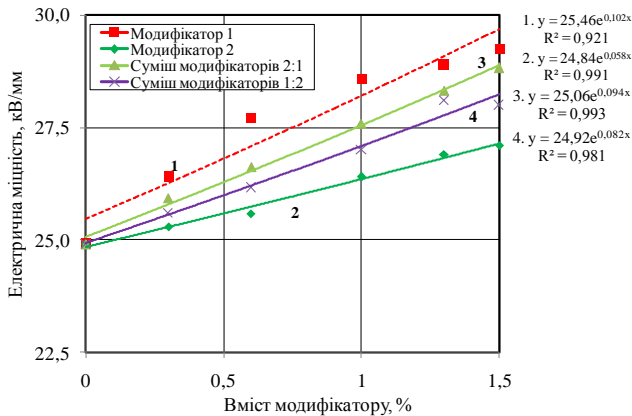


Рис. 1 – Залежність електричної міцності від вмісту модифікатору, для полімерних композицій на основі КЕВ-1 та антипірену 4: крива 1 – модифікатор 1, крива 2 – модифікатор 2, крива 3 – суміш модифікаторів де,  $k_1 = 0,67$ ;  $k_2 = 0,33$ ; крива 4 – суміш модифікаторів де,  $k_1 = 0,33$ ;  $k_2 = 0,67$

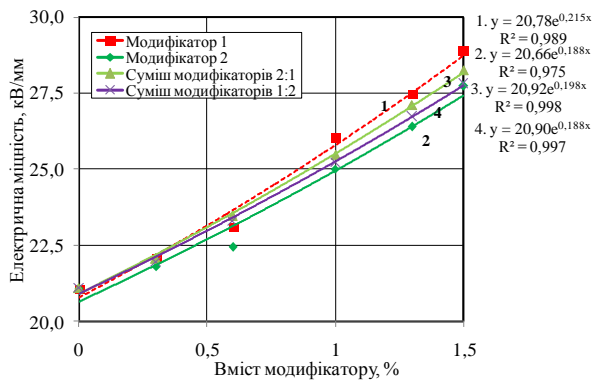


Рис. 2 – Залежність електричної міцності від вмісту модифікатору, для полімерних композицій на основі КЕВ-2 та антипірену 4: крива 1 – модифікатор 1, крива 2 – модифікатор 2, крива 3 – суміш модифікаторів де,  $k_1 = 0,67$ ;  $k_2 = 0,33$ ; крива 4 – суміш модифікаторів де,  $k_1 = 0,33$ ;  $k_2 = 0,67$

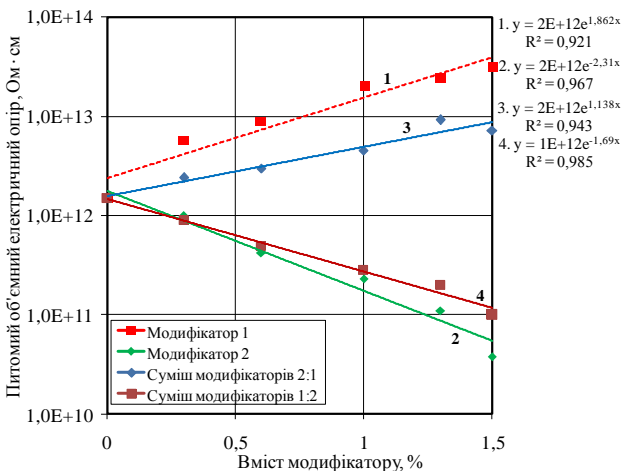


Рис. 3 – Залежність питомого об'ємного електричного опору від вмісту модифікатору полімерних композицій на основі КЕВ-2 з антипіреном 4: крива 1 – модифікатор 1; крива 2 – модифікатор 2; крива 3 – суміш модифікаторів де,  $k_1 = 0,67$ ;  $k_2 = 0,33$ ; крива 4 – суміш модифікаторів де,  $k_1 = 0,33$ ;  $k_2 = 0,67$

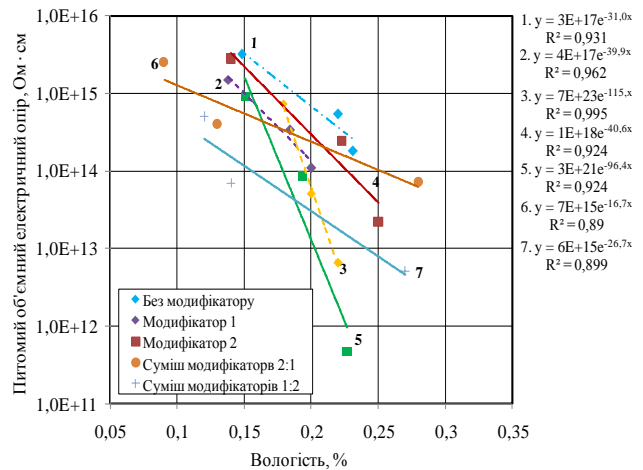


Рис. 4 – Залежність питомого об'ємного електричного опору від вологості полімерних композицій на основі КЕВ-1 та антипірену зразок 4 і модифікаторів: крива 1 без модифікатору; модифікатор 1: крива 2 – 0,6 %, крива 3 – 1,5 %; модифікатор 2: крива 4 – 0,6 % крива 5 – 1,5 %, крива 6 – суміш модифікаторів де,  $k_1 = 0,67$ ;  $k_2 = 0,33$ ; крива 7 – суміш модифікаторів де,  $k_1 = 0,33$ ;  $k_2 = 0,67$

Вимірювання тангенсу кута діелектричних втрат і електричної ємності (для подальшого розрахунку діелектричної проникності середовища) здійснювали за допомогою моста змінного струму Р589 за напруги 24 В і частоти 1 кГц з допустимою основною похибкою  $\pm 0,1 \%$  під час вимірювання ємності і  $\pm (0,02 \text{tg}\delta + 3 \cdot 10^{-4})$  під час вимірювання тангенсу кута діелектричних втрат.

Розрахунки проводили за формулами:  
Діелектрична проникність середовища

$$\epsilon = 0,144 \cdot C_x \cdot \frac{t}{\left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2},$$

де  $d_1$  – діаметр вимірювального електроду, м;  $d_2$  – внутрішній діаметр охоронного електроду, м;  $t$  – товщина зразка;  $C_x$  – виміряна електрична ємність, пФ.

Тангенс кута діелектричних втрат

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{\omega \cdot C_{\text{пар.}} \cdot R_{\text{пар.}}} = \omega \cdot C_{\text{посл.}} \cdot R_{\text{посл.}},$$

де  $\omega$  – кутова частота, рад/с;  $C_{\text{пар.}}$  – виміряна електрична ємність в еквівалентній паралельній схемі заміщення, пФ;  $R_{\text{пар.}}$  – виміряний опір в еквівалентній паралельній схемі заміщення, Ом;  $C_{\text{посл.}}$  – виміряна електрична ємність в еквівалентній послідовній схемі заміщення, пФ;  $R_{\text{посл.}}$  – виміряний опір в еквівалентній послідовній схемі заміщення, Ом.

Результати досліджень наведено на рис. 5.

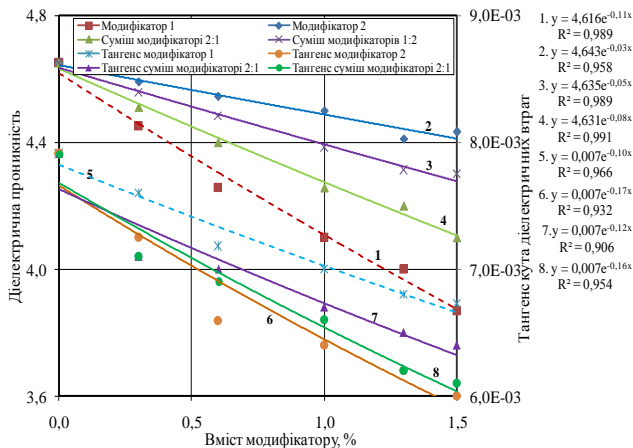


Рис. 5 – Залежність діелектричної проникності та тангенсу кута від вмісту модифікаторів, для полімерних композицій на основі КЕВ-1 та антипірену 4: крива 1, 5 – модифікатор 1, крива 2, 6 – модифікатор 2, крива 3, 7 – суміш модифікаторів де,  $k_1 = 0,67$ ;  $k_2 = 0,33$ ; крива 4, 8 – суміш модифікаторів де,  $k_1 = 0,33$ ;  $k_2 = 0,67$

Електроізоляційний матеріал вважається кращим, якщо має нижчі значення діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат. Результати досліджень показують, що для композицій на основі КЕВ 2 значення цих показників збільшується для всіх складів полімерних матеріалів.

Використання в якості полімерної матриці КЕВ 1 призводить до зниження діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат (рис. 5). Діелектрична проникність зменшується до 3,8, а тангенс кута діелектричних втрат до 0,0055.

Рівняння регресії з урахуванням вкладів суміші модифікаторів 1 та 2 будуть мати вигляд.

Для діелектричної проникності:

$$5. y = (4,616e^{-0,11x}) \cdot k_1 + (4,643e^{-0,03x}) \cdot k_2.$$

Для тангенсу кута діелектричних втрат:

$$6. y = (0,007e^{-0,10x}) \cdot k_1 + (0,007e^{-0,17x}) \cdot k_2$$

Важливий вплив на електрофізичні властивості пожежобезпечних полімерних композицій має формування надмолекулярної структури отриманих композицій. Про це свідчать результати досліджень електричної міцності, питомого об'ємного електричного опору, діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат. Результати досліджень дають змогу розробляти технології отримання полімерних композицій з керованими електрофізичними властивостями для ізоляції і оболонок кабельної продукції.

Перевагами даного дослідження є вивчення електрофізичних властивостей пожежобезпечних полімерних композиційних матеріалів з використанням високоточних сучасних приборів.

## Висновки

На електрофізичні властивості пожежобезпечних полімерних композицій суттєво впливають дисперсність дигідратів оксидів магнію, реологічні властивості полімерної матриці та фізико-хімічні властивості модифікаторів. Електрична міцність підвищується з 25,5 кВ/мм до 30 кВ/мм для композицій КЕВ-1, дигідрату оксиду магнію з меншим середнім діаметром часточок та модифікатору 1 з меншою динамічною в'язкістю.

Питомий об'ємний електричний опір підвищується від  $4 \cdot 10^{12}$  Ом · см до  $6 \cdot 10^{14}$  Ом · см для полімерних композицій КЕВ-2, дигідрату оксиду магнію зразок 4 та модифікатору 2 з більшою динамічною в'язкістю.

Діелектрична проникність зменшується до 3,8, а тангенс кута діелектричних втрат до 0,0055 для полімерних композицій КЕВ-1, дигідрату оксиду магнію зразок 4 та модифікатору 1.

## Список літератури

1. Тирелли, Д. Антипірені для композитів / Д. Тирелли // *The Chemical Journal*. – 2013. – no.1-2. – p. 42-45.
2. Василюк, Л. Г. Пожаробезопасные полимерные композиционные материалы на основе олефиновых сополимеров. Регулирование технологических, физико-механических и теплофизических свойств / Л. Г. Василюк, В. М. Золотарев, Е. В. Чулеева // *Журнал для производителей и потребителей «Кабели и провода»*. – 2018. – № 3(371). – С. 20-28.
3. Аблеев, Р. Актуальные проблемы в разработке и производстве негорючих полимерных компаундов для кабельной индустрии / Р. Аблеев // *Кабель-news*. – 2009. – №6-7. – С. 64-69.
4. Обзор минеральных антипиренов-гидроксидов для безгалогенных кабельных композиций // *Кабель-news*. – 2009. – № 8. – С. 41-43.
5. Пешков, И. Б. Материалы кабельного производства / И. Б. Пешков. – М.: Машиностроение, 2013. – 456 с.
6. Laoutid, F. Calcium-based hydrated minerals: Promising halogen-free flame retardant and fire resistant additives for polyethylene and ethylene vinyl acetate copolymers / F. Laoutid, L. Marion, L. Didier, B. Leila // *Polymer Degradation and Stability*. – 2013. – Vol. 98. – Issue 9. – P. 1617-1625. – doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.06.020.
7. Lujan-Acosta, R. Effect of Amino alcohol functionalized polyethylene as compatibilizer for LDPE/EVA/clay/flame-retardant nanocomposites / Lujan-Acosta R., Sanchez-Valdes S., Ramirez-Vargas E., Ramos-DeValle L.F. // *Materials Chemistry and Physics*. – 2014. – Vol. 146. – Issues 14. – P. 437-445. – doi: 10.1016/j.matchemphys.2014.03.050.
8. Sonnier, R. Fire retardant benefits of combining aluminum hydroxide and silica in ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) / R. Sonnier, A. Viretto, LoYc Dumazert // *Polymer Degradation and Stability*. – 2016. – Vol. 128. – P. 228-236. – doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.03.030.
9. Chulieva, O. Effect of fire retardant fillers on thermophysical properties of composite materials of ethylene-vinyl acetate copolymer / O. Chulieva // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. –

2017. – No. 6/12 (90). – P. 58-64. – doi: 10.15587/1729-4061.2017.119494.
- Chulieieva, O.** Effect of modifier on the thermophysical properties of fireproof ethylene-vinyl acetate copolymer composition materials / **O. Chulieieva, V. Zolotaryov** // *Technology audit and production reserves*. – 2018. – № 6/1(44). – P. 23–28. – doi:10.15587/2312-8372.2018.150294.
  - Jeencham, R.** Effect of flame retardants on flame retardant, mechanical, and thermal properties of sisal fiber/polypropylene composites / **R. Jeencham, N. SuppaRarn, K. Jarukumjorn** // *Composites Part B: Engineering*. – 2014. – Vol. 56. – P. 249–253. – doi: 10.1016/j.compositesb.2013.08.012.
  - Valadez-Gonzalez, A.** Chemical modification of heneque'n fibers with an or-ganosilane couplingagent / **A. Valadez-Gonzalez, J. Cervantes-Uc, R. Olayo** // *Composites Part B*. – 1999. – № 30. – P. 321–331.
  - Jesionowski, T.** Effect of N-2-(aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane surface modification and C.I. Acid Red 18 dye adsorption on the physico-chemical properties of silica precipitated in an emulsion route, used as a pig-ment and a filler in acrylic paints / **T. Jesionowski, M. Pokoraa, W. Tylus** // *Dyes and Pigments*. – 2003. – №57. – P. 29–41.
  - Макарова, Н. В.** Статистика в Excel: Учеб. пособие / **Н. В. Макарова, В. Я. Трофимец**. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
  - fire retardant-hydroxides for halogen-free cable compositions]. *Kabel'-news*, 2009, **8**, 41–43.
  - Peshkov, I. B.** Materialy kabel'nogo proizvodstva [Materials cable production]. М.: *Mashinostroyeniye*, 2013, 456.
  - Laoutid, F., Marion, L., Didier, L., Leila, B.** Calcium-based hydrated minerals: Promising halogen-free flame retardant and fire resistant additives for polyethylene and ethylene vinyl acetate copolymers. *Polymer Degradation and Stability*, 2013, **98**, 9, 1617–1625, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.06.020.
  - Lujan-Acosta, R., Sanchez-Valdes, S., Ramirez-Vargas, E., Ramos-DeValle, L. F.** Effect of Amino alcohol functionalized polyethylene as compatibilizer for LDPE/EVA/clay/flame-retardant nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, **146**, 14, 437-445, doi: 10.1016/j.matchemphys.2014.03.050.
  - Sonnier, R., Viretto, A., Dumazert, LoYc.** Fire retardant benefits of combining aluminum hydroxide and silica in ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA). *Polymer Degradation and Stability*, 2016, **128**, 228–236, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.03.030.
  - Chulieieva, O.** Effect of fire retardant fillers on thermophysical properties of composite materials of ethylene-vinyl acetate copolymer. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2017, **6/12 (90)**, 58-64, doi: 10.15587/1729-4061.2017.119494.
  - Chulieieva, O., Zolotaryov, V.** Effect of modifier on the thermophysical properties of fireproof ethylene-vinyl acetate copolymer composition materials. *Technology audit and production reserves*, 2018, **6/1(44)**, 23–28, doi:10.15587/2312-8372.2018.150294.

#### References (transliterated)

- Tirelli, Diyego.** Antipireny dlya kompozitov [Flame retardants for composites]. *The Chemical Journal*, 2013, **1-2**, 42-45.
- Vasilets, L. G., Chulieieva, E. V., Zolotaryov, V. M.** Pozharobezopasnyye polimernyye kompozitsionnyye materialy na osnove olefinovykh sopolimerov. Regulirovaniye tekhnologicheskikh, fiziko-mekhanicheskikh i teplofizicheskikh svoystv [Fireproof polymer composite materials based on olefin copolymers. Regulation of technological, physicochemical and thermophysical properties]. *Zhurnal dlya proizvoditeley i potrebiteley «Kabeli i provoda»*, 2018, **3(371)**, 20-28.
- Ableyev, R.** Aktual'nyye problemy v razrabotke i proizvodstve negoryuchikh polimernykh kompaundov dlya kabel'noy industrii [Actual problems in the development and production of non-combustible polymeric compounds for the cable industry]. *Kabel'-news*, 2009, **6-7**, 64-69.
- Obzor mineral'nykh antipirenov-gidroksidov dlya bezgalogenykh kabel'nykh kompozitsiy [Review of mineral
- Jeencham, R., SuppaRarn, N., Jarukumjorn, K.** Effect of flame retardants on flame retardant, mechanical, and thermal properties of sisal fiber/polypropylene composites. *Composites Part B: Engineering*, 2014, **56**, 249–253, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.08.012.
- Valadez-Gonzalez, A., Cervantes-Uc, J., Olayo, R.** Chemical modification of heneque'n fibers with an or-ganosilane couplingagent. *Composites Part B*, 1999, **30**, 321–331.
- Jesionowski, T., Pokoraa, M., Tylus, W.** Effect of N-2-(aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane surface modification and C.I. Acid Red 18 dye adsorption on the physico-chemical properties of silica precipitated in an emulsion route, used as a pig-ment and a filler in acrylic paints. *Dyes and Pigments*, 2003, **57**, 29–41.
- Makarova, N. V., Trofimets, V. Ya.** Statistika v Excel [Excel statistics]: *Ucheb. Posobiye*. М.: Финансы и статистика, 2002, 368.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Чулєєва Олена Володимирівна** – кандидат технічних наук, директор науково-технічного центру, приватне акціонерне товариство «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-7310-0788; e-mail: echuleeva@ukr.net.

**Olena Chulieieva** – PhD, Director of the Science and Technology Center, PJSC «Yuzhcable Works», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-7310-0788; e-mail: echuleeva@ukr.net.

**Золотарьов Володимир Михайлович** – доктор технічних наук, Генеральний директор, приватне акціонерне товариство «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-3886-4993; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua.

**Volodymyr Zolotaryov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director General, PJSC «Yuzhcable Works», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3886-4993; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua.



*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Чулєєва, О. В.** Дослідження впливу інгредієнтів на електрофізичні властивості наномодифікованих пожежобезпечних полімерних композицій з дигідратами оксиду магнію / **О. В. Чулєєва, В. М. Золотарьов** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 197-203. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.25.

*Please cite this article as:*

**Chulieieva, E., Zolotaryov, V.** Research of the influence of ingredients on electrophysical properties of nanomodified fire-safe polymer compositions with magnesium oxide dihydrates. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 197-203, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.25.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Чулєєва, Е. В.** Исследование влияния ингредиентов на электрофизические свойства наномодифицированных пожаробезопасных полимерных композиций с дигидратами оксида магния / **Е. В. Чулєєва, В. М. Золотарев** // *Вестник НТУ «ХПІ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 197-203. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.25.

**АННОТАЦИЯ** Целью статьи является определение влияния физико-химических свойств и концентрации модификаторов, типа и дисперсности дигидрата оксида магния и полимерной матрицы на электрофизические свойства пожаробезопасных композиционных материалов сополимера этилена с винилацетатом. Исследовали композиции сополимера с показателем текучести расплава 2,5 г/10 мин и 5 г/10 мин., дигидраты оксида магния со средним медианным диаметром частиц 3 мкм и 3,7 мкм, аминосиланы с динамической вязкостью 2 МПа · с и 2,5 МПа · с. Для проведения исследований использовали методы определения электрической прочности, объемного электрического сопротивления, тангенса угла диэлектрических потерь, диэлектрической проницаемости. Для этого использовали аппарат испытания изоляции, измеритель сопротивления изоляции, мост переменного тока. С целью сравнения для каждой полимерной композиции строили графики зависимости этих показателей от содержания ингредиентов. Получены электрофизические характеристики, которые позволяют определить состав, обеспечивающей оптимальные значения для изоляционных материалов с повышенными требованиями пожарной безопасности. Впервые использованы методы электрофизических исследований с целью определения влияния свойств ингредиентов полимерных композиций на электрическую прочность, удельное объемное электрическое сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, диэлектрическую проницаемость. Электрическая прочность повышается с 25,5 кВ / мм до 30 кВ / мм, удельное объемное электрическое сопротивление повышается с  $4 \cdot 10^{12}$  Ом · см до  $6 \cdot 10^{14}$  Ом · см, диэлектрическая проницаемость уменьшается до 3,8, а тангенс угла диэлектрических потерь до 0,0055. Результаты исследований целесообразно использовать для разработки состава пожаробезопасных полимерных композиций для кабельной продукции.

**Ключевые слова:** композиционные материалы; модификатор; сополимер этилена с винилацетатом; дигидрат оксида магния; электрофизические свойства.

*Поступила (received) 29.03.2019*

УДК 338.27/ 637.51

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.26

## ВПЛИВ ПРОТЕАЗИ МІКРОБІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ НА ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАРШІВ НА ОСНОВІ РІЗНИХ ВИДІВ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ

Д. А. ШВЕДЮК<sup>1\*</sup>, В. М. ПАСІЧНИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Проблемна науково-дослідна лабораторія Національного Університету Харчових Технологій, Київ, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра технології м'яса та м'ясопродуктів Національного Університету Харчових Технологій, Київ, УКРАЇНА

\*e-mail: shvedyuk.d@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** В сучасних умовах для харчової індустрії актуальним залишається забезпечення високої біологічної цінності продуктів харчування, яка визначається доступністю до асиміляції білка і вільних амінокислот, зокрема і для м'ясопродуктів. Цю актуальність обумовлюють недостатність сировинних ресурсів, загальний рівень споживання повноцінних білків населенням світу та України зокрема, що визначає необхідність пошуку ефективних способів ресурсоощадження та впровадження безвідходних технологій. У статті наведено порівняльне дослідження функціонально-технологічних характеристик фаршів на основі різних видів м'ясної сировини (м'яса стегна курчат-бройлерів, свинина напівжирна та яловичина першого сорту), що пройшли попередню ферментацію протеазою мікробіологічного походження (*Aspergillus niger*) протягом 48 год за температури 5°C та при концентрації кухонної солі 2,5% від маси основної м'ясної сировини. В отриманих зразках було визначено основні фізико-хімічні показники з метою встановлення відмінностей впливу протеази на різні види м'ясної сировини. Слабкий вплив ферменту на яловичину можна пояснити гіпотезою про те, що даний вид протеаз не проявляє мономеризаційної активності відносно сульфідних зв'язків, які наявні у сірковмісних амінокислотах яловичини. З іншого боку, зразки, в рецептурі яких використано м'ясо курчат-бройлерів та свинину проявили прямо пропорційні залежності більшості функціональних характеристик від концентрації протеази в системі. Різницю у величині відносних змін кількісних значень показників дослідних зразків найбільш чітко можна асоціювати із видом сировини, який складав рецептуру тієї чи іншої групи зразків. В результаті досліджень даний режим обробки визнано раціональним для свинини та м'яса курчат-бройлерів та встановлено оптимальні рівні введення ферменту.

**Ключові слова:** мікробіологічні протеази; ферментація; свинина; технологія м'ясомістких продуктів; м'ясо курчат-бройлерів

## EFFECT OF PROTEASE OF MICROBIOLOGICAL ORIGIN ON FUNCTIONAL AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MINCED MEAT ON THE BASIS OF DIFFERENT KINDS OF MEAT RAW MATERIAL

D. SHVEDYUK<sup>1</sup>, V. PASICHNYI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Problematic scientific-research laboratory of NUFT, Kyiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of meat and meat products technology of NUFT, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** One of the ways to increase the availability of proteins to the human digestive system is to use proteases of microbiological origin as enzymes for the processing of meat raw materials with different protein composition. Enzymes of microbiological origin are more accessible in terms of their cost, based on the fact that the colony-producers of these enzymes are capable of reproduction and self-healing. This type of enzymes contains a number of substances that can participate in the decomposition of not only animal but also plant proteins, thus increasing the range of raw materials available for this technology. Possibility of combining plant and animal raw materials in the meat-and-dairy product recipe makes it possible to increase the biological value and availability of the finished product, which is (mainly) determined by the Mitchell's rule (the assimilation of amino acids occurs at the smallest among the available essential amino acids in the level of their content in the product). The article presents a comparative study of functional and technological characteristics of minced meat based on various types of meat raw material (meat of chicken broilers, pork semifinished and first grade beef) that have been pre fermented with protease microbiological origin (*Aspergillus Niger*) for 48 hours after a temperature of 5 °C and at a concentration of a kitchen salt 2,5% from weight of the basic meat raw material. The choice of the desired level of the introduction of the kitchen salt, the duration of fermentation and the process in the stuffing system aims to maximally bring the research to the real conditions of production and accelerate the metabolic processes in the system. According to the experiment, 5 samples were prepared for the fermentation of low-fat pork, first class beef, and the femur of broiler chicken meat. Each group of samples in addition to control supposed the introduction of protease 15, 30, 45 and 60 mg / g respectively. Control samples of meat did not contain additionally introduced enzymes. In the samples obtained, the basic physical and chemical parameters were determined in order to determine the differences in the influence of protease on various types of meat raw materials. As a result of the research, this treatment has been found to be rational for pork and broiler chicken meat and the optimal levels of enzyme administration have been established. Further research will focus on investigating the use of *Aspergillus Niger* prostheses for fermentation of meat and vegetable forages and the possibility

*of synergistic interaction of this enzyme with collagenase to create combined products with specified functional and technological parameters using beef, pork and broiler chicken meat.*

**Keywords:** *microbiological proteases; fermentation; pork; technology of meat-based products; meat of chicken broilers*

## Вступ

В сучасних умовах для харчової індустрії актуальним залишається забезпечення високої біологічної цінності продуктів харчування, яка визначається доступністю до асиміляції білка і вільних амінокислот, зокрема і для м'ясопродуктів. Цю актуальність обумовлюють недостатність сировинних ресурсів, загальний рівень споживання повноцінних білків населенням світу та України зокрема, що визначає необхідність пошуку ефективних способів ресурсоощадження та впровадження безвідходних технологій [1,2].

Одним з шляхів підвищення доступності білків системі травлення людини є застосування протеаз мікробіологічного походження в якості ферментів для обробки м'ясної сировини з різним складом білка. Ферменти мікробіологічного походження є більш доступними з точки зору їх собівартості, базуючись на тому, що колонії-продуценти цих ферментів здатні до розмноження та самовідновлення. Даний вид ферментів містить цілий ряд речовин, які здатні брати участь у розщепленні не лише тваринних, але й рослинних білків, збільшуючи таким чином асортимент доступної для даної технології сировини [3]. Можливість комбінування рослинної та тваринної сировини у рецептурах м'ясомістких продуктів дає можливість збільшити біологічну цінність та доступність готового продукту, що (в основному) обумовлюється правилом Мітчела (засвоєння амінокислот відбувається за найменшим серед наявних незамінних амінокислот рівнем їх вмісту в продукті) [4,5].

Застосування протеаз мікробіологічного походження в технології м'ясних та м'ясомістких продуктів є поширеним та актуальним напрямком досліджень як для вітчизняних, так і для зарубіжних науковців. Так функціонально-технологічні характеристики готових продуктів, при ферментуванні яких була використана протеаза мікробіологічного походження (а саме (*Lactobacillus sakei* та *Pediosoccus pentosaceus*) приведені у роботі Ч.Монтанарі [6]. Згідно постановки експерименту було проведено порівняння двох видів протеаз мікробіологічного походження з точки зору їх впливу на характеристики готових ковбасних виробів. З отриманих результатів можна зробити висновок про те, що вид обраного ферменту має вплив на процеси дозрівання ковбасних виробів, аналогічний до такого ж впливу, який виявляє діаметр виробу в процесі його осадження.

Також особливості ферментативних процесів, які протікають у м'ясній сировині різних видів розкрито у роботі дослідників з Кореї [7]. В даній роботі було використано такі ферменти, як бромелайн та папаїн, а в якості сировини обрано яловичину та

м'ясо курчат-бройлерів. Як результат, найбільший ефект розм'якшення текстури та вивільнення амінокислот був досягнутий при комбінуванні обох видів ферментів при обробці виключно м'яса-курчат бройлерів. З іншого боку, яловичина значно менше піддавалась ферментативним процесам, що може бути пояснено вмістом сполучної тканини.

В багатьох роботах акцент зроблено на впливі виду сировини та його роль в процесах ферментації. Абсолютна більшість дослідників робить висновки про те, що найбільш доступним для мікробіологічних протеаз видом сировини є м'ясо птиці [8-10]. Проте, мало дослідженою частиною цього питання є вплив протеаз, які продукуються грибами виду *Aspergillus* на свинину (в той же час, як доведено позитивний вплив такого виду ферментів на функціональні характеристики м'яса птиці) [11].

## Мета роботи

Виходячи з наведених вище даних (зокрема недостатньої кількості досліджень, присвячених впливу мікробіологічних протеаз на функціонально-технологічні характеристики свинини), поставлено такі завдання роботи:

- дослідити зміни функціонально-технологічних показників різних видів м'ясної сировини, включаючи м'ясо стегна курчат-бройлерів, свинину напівжирну та яловичину першого сорту на етапах його ферментації.
- дослідити вплив комбінування посолу сировини у фарші при традиційному рівні внесення кухонної солі (2,5%) та ферменту при культивуванні *Aspergillus niger*.
- визначити оптимальний рівень введення ферменту залежно від виду сировини в традиційному часі визрівання м'яса протягом 48 годин.

## Виклад основного матеріалу

Вибір заданого рівня введення кухонної солі, тривалості ферментації та проведення процесу в фаршевій системі має на меті максимально наблизити дослідження до реальних умов виробництва та прискорити обмінні процеси у системі [12]. За планом експерименту було сформовано по 5 зразків для ферментації свинини нежирної, яловичини першого сорту, стегової частини м'яса курчат-бройлерів. Кожна група зразків окрім контролю передбачала внесення протеази відповідно 15, 30, 45 та 60 мг/г. Контрольні зразки м'яса не містили додатково внесених ферментів. Усі зразки подрібнювали на вовчку з діаметром решітки 6 мм та перемішували з кухонною сіллю у співвідношенні 1000:25, після чого зразки зберігались при температурі 5 °C протягом 48

годин. В кінці процесу ферментації для зразків визначали наступні функціонально-технологічних показники: рН водної витяжки з м'яса, вміст вологи, вологозв'язувальна (ВЗЗ), вологоутримуюча (ВУЗ) та жируотримуюча (ЖУЗ) здатність м'ясних фаршів.

### Обговорення результатів

У табл. 1 наведено основні параметри експерименту та значення функціонально-технологічних показників досліджуваних зразків.

Таблиця 1 – Основні показники дослідних зразків

Номер зразка	Вид сировини	Частка внесення ферменту, мг/г	рН	Вміст вологи, %	ВЗЗ, %	ВУЗ, %	ЖУЗ, %
КК	М'ясо курчат-бройлерів (стегно)	0	6,55	74,72	73,37	59,80	74,10
1К		15	6,70	77,66	77,54	64,42	76,15
2К		30	6,65	77,12	81,62	62,28	75,92
3К		45	6,55	76,88	83,20	68,12	77,61
4К		60	6,50	79,47	82,45	69,75	76,05
КС	Свинина нежирна	0	5,50	64,72	70,19	64,12	55,22
1С		15	5,55	66,41	73,86	62,90	59,80
2С		30	5,70	66,89	78,11	64,05	60,18
3С		45	5,75	70,02	79,05	65,42	60,24
4С		60	5,90	69,60	78,18	68,89	61,12
КЯ	Яловичина I сорту	0	6,10	65,27	74,10	74,03	54,92
1Я		15	6,15	64,84	71,42	72,42	56,08
2Я		30	5,90	63,82	72,05	70,19	57,15
3Я		45	5,90	65,72	71,23	67,36	59,14
4Я		60	5,90	64,85	70,55	64,81	60,01

Усі дослідні зразки без внесення ферменту мали характерний рівень рН відповідно до виду м'ясної сировини та рівня внесеної кухонної солі. Проте, значення рН для свинини та яловичини було дещо нижчим за середнє для такої сировини (відповідно 5,50 та 6,10), що може бути ознакою відхилення від нормальних процесів автолізу. У зразках з внесенням протеази простежувалась тенденція до стабілізації значення рН відповідно до збільшення концентрації ферменту в системі. Максимальні відхилення значення рН зафіксовані для зразків 1С та 1К, відповідно 5,55 та 6,70. Однак в цілому при використанні протеази в заданих концентраціях суттєвих змін рН не спостерігалось.

Вміст вологи в усіх зразках ферментованого м'ясного фаршу знаходився в межах 60-80% і залежав в першу чергу від виду м'ясної сировини. Максимальне значення вмісту вологи зафіксовано у зразку 4К (79,47%), а мінімальне – у зразку 2Я (63,82 %). Найбільший вплив на вміст вологи досліджувана технологія проявила на зразки на основі свинини – різниця між крайніми значеннями у цій групі становила 5,30 %.

Відповідно до зростання рівня внесення протеази (від 0 до 60 мг/г) кожна група зразків мала позначення від 1 до 4 з вказуванням після цифри літери, що позначала вид м'яса. Відповідно до використовуваної сировини, кожній групі зразків присвоєний літерний індекс: Я – для зразків із яловичини, К – зразки із м'яса курчат-бройлерів, та С – зразки, що містять свинину. Таким чином, наприклад, КК – контрольний зразок на основі м'яса курчат-бройлерів, а 3С – зразок на основі свинини з рівнем введення протеази 45 мг/г.

Вологозв'язувальна здатність для всіх зразків, де в якості основної сировини було використано свинину та м'ясо курчат-бройлерів, при внесенні ферментного препарату була вищою ніж у контролі. При цьому максимальне значення ВЗЗ спостерігалось при концентрації протеази на рівні 45 мг/г. Для ферментованого фаршу з яловичини ефективної зміни значень ВЗЗ порівняно з контролем без внесення протеази не спостерігалось, що вказує на неефективність дії даної протеази на білки яловичого фаршу.

Вологоутримуюча здатність (ВУЗ) в групах зразків на основі м'яса курчат бройлерів та свинини аналогічно до зміни начень ВЗЗ пропорційно залежала від кількості введення протеази. Максимальне значення зафіксовано у зразку 4К – 69,75%.

Для ферментованих зразків яловичого фаршу спостерігалось погіршення значень ВУЗ, порівняно з контролем, при збільшенні концентрації протеази. групи Я (на основі яловичини) можна відмітити обернену залежність значень ВУЗ від концентрації протеази.

Зміна значень жирутримуючої здатності для всіх варіантів ферментованого м'ясного фаршу збільшувалась при збільшенні концентрації протеази в складі фаршу. Однак найбільше це збільшення проявилось для свинини і яловичини, відповідно 5,90% і 5,09%. Для ферментованого м'яса курчат-бройлерів збільшення ЖУЗ було на рівні 3,51%.

З отриманих результатів видно, що яловичина піддається меншому впливу ферментації за умови внесення 2,5% кухонної солі з використанням протеази мікробіологічного походження, продукуючої *Aspergillus niger* та тривалості процесу 48 год при температурі 5°C. Це може бути пояснено більшою часткою в складі яловичини сполучнотканинних білків. Білки яловичини містять набагато більше колагену, який (в свою чергу) містить сульфідні зв'язки, які є більш стійкими до протеолізу під впливом більшості ферментів, окрім специфічних їх видів, таких, як колагеназа.

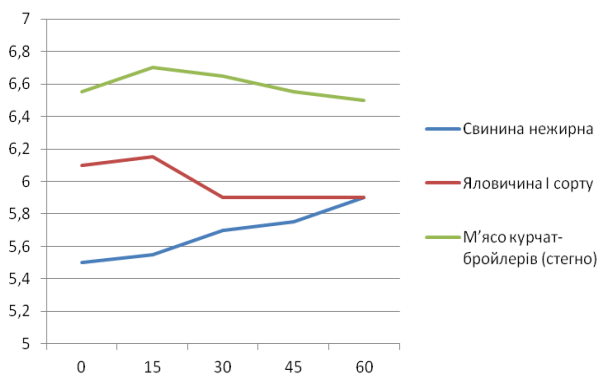


Рис.1 – Залежність значень рН зразків від рівня введення протеази

Слабкий вплив ферменту на яловичину можна пояснити гіпотезою про те, що даний вид протеаз не проявляє мономеризаційної активності відносно сульфідних зв'язків, які наявні у сірковмісних амінокислотах яловичини [13].

З іншого боку, зразки, в рецептурі яких використано м'ясо курчат-бройлерів та свинину проявили прямо пропорційні залежності більшості функціональних характеристик від концентрації протеази в системі.

Різницю у величині відносних змін кількісних значень показників дослідних зразків найбільш чітко можна асоціювати із видом сировини, який складав рецептуру тієї чи іншої групи зразків.

Зразки ферментованої яловичини продемонстрували стабільний рівень функціональних показників. Це виключає негативний вплив внесення протеази даного виду на обрану м'ясну сировину, проте, в практичних умовах ставить під питання доцільність застосування цього ферменту у складі фаршів зі значною часткою яловичини. Проте, одночасно з цим, дана властивість дозволяє при

певних умовах використовувати яловичину в якості регулятора консистенції продукту, комбінуючи її з м'ясом птиці та свининою, які ефективно піддаються впливу протеази мікробіологічного походження. Зважаючи на високу активність протеази, продукуючої *Aspergillus niger* при обробці рослинної сировини (що власне і є її традиційною галуззю застосування), перспективним є пошук ефективних способів комбінування дослідженої м'ясної сировини та рослинних білоквмісних препаратів для моделювання і регулювання текстури м'ясних і м'ясомістких продуктів, в тому числі зі значною часткою сполучнотканинних білків.

Традиційно даний вид протеаз використовується для ферментації білковмісної рослинної сировини - соєвого та пшеничного борошна, а також проявляє активність при коагуляції білків молока. Таким чином, протеаза, що продукується *Aspergillus niger*, може бути використана при виробництві комбінованих продуктів або для створення технологій безвідходного циклу. Проте, до переліку обмежень входять такі сторони питання: слабкий вплив даної протеази на яловичину, сумісність ферментативних процесів при обробці фаршевої системи на основі різних видів сировини (включаючи не лише м'ясу, але й рослинну або на основі молокопродуктів).

Перспектива залучення в якості додаткового джерела амінокислот та регулятора біологічної цінності продуктів молока та продуктів його переробки розкрита в роботах вітчизняних науковців. Зокрема, встановлено та доведено позитивний вплив введення молочної сироватки на показники м'ясних напівфабрикатів [14,15]. Тому, дані питання потребують подальшого дослідження.

## Висновки

З проведених досліджень можна зробити висновки про те, що при використанні в технології м'ясних і м'ясомістких продуктів протеази *Aspergillus niger* необхідно враховувати тип основної м'ясної сировини.

З отриманих результатів можна зробити висновок про те, що протеаза мікробіологічного походження проявляє комплексний вплив на хімічні зв'язки у молекулах білка свинини та м'яса курчат-бройлерів. Даний вид ферментів доцільно використовувати при обробці свинини та м'яса курчат-бройлерів, досягаючи при цьому максимальних технологічних характеристик при посолі кухонною сіллю з внесенням протеази *Aspergillus niger* в кількості 45 мг/г м'ясної сировини.

Подальшого дослідження будуть спрямовані на дослідження застосування протеази *Aspergillus niger* для ферментації м'ясо-рослинних фаршевих систем та можливість синергетичної взаємодії цього ферменту з колагеназою для створення комбінованих продуктів з заданими функціонально-технологічними

показниками з використанням яловичини, свинини і м'яса курчат-бройлерів.

Окремим блоком питань варто розглянути вплив термічної обробки на продукти, отримані після ферментації мікробіологічною протеазою *Aspergillus niger* та реологічні характеристики фаршевих систем такого типу, з використанням різних типів теплового оброблення.

#### Список літератури

1. **York, R.** The meat crisis: developing more sustainable production and consumption / **R. York** / *The Journal of Peasant Studies*. – 2011. – 38:3. – 660-663. – doi: 10.1080/03066150.2011.583814.
2. **Пасичний, В. Н.** Проблема белка или проблема качества пищи / **В. Н. Пасичный** // *Мясной бизнес*. - 2004. - № 2. - Ч. 1. - С. 12-18.
3. **Zdolec, N.** Fermented meat products: health aspects / **Zdolec, N., et al.** CRC Press, 2016, 572 p.
4. **Lücke, F.** Fermented Meat Products—An Overview. Fermented Meat Products: Health Aspects / **Lücke** // CRC Press, 2016, 1-15.
5. **Шведюк, Д. А.** Використання цільової ферментації у технології м'ясомістких продуктів подовженого терміну зберігання / **Д. А. Шведюк, В. М. Пасичний** // *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.
6. **Montanari, C.** Effects of the diameter on physico-chemical, microbiological and volatile profile in dry fermented sausages produced with two different starter cultures / **C. Montanari, et al.** // *Food bioscience*. – 2018. – 22. – 9-18. – doi: 10.3390/nu10101497.
7. **Eom, S.-H.** Texture softening of beef and chicken by enzyme injection process / **S.-H. Eom, et al.** // *Korean journal for food science of animal resources*. – 2015. – 35.4. – 486. – doi: 10.5851/kosfa.2015.35.4.486.
8. **Anandh, M. A.** Effect of Tenderizing Agents on Quality and Organoleptic Characteristics of Traditional Styled Goat Rumen Meat Curry / **M. A. Anandh** // *International Journal of Science, Environment and Technology*. - 2017. – 6, 2. – 1195 – 1201.
9. **Sharma, S.** Application of kiwifruit protease enzyme for tenderization of spent hen chicken / **S. Sharma, D. Vaidya** // *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. – 2018. – 7.1. – 581-584.
10. **Singh, P. K.** Enzymes in the Meat Industry. In: Enzymes in Food Biotechnology / **P. K. Singh, N. Shrivastava, B. K. Ojha** // *Academic Press*, 2019. – 111-128. – doi: 10.1016/B978-0-12-813280-7.00008-6.
11. **Shvedyuk, D.** The influence of a microbiological derived protease on the autolysis process in meat of broiler chickens / **D. Shvedyuk, V. Pasichnyi, O. Moroz, A. Heredchuk.** *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*. – 2018. – 20 (90). – 32-35. – doi: 10.32718/nvlvet9007.
12. **Пасичний, В. М.** Перспективні напрямки виробництва м'ясних та м'ясо-рослинних напівфабрикатів / **В. М. Пасичний** // *М'ясна справа*. - 2008. - № 1. - С. 10-13.
13. National academies of sciences, engineering, and medicine, et al. Nutrient requirements of beef cattle. National Academies Press, 2016.
14. **Ukrainets, A.** Investigation of proteolysis ability of functional destined minced half-finished meat products /

15. **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, V. Pasichnyi, I. Radzievska, Y. Matsuk** // *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*. – 2017 - 19(75). – 129–133. – doi: 10.15421/nvlvet7526.

#### References (transliterated)

1. **York, R.** The meat crisis: developing more sustainable production and consumption. *The Journal of Peasant Studies*, 38:3, 660-663, doi:10.1080/03066150.2011.583814.
2. **Pasichnyi, V. N.** Problema belka yly problema kachestva pyshchy. *Miasnoi byznes*, 2004, 2, Ch. 1, 12-18.
3. **Zdolec, N., et al.** Fermented meat products: health aspects, 2016, 572.
4. **Lücke, F.** Fermented Meat Products—An Overview. Fermented Meat Products: Health Aspects, 2016, 1-15.
5. **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.
6. **Montanari, Chiara et al.** Effects of the diameter on physico-chemical, microbiological and volatile profile in dry fermented sausages produced with two different starter cultures. *Food bioscience*, 2018, **22**: 9-18, doi: 10.3390/nu10101497.
7. **Eom, Sung-Hwan, et al.** Texture softening of beef and chicken by enzyme injection process. *Korean journal for food science of animal resources*, 2015, **35.4**, 486, doi: 10.5851/kosfa.2015.35.4.486.
8. **Anandh, M. Anna.** Effect of Tenderizing Agents on Quality and Organoleptic Characteristics of Traditional Styled Goat Rumen Meat Curry. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 2017, **6, 2**, 1195-1201.
9. **Sharma, Swati, Vaidya, Devina.** Application of kiwifruit protease enzyme for tenderization of spent hen chicken. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2018, **7.1**, 581-584.
10. **Singh, P. K., Shrivastava, N., Ojha, B. K.** Enzymes in the Meat Industry. In: Enzymes in Food Biotechnology. *Academic Press*, 2019, 111-128, doi: 10.1016/B978-0-12-813280-7.00008-6.
11. **Shvedyuk, D., Pasichnyi, V., Moroz, O., Heredchuk, A.** The influence of a microbiological derived protease on the autolysis process in meat of broiler chickens. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*, 2018, **20(90)**, 32-35, doi: 10.32718/nvlvet9007.
12. **Pasichnyi, V. M.** Perspektyvni napriamky vyrobnytstva miasnykh ta miaso-roslynnykh napivfabrykativ. *Miasna sprava*, 2008, **1**, 10-13.
13. National academies of sciences, engineering, and medicine, et al. Nutrient requirements of beef cattle. National Academies Press, 2016.
14. **Ukrainets, A., Pasichnyi, V., Shvedyuk, D., & Matsuk, Y.** Investigation of proteolysis ability of functional destined minced half-finished meat products. *Scientific Messenger of*



*LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*, 2017, 19(75), 129–133, doi: 10.15421/nvlvet7526.  
15. **Shvedyuk, D., Pasichnyi, V., Radzievska, I., & Matsuk, Y**  
Amino acid composition and biological value of meat semi-

finished products with use of plant raw material and protein-fatty emulsions. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*, 2017, 19(80), 111-114, doi: 10.15421/nvlvet8023.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Пасічний Василь Миколайович** – доктор технічних наук, професор, Національний Університет Харчових технологій, професор кафедри Технології м'яса та м'ясних продуктів; м. Київ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3219-1564>; 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; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3219-1564>; e-mail: pasww1@ukr.net.

**Шведюк Дмитро Анатолійович** – аспірант, Проблемна науково-дослідна лабораторія, Національний Університет Харчових технологій, м. Київ; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9591-9364>; e-mail: shvedyuk.d@ukr.net

**Dmytro Shvedyuk** – postgraduate, National University of Food Technologies, Problematic scientific-research laboratory, Kyiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9591-9364>; e-mail: shvedyuk.d@ukr.net.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Шведюк, Д. А.** Вплив протеази мікробіологічного походження на функціонально-технологічні характеристики фаршів на основі різних видів м'ясної сировини / **Д. А. Шведюк, В. М. Пасічний** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 204-209. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.26.

*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", 2019, 5 (1330), 204-209, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.26.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Шведюк, Д. А.** Влияние протеазы микробиологического происхождения на функционально-технологические характеристики фарша на основе различных видов мясного сырья / **Д. А. Шведюк, В. Н. Пасичный** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 204-209. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.26.

**АННОТАЦІЯ** В современных условиях для пищевой индустрии актуальным остается обеспечения высокой биологической ценности продуктов питания, которая определяется доступностью к ассимиляции белка и свободных аминокислот, в том числе и для мясopодуктов. Эту актуальность обуславливают недостаточность сырьевых ресурсов, обший уровень потребления полноценных белков населением мира и Украины в частности, что определяет необходимость поиска эффективных способов ресурсосбережения и внедрение безотходных технологий. В статье приведены сравнительное исследование функционально-технологических характеристик фарша на основе различных видов мясного сырья (мяса бедра цыплят-бройлеров, свинина полужирная и говядина первого сорта), прошедшие предварительную ферментацию протеазой микробиологического происхождения (*Aspergillus niger*) в течение 48 ч при температуры 5°C и при концентрации поваренной соли 2,5% от массы основной мясного сырья. В полученных образцах были определены основные физико-химические показатели для установления различий влияния протеазы на различные виды мясного сырья. Слабое влияние фермента на говядину можно объяснить гипотезой о том, что данный вид протеаз не проявляет мономеризационной активности в отношении сульфидных связей, которые имеются в серосодержащих аминокислотах говядины. С другой стороны, образцы, в рецептуре которых использовано мясо цыплят-бройлеров и свинину проявили прямо пропорциональную зависимость от большинства функциональных характеристик и от концентрации протеазы в системе. Разницу в величине относительных изменений количественных значений показателей опытных образцов наиболее четко можно ассоциировать с видом сырья, который составлял рецептуру той или иной группы образцов. В результате исследований данный режим обработки признано рациональным для свинины и мяса цыплят-бройлеров и установлены оптимальные уровни введение фермента.

**Ключевые слова:** микробиологические протеазы; ферментация; свинина; технология мясoсодержащих продуктов; мясо цыплят-бройлеров

*Поступила (received) 02.03.2019*

УДК 621.3.048

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.27

## ВИВЧЕННЯ ДЕЯКИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РУЙНУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВКОВИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ ПІД ВПЛИВОМ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В УМОВАХ ОБМЕЖЕННЯ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ

А. П. МАЛЮШЕВСЬКА\*, С. О. ТОПОРОВ, О. Я. ДМИТРИШИН

Відділ високовольтних імпульсних конденсаторів, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв, УКРАЇНА

\*e-mail: ninutsa@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Робота присвячена дослідженню процесу електричного старіння і руйнування полімерних діелектричних плівок. Показано, що пробій твердих полімерних діелектриків під дією електричного поля не є критичною подією, а є процесом, що розвивається у часі та проявляється у накопиченні дефектів в матеріалі. Розділяються умови навантаження електричним полем, в яких протікає старіння полімерів, показано, що старіння під дією електричного поля навіть в умовах обмеження часткових розрядів є неминучим явищем. Для мінімізації впливу часткових розрядів та задля запобігання електричної ерозії полімеру запропоновано просту методику їх обмеження, яка передбачає зменшення області полімерної плівки, що підпадає під дію електричного поля та занурення зразків у діелектричну рідину з метою виключення можливості виникнення поверхневих розрядів. Розглядаються результати експерименту з перевірки гіпотези про оборотність змін, що відбуваються в полімерних плівках під впливом електричного поля в умовах обмеження часткових розрядів. Виявлено, що можливий такий вплив електричного поля протилежної полярності на полімерний діелектрик, що дозволяє частково відновити його погіршені ізоляційні властивості. Висунуто гіпотези щодо механізму явища регенерації за рахунок компенсації процесів накопичення об'ємних зарядів в полімері. Обговорюються можливі шляхи підвищення працездатності електротехнічних пристроїв, що мають в конструкції діелектрика полімерні плівки шляхом додаткової дії на діелектрик електричних полів протилежної полярності. Намічено шляхи подальших теоретичних та практичних досліджень електричного старіння та пробію твердих полімерних діелектриків.

**Ключові слова:** полімерні плівки; електричне старіння; пробій твердих діелектриків; довговічність.

## STUDY OF CERTAIN REGULARITIES OF POLYMERIC DIELECTRIC FILM'S DESTRUCTION UNDER THE INFLUENCE OF ELECTRIC FIELD AT PARTIAL DISCHARGES LIMITATION

A. MALIUSHEVSKA, S. TOPOROV, O. DMITRISHIN

Highvoltage pulse capacitor department, Institute of Pulse Processes and Technologies NAS of Ukraine, Mykolaiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The paper is devoted to the electrical aging, destruction and breakdown of polymer dielectric films. The necessity of partial discharges' limitation is explained because they are the main reason of film aging from electroerosion. It is shown that the necessary condition for the breakdown of a polymer film of micron thickness under the electric field influence is the formation of a cavity with a reduced density in a homogeneous polymer material, thus a pre-breakdown phenomena develops in this cavity. Possible ways of such a cavities' formation under the influence of strong electric field are discussed. A technically simple and reliable method for partial discharges limiting is described. It implies diminution of polymeric volume, subjected to electric field influence, and limitation of surface discharges due to film samples' immersion in dielectric liquid. The aim of study – is the hypothesis of destructive events in film polymer dielectric reversibility's verification. The results of an experiment, testing the hypothesis of the reversibility of changes, occurring in polymer films under the influence of an electric field under the conditions of partial discharges limitation, are considered. It is established that the action of a constant electric field on film samples, at conditions when the influence of partial discharges have been minimized, reduces the longevity of polymer in the case of the subsequent action of the field with the same polarity, but their longevity increases by the electric field's of opposite polarity action. Possible mechanisms of conditions' formation for the polymeric dielectrics breakdown under the action of an electric field (at conditions of partial discharges suppression) are discussed. Certain ways of increasing the efficiency and reliability of electrical devices that have polymer films as a dielectric are proposed. The further researches area is outlined.

**Keywords:** polymer films; electric aging; breakdown of solid insulator; longevity.

### Вступ

Історія вивчення процесів електричного старіння полімерних діелектриків налічує багато десятиліть. Зміни під впливом електричного поля механічних і електричних властивостей полімерів детально вивчалися в умовах, коли не приймалося

спеціальних заходів для обмеження часткових розрядів, тобто розрядів у газових включеннях всередині ізоляції, проміжках між зразком і електродами, а також поверхневих розрядів. Відомо, що в результаті ерозії, що виникає в полімерному матеріалі під впливом часткових розрядів, відбувається поступове руйнування досліджуваних

зразків, що і призводить до пробою. Закономірності електричного старіння полімерних діелектриків при впливі часткових розрядів були узагальнені і систематизовані в ряді монографій вчених зі світовим ім'ям: Г.С. Кучинського, С.Н. Ліжкового, А.Н. Цикіна, Б.І. Сажіна, L.A. Dissado, J.C. Fothergill. Разом з тим завжди існував також інтерес до вивчення електричної міцності твердих органічних діелектричних матеріалів в умовах виключення шкідливого впливу часткових розрядів. З плином часу вдосконалення технологій виготовлення полімерних ізоляційних матеріалів, просочуючих рідин для плівкових діелектричних систем і виробів з цих компонентів дозволили істотно зменшити можливість виникнення часткових розрядів в діелектрику в процесі експлуатації, і це підсилює інтерес до електричного руйнування полімеру, не пов'язаного з впливом електричної ерозії. При цьому полімерні діелектричні плівки товщиною близько десятків мікрометрів, що широко використовуються, наприклад, в силовому конденсаторобудуванні, можна розглядати як найбільш зручні об'єкти досліджень електричного старіння і пробою полімерів, не пов'язаного з частковими розрядами, тим більше, що силові конденсатори є електротехнічними пристроями, напруженість електричного поля в яких сягає значних величин (до 200 – 300 МВ/м).

#### Аналіз останніх досліджень

Науково - дослідні роботи [1-6] доводять, що обмеження інтенсивності часткових розрядів веде до істотного зростання електричної міцності полімерних діелектричних матеріалів, але руйнування полімерного діелектрика під дією суто електричного поля залишається неминучим. Такі результати досліджень дали підставу припустити, що електричне руйнування полімерів при обмеженні часткових розрядів не є критичною подією, що відбувається при досягненні певної напруженості поля, а є процесом, який розвивається в часі та характеризується часом накопичення дефектів або часом життя полімерного зразка в електричному полі. Літературні дані дозволяють думати, що при практично повному обмеженні часткових розрядів в полімерах під дією електричного поля відбувається поступова зміна структури і властивостей матеріалу, яка закінчується пробоем. При реалізації будь-якого механізму пробою (теплового, електричного або електромеханічного) твердого полімерного діелектрика необхідною умовою розвитку пробійних явищ є наявність або поява під дією зовнішніх впливів порожнини з пониженою густиною [7,8]. На стадії підготовки пробою (наприклад, за електричним механізмом), що визначає довговічність полімерного зразка в електричному полі, відбувається утворення порожнини або розпушеної області полімеру, в якій накопичується об'ємний заряд і стає можливою

ударна іонізація молекул та виникнення електронних лавин. Виникнення пороподібних або розпушених областей зі зниженою щільністю в умовно однорідних полімерах можливе тільки в результаті розриву макромолекул, але єдиної точки зору на можливий механізм утворення розривів під дією електричного поля поки що не вироблено.

Тобто, пробій плівкового полімерного зразка під дією електричного поля є актом, що завершує процеси, які розвиваються в навантаженому об'єкті і готують настання макроскопічної втрати суцільності [9-12].

#### Мета роботи

Була експериментальна перевірка гіпотези щодо оборотності (незворотності) руйнівних змін в плівковому полімерному діелектрику, що виникли під дією електричного поля за умов заглушення часткових розрядів.

#### Методика експерименту

Час, за який відбуваються зміни, що призводять до втрати стійкості об'єкта до дії навантаження, прийнято називати довговічністю, у випадку навантаження полімерних плівок електричним полем говорять також про час очікування пробою або час життя зразка.

Міра виявлення оборотності накопичувальних процесів в кінетиці руйнування плівкового полімеру під дією електричного поля вивчалася на прикладі аморфно-кристалічної полярної неорієнтованої поліетилентерефталатної (ПЕТФ) плівки 15 мкм завтовшки, яка знайшла широке використання в електротехнічних пристроях, зокрема високовольтних імпульсних конденсаторах. Товщина сухих зразків плівки визначалася відповідно до ГОСТ 17035-86 "Пластмассы. Методы определения толщины пленок и листов" по вибірці 10 зразків з 100. Експеримент проводився на основі очевидного підходу – порівняння результатів вимірювання довговічності при односпрямованій дії навантаження з результатами вимірювання довговічності при зміні напрямку дії навантаження. При цьому враховували, що висока швидкість руйнування полімерів під дією часткових розрядів, у всякому разі в постійному полі, може мати місце тільки при наявності досить великих пор або значних просвітів. Очевидно, що виключити появу часткових розрядів в обсязі матеріалу або, принаймні, значно зменшити їхню інтенсивність, простіше всього, якщо використовувати як об'єкти випробування саме плівкові полімерні діелектрики товщиною в кілька мікрометрів. Істотно зменшити ймовірність потрапляння пори в міжелектродний проміжок можна також за рахунок зменшення площі електрода, у межах якої зберігається висока напруженість електричного поля, мала. Відповідно,

малим  $\epsilon$  і обсяг полімеру, у якому можливий пробій, тому що мала також імовірність потрапляння великої пори або дефекту плівки в цей "небезпечний" обсяг. При проведенні електричних випробувань зразків полімерної діелектричної плівки використовувалися електродні системи типу "сфера-сфера". Як сферичні електроди використовувалися латунні кулі діаметром 5 мм, відполіровані до 12 - 14 класу точності. Якщо розташувати таку електродну систему, із установленим у ній зразком плівки, у рідкому діелектрику, наприклад, трансформаторній оливі, можна повністю усунути крайові розряди. Довговічність зразків полімерної плівки визначалася за допомогою високовольтного апарату АИИ-70 ТУ 25-06-1769-76, що забезпечує лінійне підвищення випрямленої напруги, реєстрація значення напруги пробою (Uпр) проводилася за допомогою кіловольтметра електростатичного С196 ТУ 25-04-130-79, довговічність (час життя) зразків полімерної плівки до пробою фіксувався за допомогою секундоміра. При вивченні довговічності полімерів (як, власне, і інших електротехнічних матеріалів) спостерігається значний розкид значень довговічності для ідентичних зовні зразків при збереженні однакових умов навантаження, тому при обробці результатів використовувалися методи математичної статистики. Описуваний експеримент проводився на партіях плівкових зразків з 30 штук кожна. Кожний зразок піддавався впливу електричного поля напруженістю 333 МВ/м.

### Результати і обговорення

На рис. 1 представлена інтегральна функція розподілу зразків за довговічністю  $1-N''/N=f(\lg(\tau))$ , де  $N$  - повне число зразків серії,  $N''$  - число зразків, які залишилися неушкодженими після витримки під навантаженням протягом часу  $\tau$ .

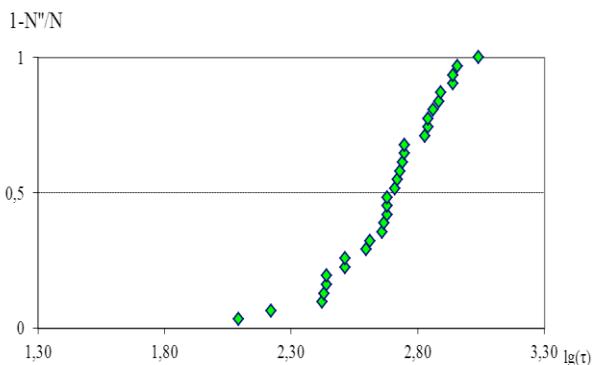
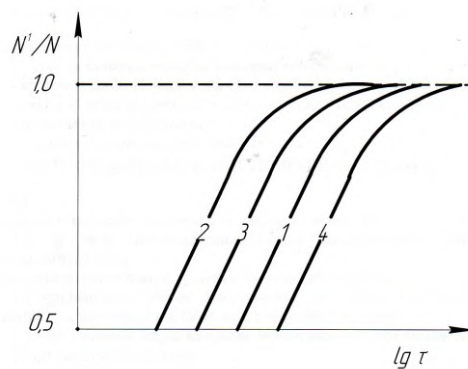


Рис. 1 – Розподіл за довговічністю для зразків плівки ПЕТФ в електричному полі ( $E=333$  МВ/м)

Графік функції очікувано наближається до S-подібної форми. Форма розподілу близька до нормального розподілу випадкових величин, ширина

розподілу обумовлена, певно, варіацією структури і дефектності зразків, мікроспорсткістю електродів і т. ін. За отриманими даними визначався час  $\tau''$ , що відповідає руйнуванню половини зразків, у даному випадку він склав 456 с.

Потім бралися ще дві партії (по 30 шт) таких же зразків і витримувалися при такій же напруженості (333 МВ/м) протягом часу  $\tau''$  (456 с), після чого навантаження знімалося. В результаті залишалася не зруйнованою половина зразків партії, з якими проводили подальші операції. Хід аналізу експериментальних даних пояснює схема на рис. 2.



- 1 – розподіл за довговічністю для зразків, які не зруйновані (не пробиті) після впливу електричного поля протягом  $\tau''$ ;
- 2 – крива 1, перебудована в координатах  $\lg(\tau - \tau'')$  – розподіл за довговічністю для зразків, що не піддаються регенерації;
- 3 – розподіл за довговічністю для зразків, що частково регенерували за час переривання навантаження;
- 4 – розподіл за довговічністю для зразків, в яких в результаті дії, що виконані за час переривання навантаження, відбулися зміцнюючі зміни

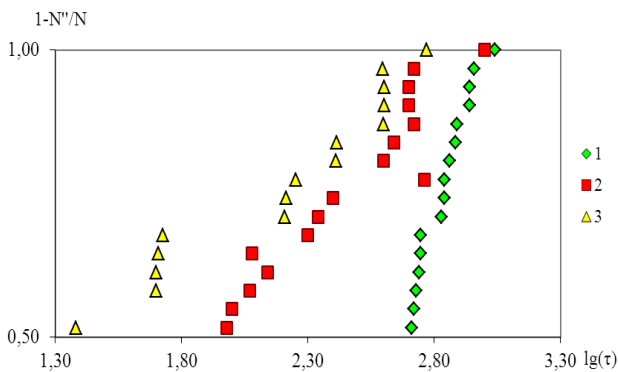
Рис. 2 – Схема розподілу зразків за довговічністю

Криву 1 приймаємо за опорну, таку, що відповідає розподілу зразків з довговічністю більше, ніж  $\tau''$ , власне це верхня частина розподілу з рис. 1. Якщо після витримки під впливом електричного поля і зняття напруги накопичені в плівці дефекти зберігаються – після повторного включення навантаження тієї ж величини і знаку розподіл решти зразків повинен пройти лівіше кривої 1. Повний відсутності відновлення за час перерви відповідає перебудована в координатах  $\lg(\tau - \tau'')$  крива 1 - крива 2 на рис. 2. Якщо за час перерви дії електричного поля сталася часткова регенерація, то розподіл по вторинній довговічності має пройти між кривими 1 і 2 (крива 3), у разі повного відновлення початкового стану зразків за час перерви криві 1 і 3 співпадуть. І, нарешті, якщо в результаті якої-небудь дії на зразки в перерві відбудуться зміцнюючі зміни, то розподіл по вторинній довговічності повинен пройти правіше опорної кривої – крива 4.

Під час перерви (тривалістю 240 с) одна партія зразків (30 шт.) не піддавалась ніякому впливу, а інша партія (30 шт.) піддавалась впливу електричного поля,

такого ж за модулем (333 МВ/м), але протилежного за напрямом (протипололя).

На рис. 3 наведені результати експерименту з перериванням дії електричного поля на зразок без будь-якого додаткового впливу в перерві. Близькість кривих 2 і 3 свідчить про те, що за час первинного впливу на зразки в них накопичилися зміни (дефекти), які збереглися під час перерви і привели згодом до зниження вторинної довговічності.



- 1 – розподіл за довговічністю для зразків, які зруйновані за час, більший  $\tau''$  (опорна крива);
- 2 – експериментальний розподіл зразків за довговічністю після перерви (240 с);
- 3 – розрахунковий розподіл зразків за довговічністю по  $\lg(\tau-\tau'')$

Рис. 3 – Розподіл зразків плівки ПЕТФ за довговічністю ( $E=333$  МВ/м,  $\tau'' = 456$  с), додатковий вплив під час перерви відсутній

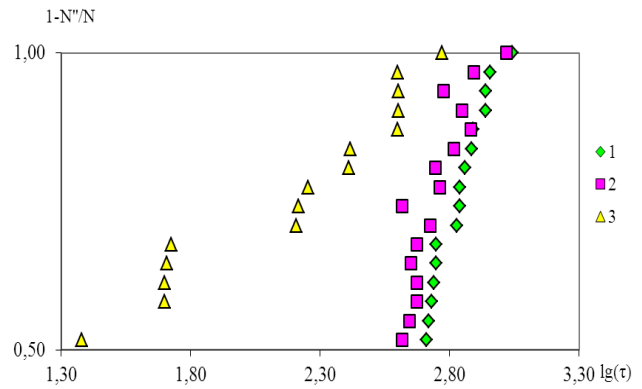
На рис. 4 представлено результати експерименту з перериванням впливу електричного поля на зразки та накладанням на них у перерві електричного поля, протилежного за напрямом (протипололя).

Зсувнення кривої 2 до кривої 1 в даному випадку свідчить про збільшення вторинної довговічності зразків, підданих впливу електричного поля, протилежного за напрямом первісному. Згідно вищевикладеної схеми аналізу експериментальних даних – це відповідає частковій регенерації дефектів, що накопичилися в зразках.

Отриманні в експерименті данні з руйнування плівкових полімерних матеріалів під дією електричного поля за умов обмеження часткових розрядів в частині можливості регенерації змін, накопичення яких призводить до пробою, дозволяють зробити припущення про характер таких змін. Можливо, що всі зміни у такому випадку відбуваються на електронному рівні та не торкаються макромолекулярних явищ (перегрупування молекул, розрив міжмолекулярних зв'язків, тощо).

Найбільш природнім для полімеру, що знаходиться під дією електричного поля, здається формування в полімері об'ємних зарядів. Об'ємний

заряд формується як за рахунок інжектіваних з поверхні електродів електронів, так і за рахунок іонізації макромолекул полімера в сильному електричному полі з переходом електронів від макромолекул в міжмолекулярні пастки. За умов досягнення зарядами граничної величини і виникає пробій.



- 1 – розподіл за довговічністю для зразків, які зруйновані за час, більший  $\tau''$  (опорна крива);
- 2 – експериментальний розподіл за довговічністю для зразків, які протягом перерви (240 с) були піддані впливу протипололя  $E = 333$  МВ/м;
- 3 – розрахунковий розподіл зразків за довговічністю по  $\lg(\tau-\tau'')$

Рис. 4 – Розподіл зразків плівки ПЕТФ за довговічністю ( $E = 333$  МВ/м,  $\tau'' = 456$  с), у перерві – вплив протипололя тієї ж напруженості

Подальші дослідження доцільно спрямувати в область вивчення можливості регенерації полімерних плівок, що були піддані впливу електричного поля, за рахунок дії інших полів, наприклад, теплового. Крім того, довгострокові дослідження необхідно присвятити проясненню механізму утворення об'ємних зарядів в плівкових діелектриках та методів запобігання такому явищу. Деталізація електронних процесів, що готують пробій полімерів також є важливим завданням подальших досліджень.

## Висновки

Таким чином, витримка зразків плівки в постійному електричному полі знижує їх довговічність у разі подальшої дії поля тієї ж полярності, і підвищує довговічність при подальшому впливі на зразки електричного поля протилежної полярності. Питання оборотності змін, які готують порушення суцільності плівки під впливом електричного поля, є цікавим як в науковому, так і в практичному плані.

Спостереження, які обговорено в роботі, дозволяють більш детально судити про елементарні процеси, які готують руйнування, та є непрямими

підтвердженнями гіпотези про формування в полімерному діелектрику об'ємних зарядів. У прикладному аспекті глибоке дослідження явища регенерації дефектів, що накопичуються у полімерних плівках електротехнічного призначення під дією електричного поля за умов відсутності часткових розрядів, може стати основою для методу підвищення працездатності електротехнічних конструкцій.

#### Список літератури

1. Ушаков, В. Я. Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции / В. Я. Ушаков. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 152 с.
2. Shibuya, J. Formation and Electrical Breakdown in Epoxy Resin / J. Shibuya, S. Zoledovsri, J. N. Colderwood // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. – 1977. – V. 96, № 1. – P. 198 – 207. – doi: 10.1109/t-pas.1977.32320.
3. Zebouchi, N. Thermoelectronic breakdown with pressure and space charge effects in polyethylene / N. Zebouchi, T.G. Hoang, Ai. Bui // *Journal of Applied Physics*. – 1997. – V. 81, № 5. – P. 2363 – 2369. – doi: 10.1063/1.364241.
4. Lewis, T. J. The Role of Electrodes in Conduction and Breakdown Phenomena in Solid Dielectrics / T. J. Lewis // *IEEE Transactions on Electric Insulation*. – 1984. – V. EI-19, № 3. – P. 210 – 216. – doi: 10.1109/TEI.1984.298749.
5. Малюшевська, А. П. Довготривала електрична міцність полімерних плівок під дією електричного поля / А. П. Малюшевська, В. І. Гунько, С. О. Топоров // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2017. – № 1. – С. 12 – 17. – doi: 10.15588/1607-6761-2017-1-2.
6. Малюшевська, А. П. Вплив складу і морфології конденсаторних полімерних плівок на термостабільність їх короткочасної електричної міцності / А. П. Малюшевська, С. О. Топоров // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2016. – № 1. – С. 18 – 24.
7. Бережанский, В. Б. Предельные характеристики емкостных накопителей энергии с пленочными полимерными диэлектриками / В. Б. Бережанский, В. В. Городов, В. А. Закревский, В. И. Рудь // *Електротехніка*. – 1990. – № 7. – С. 27 – 30.
8. Ушаков, В. Я. Закономерности разрушения полимеров при длительном нагружении электрическим полем / В. Я. Ушаков, А. Л. Робежко, Г. В. Ефремова // *Физика твердого тела*. – 1984. – Т. 26, № 1. – С. 45 – 49.
9. Liufii, D. High-field induced electrical aging in polypropylene films / D. Liufii, X. S. Wang, D. M. Tu, K. C. Kao // *Journal of Applied Physics*. – 1998. – V. 83, №4. – P. 2209 – 2214. – doi: 10.1063/1.366958.
10. Tanaka, T. Space Charge Injected via Interfaces and Tree Initiation in Polymers / T. Tanaka // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2001. – V.8, №5, P. 733 – 743. – doi: 10.1109/94.959692.
11. Hajjiannis, A. Space Charge Formation in Epoxy Resin Including Various Nanofillers / A. Hajjiannis, G. Chen, C. Zhang, G. Stevens // *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. – 2008. – doi: 10.1109/ceidp.2008.4772898.
12. Vitellas, S. Mechanism of degradation and breakdown in PET films under high intensity AC fields / S. Vitellas, K. Theodosiou, I. Gialas, D. P. Agoris // *The European*

*Journal of Applied Physics*. – 2005. – V.30, № 2. – doi: 10.1051/epjap:2005013.

#### References (transliterated)

1. Ushakov, V. Ya. Elektricheskoe starenie i resurs monolitnoy polimernoy izolyatsii [Electrical aging and service life of polymeric insulation]. Moscow, Energoatomizdat Publ, 1988, 152.
2. Shibuya, J., Zoledovsri, S., Colderwood, J. N. Formation end Electrical Breakdown in Epoxy Resin. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1977, 1(96), 198-207, doi: 10.1109/t-pas.1977.32320.
3. Zebouchi, N., Hoang, T.G., Bui, Ai. Thermoelectronic breakdown with pressure and space charge effects in polyethylene. *Journal of Applied Physics*, 1997, 5(81), 2363-2369, doi:10.1063/1.364241.
4. Lewis, T. J. The Role of Electrodes in Conduction and Breakdown Phenomena in Solid Dielectrics. *IEEE Transactions on Electric Insulation*, 1984, 3 (EI-19), 210-216, doi: 10.1109/TEI.1984.298749.
5. Malushevska, A. P., Gunko, V. I., Toporov, S. O. Dovgotrivala elektrichna mitsnist polimernih plivok pid dieyu elektrichnogo polya [Long-term electrical strength of polymer films under the electrical field influence]. *Elektrotehnika ta elektroenergetika [Electrical engineering & Electroenergetics]*, 2017, 1, 12 – 17, doi:10.15588/1607-6761-2017-1-2.
6. Malushevska, A. P., Toporov, S. O. Vpliv skladu i morfologiyi kondensatornih polimernih plivok na termostabilnist yih korotkochasnoyi elektrichnoyi mitsnosti [Composition and morphology of capacitor polymer films' influence on the thermostability of their short-term electric strength]. *Elektrotehnika ta elektroenergetika [Electrical engineering & Electroenergetics]*, 2016, 1, 18 – 24.
7. Berezanskiy, V. B., Gorodov, V. V., Zakrevskiy, V. A., Rud, V. I. Predelnyie harakteristiki emkostnyih nakopiteley energii s plenochnyimi polimernymi dielektrikami [Ultimate characteristics of capacitive energy storages with film polymeric dielectrics]. *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, 1990, 7, 27 – 30.
8. Ushakov, V. Ya., Robezhko, A. L., Efremova, G. V. Zakonomernosti razrusheniya polimerov pri dlitelnom nagruzhennii elektricheskim polem [Regularities of polymer destruction at long-term electric loading]. *Fizika tverdogo tela [Physics of solid state]*, 1984, 1(26), 45 – 49.
9. Liufii, D., Wang, X. S., Tu, D. M., Kao, K. C. High-field electrical aging in polypropylene films. *Journal of Applied Physics*, 1998, 4(83), 2209-2214, doi: 10.1063/1.366958.
10. Tanaka, T. Space Charge Injected via Interfaces and Tree Initiation in Polymers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2001, 5(8), 733 – 743, doi: 10.1109/94.959692.
11. Hajjiannis, A., Chen, G., Zhang, C., Stevens, G. Space Charge Formation in Epoxy Resin Including Various Nanofillers. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2008, doi: 10.1109/ceidp.2008.4772898.
12. Vitellas, S., Theodosiou K., Gialas I., Agoris, D. P. Mechanism of degradation and breakdown in PET films under high intensity AC fields. *The European Journal of Applied Physics*. 2005, 2(30), doi: 10.1051/epjap:2005013.



### Відомості про авторів (About authors)

**Малюшевська Антоніна Павлівна** – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, відділ високовольтних імпульсних конденсаторів, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0703-6105>; e-mail: [ninutsa@ukr.net](mailto:ninutsa@ukr.net).

**Antonina Maliushevska** – Ph. D., Docent, senior staff scientist, Department of High-voltage Pulse Capacitors, Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0703-6105>; e-mail: [ninutsa@ukr.net](mailto:ninutsa@ukr.net).

**Топоров Сергій Олегович** – провідний інженер, відділ високовольтних імпульсних конденсаторів, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5188-7380>; e-mail: [dphc@iipt.com.ua](mailto:dphc@iipt.com.ua).

**Serhij Toporov** – leading engineer, Department of High-voltage Pulse Capacitors, Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5188-7380>; e-mail: [dphc@iipt.com.ua](mailto:dphc@iipt.com.ua).

**Дмитришин Олексій Ярославович** – молодший науковий співробітник, відділ високовольтних імпульсних конденсаторів, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2420-9223>; e-mail: [dphc@iipt.com.ua](mailto:dphc@iipt.com.ua).

**Oleksiy Dmytrishyn** – junior staff scientist, Department of High-voltage Pulse Capacitors, Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2420-9223>; e-mail: [dphc@iipt.com.ua](mailto:dphc@iipt.com.ua).

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Малюшевська, А. П.** Вивчення деяких закономірностей руйнування полімерних плівкових діелектриків під впливом електричного поля в умовах обмеження часткових розрядів / **А. П. Малюшевська, С. О. Топоров, О. Я. Дмитришин** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1321). – С. 210-215. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.27.

*Please cite this article as:*

**Maliushevska, A., Toporov, S., Dmytrishyn O.** Study of certain regularities of polymeric dielectric film's destruction under the influence of electric field at partial discharges limitation. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1321), 210-215, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.27.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Малюшевская, А. П.** Изучение некоторых закономерностей разрушения полимерных пленочных диэлектриков под воздействием электрического поля в условиях ограничения частичных разрядов / **А. П. Малюшевская, С. О. Топоров, А. Я. Дмитришин** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1321). – С. 210-215. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.27.

**АННОТАЦИЯ** Работа посвящена исследованию процесса старения и разрушения полимерных диэлектрических пленок под воздействием электрического поля. Обсуждаются условия пробоя твердых полимеров в части формирования области пониженной плотности в материале. Показана необходимость разделения процесса старения пленок под воздействием частичных разрядов, влекущих за собой электрическую эрозию, и процесса старения и последующего пробоя твердых полимеров в результате влияния собственно электрического поля на полимер. Предложена методика эксперимента, позволяющая ограничить частичные разряды, возникающие в полимерных пленочных диэлектрических пленках. Методика подразумевает одновременное ограничение области полимера, подверженной воздействию сильного электрического поля и снижение вероятности развития поверхностных разрядов за счет погружения пленочных образцов в диэлектрическую жидкость. Рассматриваются результаты эксперимента по проверке гипотезы об обратимости изменений, происходящих в полимерных пленках под воздействием электрического поля в условиях ограничения частичных разрядов. При воздействии на полимерный диэлектрик противоположно наблюдается повышение долговечности пленочных образцов. Выдвинута гипотеза о природе изменений в полимере, происходящих под воздействием электрического поля в отсутствие частичных разрядов. Обсуждаются возможные пути повышения работоспособности электротехнических устройств, имеющих в качестве диэлектрика полимерные пленки. С учетом полученных результатов намечены пути развития теоретических и практических исследований в области электрического старения полимерных пленок.

**Ключевые слова:** полимерные пленки; электрическое старение; пробой твердых диэлектриков; долговечность.

Надійшла (received) 20.02.2019

## ЗМІСТ

## ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

<i>Бошкова І. Л., Волгушева Н. В., Солодка А. В., Бошков Л. З.</i> Методика теплового розрахунку теплоутилізатора з щільним шаром гранульованого матеріалу	3
<i>Довгополов А. Ю., Некрасов С. С., Жигилій Д. О.</i> Моделювання напружено-деформованого стану роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів методом СЕА	10
<i>Іорданов І. В., Сімонова Ю. І., Петренко А. В., Положій А. В., Подкопачев С. В., Довгаль В. Ю., Король А. В.</i> Дослідження на моделях стійкості порід покрівлі вугільного пласта при дії динамічних навантажень	17
<i>Князєва В. М., Канюк Г. І., Мезеря А. Ю., Андрєєв О. В.</i> Аналіз нормативних документів щодо забезпечення ефективної роботи насосних установок магістральних нафтопроводів	27
<i>Кожушко А. П.</i> Аналіз конструктивних особливостей причіпних та напівпричіпних цистерн у складі машинно-тракторного агрегату	34
<i>Кусий Я. М., Топільницький В. Г.</i> Вплив розміщення елементів конструкції на формування технологічних пошкоджень виливка	41
<i>Лухтура Ф. І., Медведєва М. В.</i> Про застосування імпульсної подачі робочого середовища в системі водопостачання	48
<i>Тарасова В. О., Кузнецов М. О., Харлампіді Д. Х.</i> Система моніторингу та діагностики енергетичної ефективності теплонасосної установки	58
<i>Черняк О. М., Тріщ Р. М., Денисенко А. М.</i> Методика оцінювання шкідливих чинників, які впливають на здоров'я робітників машинобудівного підприємства	70
<i>Яким Р. С., Сліпчук А. М.</i> Оцінка надійності та критерії підвищення якості вставного породоруйнівного оснащення тришаршкових бурових доліт для буріння особливо міцних порід	77

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

<i>Дашкевич А. О., Воронцова Д. В., Скоробогатко М. В.</i> Алгоритм пошуку стійких відповідностей пар ключових точок на зображеннях та картах глибини	86
<i>Кодола Г. М., Волинець Н. С., Сербулова І. В.</i> Автоматизоване тестування веб-додатків з різнорівневою архітектурою	91
<i>Становська І. І., Герганов М. Л., Гур'єв І. М.</i> Моделювання процесів навантаженої реконструкції мережі придорожніх вагових комплексів	101

## ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ

<i>Авіна С. І., Гринь Г. І.</i> Дослідження впливу технологічних параметрів на вихід ціаністого водоводу	109
<i>Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Кайдалов Р. О., Шаповал О. М.</i> Технології інженерії поверхонь деталей силових установок автомобільної та бронетанкової техніки	115
<i>Кривільова С. П., Власенко В. В., Цвіркун Д. О.</i> Боротьба з промисловим пилом при виробництві цементу як фактор суттєвого зниження негативного впливу цементних заводів на довкілля	124
<i>Мельник Ю. Р., Старчевський Р. О., Мельник С. Р.</i> Трансестерифікація тригліцеридів етанолом у оксидів металів	132
<i>Михайленко В. Г., Лук'янова О. І., Гіль З. П.</i> Отримання окислювачів з використанням фізичних полів	139
<i>Миколенко С. Ю., Царук Л. Ю., Чурсінов Ю. О.</i> Вплив продуктів переробки амаранту і чаї на якість хліба	145
<i>Сова Н. А., Луценко М. В., Лобанова А. О., Грекова Н. В.</i> Використання конопляної олії у технології майонезу	152
<i>Тищенко В. І., Божко Н. В., Пасічний В. М.</i> М'ясомісткі комбіновані продукти з м'ясом качки та сріблястого карася	160
<i>Хохотва О. П., Маслянка К. С.</i> Сорбція міді й нікелю фосфорильованими сорбентами в статичних умовах	169
<i>Цихановська І. В., Євлаш В. В., Хамітова Б. М., Уразбаєва К. А., Александров О. В., Кайда Н. С.</i> Вплив харчової добавки "магнетофуд" на структурно-механічні властивості формового желейного мармеладу з різними структуроутворювачами	175
<i>Чорний О. О., Кондратов С. О., Олійников Д. С.</i> Розробка композиційних полімерних матричних таблеток із заданим часом вивільнення ізосорбиду динітрату методом математичного моделювання	187
<i>Чулєєва О. В., Золотарьов В. М.</i> Дослідження впливу інгредієнтів на електрофізичні властивості	197

наномодифікованих пожежобезпечних полімерних композицій з дигідратами оксиду магнію

**Шведюк Д. А., Пасічний В. М.** Вплив протеази мікробіологічного походження на функціонально-технологічні характеристики фаршів на основі різних видів м'ясної сировини 204

#### ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕМС ТА БЛИСКАВКОЗАХИСТ

**Малюшевська А. П., Топоров С. О., Дмитрішин О. Я.** Вивчення деяких закономірностей руйнування полімерних плівкових діелектриків під впливом електричного поля в умовах обмеження часткових розрядів 210

## CONTENTS

### ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

- Boshkova I., Volgusheva N., Solodka A., Boshkov L.** Method of thermal calculation of a heat exchanger with a dense layer of granulated material 3
- Dovgopolog A., Nekrasov S., Zhyhlyi D.** Strain-stress states simulation of detachable joint for reinforced composites by FEM 10
- Jordanov I., Simonova Y., Petrenko A., Polozhiy A., Podkopaiev S., Dovgal V., Korol A.** Research on models of stability of rocks of the roof of coal stray during dynamic loads 17
- Kniazieva V., Kanyuk G., Mezerya A., Andreev A.** Analysis of normative documents for ensuring efficient work of pumped installations of main oil pipelines 27
- Kozhushko A.** Analysis of design features trailed and semitrailer tanks as part of the machine-tractor unit. 34
- Kusy J. Topilnytsky V.** Influence of structural components placement on casting technological damages formation 41
- Lukhtura F., Medvedieva M.** On the application of pulsed supply of working environment in water supply systems 48
- Tarasova V., Kuznetsov M., Kharlampidi D.** Heat pump energy efficiency monitoring and diagnostic system 58
- Cherniak O., Trishch R., Denysenko A.** Methods of assessing the harmful factors affecting the health of workers of a machine-building enterprise 70
- Jakym R., Slipchuk A.** Assessment of reliability and criteria for improving the quality of rock cutting equipment of tricone drilling bits for well-boring especially hard rock 77

### INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

- Dashkevich A., Vorontsova D., Skorobogatko N.** An algorithm of search of key point pairs strong correspondences in images and depth maps 86
- Kodola G., Volynets N., Serbulova I.** Automated testing of web applications with multilevel architecture 91
- Stanovska I., Gerganov M., Huriev I.** Modeling of the network tracked weight complexes loaded reconstruction processes 101

### CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

- Avina S., Gryn G.** Study of the influence of technological parameters on the output of hydrogen cyanide 109
- Karakurkchi A., Sakhnenko M., Ved' M., Kaidalov R., Shapoval O.** Surface engineering technologies of power plant items of the automotive and armored vehicles 115
- Krivileva S., Vlasenko V., Tzvirkun D.** Industrial dust control in cement production as a factor in significantly reducing the negative impact of cement plants on the environment 124
- Melnyk Yu., Starchevskiy R., Melnyk S.** Transesterification of triglycerides by ethanol in the presence of metal oxides 132
- Mykhaylenko V., Lukianova O., Gil Z.** Obtaining of oxidizers using physical fields 139
- Mykolenko S., Tsaruk L., Chursinov Yu.** Effect of amaranth products and chia on bread quality 145
- Sova N., Lutsenko M., Lobanova A., Hrekova N.** Use of hemp oil in mayonnaise technology 152
- Tischenko V., Bozhko N., Pasichnyi V.** Meat-containing combined products with muscovy duck and silver carp meat 160
- Khokhotva O., Maslyanka K.** Sorption of copper and nickel by phosphorylated sorbents in static conditions 169
- Tsykhanovska I., Yevlash V., Khamitova B., Urazbaieva K., Aleksandrov O., Kaida N.** Influence of the "magnetofood" 175

- food supplement on the structural and mechanical properties of molded fruit jelly with various structure-forming agents
- Chorny A., Kondratov S., Olynikov D.** Development composite polymer matrix tablets with a preset time of isosorbide dinitrate release by the method of mathematical modeling 187
- Chulieieva E., Zolotaryov V.** Research of the influence of ingredients on electrophysical properties of nanomodified fire-safe polymer compositions with magnesium oxide dihydrates 197
- Shvedyuk D., Pasichnyi V.** Application of the target fermentation in the technology of extended shelf-life meat-based products 204

*ELECTROPHYSICAL TECHNOLOGIES, EMC AND LIGHTNING PROTECTION*

- Maliushevska A., Toporov S., Dmytrishyn O.** Study of certain regularities of polymeric dielectric film's destruction under the influence of electric field at partial discharges limitation 210

**ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Збірник наукових праць  
Серія:  
Нові рішення в сучасних технологіях  
№ 5 (1330) 2019

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. № 3-19

Підп. до друку «29» березня 2019 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. Друк цифровий.  
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 20,0. 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

---