

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"

Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси»

№ 16(1238)2017

Збірник наукових праць

Видання засноване в 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2017

Вісник Національного технічного університету «ХПІ».Збірник наукових праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х.: НТУ „ХПІ» – 2017р. – №16(1238) – 154 с.

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

Координаційна рада:

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А. І. Грабчснко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Спіфанов, канд. техн. наук проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф., М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Дьомін Д. О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;

Заст. відповідального редактора: Акімов О. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків,

Відповідальний секретар: Пензев П.С., НТУ «ХПІ»;

Члени редколегії: Березуцький В. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Дмитрік В. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Дудніков А. А., канд. техн. наук, ПДАА, Полтава, Заблоцький В. К., д-р техн. наук, ДДМА, Краматорськ, Заміховський Л. М., д-р техн. наук, ІФТУНГ, Івано-Франківськ, Євстратов В. О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків, Погрібний М. А., проф., НТУ «ХПІ», Харків, Пономаренко О. І., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків, Соболев О. В., д-р фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Шоман О.В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Jozef Voynarovskyy, проф., Сілезького політехнічного інституту, Польща, Rab Nawaz Lodhi, проф. Bahria University Islamabad Pakistan, Пакистан, Меркер Е. Е., д-р техн. наук, проф., Старооскольський технологічний інститут – філія Національного дослідницького технологічного інституту «Московський інститут сталі і сплавів», Росія

*У 2015 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)***

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ „ХПІ“

Протокол № 4 від «28» квітня 2017 р.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 678:620.173.2;539.24

А. И. БУРЯ, С. В. КАЛИНИЧЕНКО, А. - М. В. ТОМИНА, Г. А. БАГЛЮК

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАФИТОПЛАСТОВ

Исследовано влияние содержания термически расширенного и серебристого графита на физико-механические характеристики графитопластов на основе фторопласта Ф4. Анализ микроструктуры композитов подтвердил рациональность выбора метода смешения и формования компонентов в изделия, что коррелирует с прочностными свойствами материалов. Испытания показали, что разработанные композиты превышают исходный полимер по модулю упругости в 1,9 р., коэффициенту Пуассона 1,8 р., что позволяет их использовать для подвижных соединений машин и механизмов, а также деталей ответственного назначения.

Ключевые слова: полимер, наполнитель, фторопласт Ф4, термически расширенный, серебристый, графит, графитопласты, физико-механические свойства, модуль упругости, коэффициент Пуассона

Досліджено вплив вмісту термічно розширеного і сріблястого графітів на фізико-механічні характеристики графітопластів на основі фторопласта Ф4. Аналіз мікроструктури композитів підтвердив раціональність вибору методу змішування і формування компонентів в вироби, що корелює з властивостями міцності матеріалів. Випробування показали, що розроблені композити перевищують вихідний полімер по модулю пружності в 1,9, коефіцієнту Пуассона 1,8 рази, що дозволяє їх використовувати для рухливих з'єднань машин і механізмів, а також деталей відповідального призначення.

Ключові слова: полімер, наповнювач, фторопласт Ф4, термічно розширений, сріблястий, графіт, графітопласти, фізико-механічні властивості, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона

The article considers composite materials based on PTFE F4 filled with thermally expanded silver graphite. Nowadays the world is experiencing a dramatical increase in the demand for heat-resistant polymer composite materials (PCM) possessing high-performance properties alongside with the small specific weight, that have found serial use within the most responsible technical branches, such as the air-, machine engineering, ship- and rock-et-building, i.e. the branches with special requirements to the product, including maximum strength, hardness, reliability, durability when working in the heavy conditions of loading, at high temperatures and aggressive environments. Thanks to chemical inertia towards virtually all the aggressive environments, with the exception of melts of alkali metals and trifluoride chlorine, PTFE F4 is the indispensable material for manufacturing the details of chemical equipment. The lowest friction coefficient of PTFE F4 and compositions based on it among all the other structural materials determines their wide use in mechanical engineering - in friction knots of mechanisms as bearings and support slips, mobile seals - piston rings, bands, that enhances the reliability and durability of machines and devices' mechanisms, providing their work under conditions of aggressive environments and cryogenic temperatures. The influence of the content of thermally expanded and silvery graphite on the physico-mechanical characteristics of graphite plastics based on PTFE F4 is studied. The tests showed that the developed composites exceed the initial polymer modulus of elasticity of 1.9, the Poisson's ratio is 1.8. That allows them to be used for mobile connections of machines and mechanisms, as well as for critical parts.

Keywords: polymer, filler, PTFE F4, thermally expanded, silver, graphite, graphite, physico-mechanical properties, modulus of elasticity, Poisson's ratio

Введение. Тенденции развития современной техники характеризуются, прежде всего, режимом повышением требований к качеству и эксплуатационным свойствам изделий и конструкций при снижении себестоимости их производства [1]. Разработка и применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) нового поколения в последние десятилетие, является важной задачей в связи с активным развитием различных отраслей промышленности, поскольку ПКМ представляют собой перспективные конструкционные материалы, широко применяемые в изделиях общего и специального назначения, благодаря хорошему комплексу эксплуатационных характеристик, уменьшению отходов при изготовлении деталей и возможности регулирования свойств путем введения различных модифицирующих добавок (наполнителей) [2, 3].

Актуальность литературных данных и постановка проблемы. Использование изделий с бронзы, стали, баббита и др. в высоконагруженных узлах трения машин, работающих в самых различных условиях (например, нефтеперекачивающей станции, гидроэлектростанции, металлургическом прокатном стане) приводит к их отказам сопровождаемым аварийными ситуациями, катастрофами и значительными экономическими потерями. Полимерные композиционные материалы позволяют увеличить ресурс механизмов, повысить их надежность, снизить затраты при ремон-

те и эксплуатации. Среди направлений совершенствования конструкционных свойств материалов одним из важнейших является разработка материалов третьего поколения, способных противостоять внешним факторам и адаптироваться к ним, управлять своими свойствами [4, 5].

При выборе фторопласта Ф4 в качестве матрицы для графитопластов учитывались его антифрикционные и физико-механические свойства, термостойкость, стойкость к агрессивным средам, технологичность переработки [6].

Цель и задачи исследования. Целью исследования являлось определение оптимального содержания наполнителей (серебристого и термически расширенного графитов) на физико-механические характеристики фторопласта Ф4.

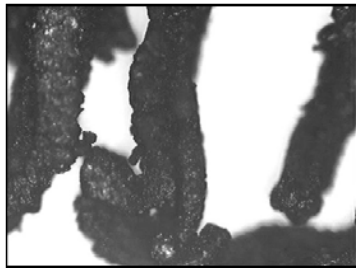
Задача исследования заключалась в разработке материалов с повышенными физико-механическими свойствами, высокой термостойкостью и стойкостью к агрессивным средам, технологичностью переработки.

Материалы и методы исследования. В качестве связующего использовали фторопласт Ф4 (ГОСТ 10007-80) – порошок белого цвета с насыпной плотностью 0,2–0,3 г/см³ (табл. 1), который предназначается для изготовления изделий методом прямого прессования или спекания.

© А. И. Буря, С. В. Калиниченко, А. - М. В. Томина, Г. А. Баглюк. 2017

Таблица 1 – Свойства фторопласта Ф4 [7]

Плотность, г/см ³	2,12-2,2
Относительное удлинение при разрыве %	250-500
Твердость по Бринеллю, МПа	29,4-39,2
Коэффициент трения	0,04
Рабочая температура, К – максимальная/минимальная	533/4



а



б

Рис. 1 – Микроструктура графитов: а – термически расширенного, б – серебристого (×200)

В качестве наполнителей выступали:

– частички термически расширенного графита (ТРГ) толщиной 0,25 – 0,32 мм, длиной 1,5 – 3 мм (рис. 1, а). Уникальное сочетание эксплуатационных

свойств ТРГ, таких как широкий диапазон рабочих температур, высокая химическая стойкость, прекрасная уплотняющая способность, способствуют устойчивому росту потребления уплотнений на его основе многими отраслями промышленности [8];

– графит серебристый (ГОСТ 5279-74) – природный минерал (рис. 1, б), обладающий множеством уникальных свойств, огнеупорность, электропроводность, химическая стойкость, низкая твердость, пластичность, жирность, антипригарность, диамагнитность [9].

Приготовление композиций на основе фторопласта Ф4, (составы приведены в табл. 2), осуществлялось методом сухого смешивания в аппарате с вращающимся электромагнитным полем (0,12 Тл) с помощью ферромагнитных частиц, впоследствии извлекаемых методом магнитной сепарации.

Получаемую таким образом смесь таблетировали при комнатной температуре и давлении 60 МПа. Таблетки загрузали в пресс-форму, нагретую до 523 К, после чего температуру в пресс-форме поднимали до 640-650 К при давлении 60 МПа. Для фиксации формы изделие охлаждали под давлением до температуры 523 К и дальше выталкивали из пресс-формы.

Микрофотографии шлифов полученных образцов (рис. 2) подтверждают равномерное распределение наполнителей в полимерной матрице, что говорит о рациональном выборе метода формования композитов на основе фторопласта Ф4.

Наиболее важными характеристиками механических свойств при выборе материалов являются предел текучести, относительная деформация, модуль упругости при сжатии, коэффициент Пуассона [1].

Таблица 2 – Состав композиций материалов [10]

Обозначение материалов	Содержание, масс. %		
	Связующее Фторопласт Ф4	Наполнитель	
		Графит серебристый	Термически расширенный графит
1	100	-	-
2	92,5	7	0,5
3	87	11,5	1,5
4	82	15	3



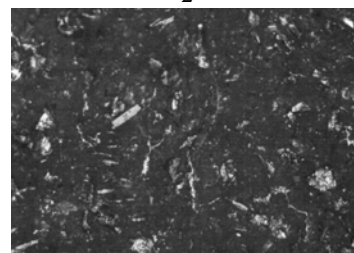
1



2



3



4

Рис. 2 – Микроструктура: 1 – фторопласта Ф4; 2, 3, 4 – графитопластов на его основе (×100)

Коэффициент Пуассона (1), модуль сдвига (2), модуль объемного сжатия (3), параметр Ламе (4) вычисляли по формулам:

$$\mu = \frac{(E - 6 \cdot \sigma_m)}{(6 \cdot \sigma_m + 2 \cdot E)}, \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}, \quad (2)$$

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}, \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\mu \cdot E}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}, \quad (4)$$

где E – модуль упругости, МПа; σ_m – предел текучести при сжатии, МПа.

Результаты исследования физико-механических свойств материалов. Кривые σ - ε (рис. 3), чистого фторопласта Ф4 (1) и графитопластов (ГП) на его основе (3, 4), согласно классификации Херцберга [11] относятся к кривым V типа, который характеризует упругое гетерогенно – пластическое поведение. На участке кривых до 15 МПа, наблюдается полностью упругое поведение, материала. Далее форма кривых представляет собой результат конкурентного развития двух процессов. Первый процесс характеризуется пластическим течением, за счет разрушения кристаллической структуры фторопласта - перемещение дислокаций, в следствии которых одна часть кристалла сдвигается относительно другой, что приводит к деформационному упрочнению. Второй процесс характеризуется перестройкой разрушенной структуры в новую, за счет накопленных деформационных напряжений. Именно за счет конкурирования этих процессов и наблюдается изменение угла наклона кривых $\varepsilon - \sigma$. Дальнейшее поднятие угла наклона свидетельствует о стадии деформационного упрочнения: большее количество участков полимера приобретает новую структуру, что ведет к возрастанию сопротивления материала (подъем кривых на участке от 25 до 70 МПа).

Процессы деформационного разрушения в графитопласте 2 протекают схоже с кривыми 1, 3, 4, однако с преобладанием упругого гомогенно-

пластического поведения с необратимым изменением формы образцов, что наблюдается в конце участка на кривой. Это говорит о том, что малое содержание дисперсного модификатора в образце 2 приводит к охрупчиванию структуры материала.

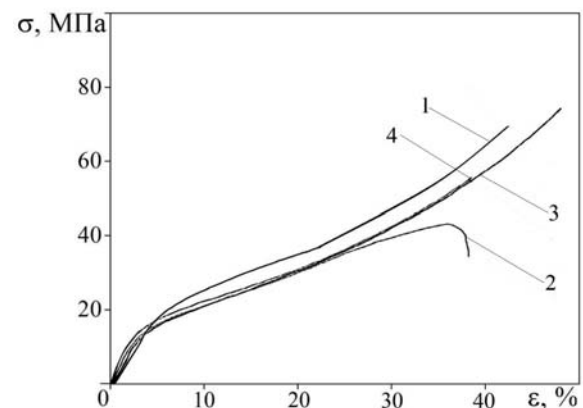


Рис. 3 – Кривые σ - ε 1 - 4 соответствующие материалам 1 - 4

Исследование физико-механических свойств полученных материалов показало, что в идентичных условиях разработанные ГП, содержащие графит сербрийский и ТРГ, превосходят, исходный полимер – фторопласт Ф4 (табл. 3) по модулю упругости в 1,36 – 1,9, модулю сдвига 1,23 – 1,7 раза. Уменьшение предела текучести в 1,06 – 1,2 раза, свидетельствует о повышении степени кристалличности композитов, связанной с ростом количества кристаллитов. В данном случае частицы ТРГ и ГС выступают новыми центрами зарождения кристаллов [4], равномерно распределяя напряжение в образце, о чем свидетельствует повышение коэффициента Пуассона, а чем ниже концентрация напряжений в материале, тем труднее разрушить образец за счет накопления необратимых повреждений.

Согласно Липатову [12], дисперсные наполнители обладают высокой поверхностной энергией, в следствии чего сильные граничные слои являются причиной улучшения адгезионного контакта между полимером и наполнителем. В нашем случае наиболее интенсивное повышение физико-механических свойств происходит при введении 15 масс. % ГС и 3 масс. % ТРГ, что объясняется высокими упругими характеристиками последнего.

Таблица 3 – Свойства композитов на основе фторопласта Ф4

Показатель	Композиция			
	1	2	3	4
Модуль упругости при сжатии, E МПа	322,5	439	465	612
Предел текучести при сжатии, σ_r МПа	29,2	24,4	24,3	27,5
Относительная деформации, ε %	15,8	29	29	34
Модуль сдвига, G МПа	136,8	170,8	179,3	231,8
Модуль объемного сжатия, K МПа	167,4	353,5	381,2	566,7
Параметр Ламе, λ МПа	76,3	234,6	262,3	412
Коэффициент Пуассона, μ	0,179	0,29	0,297	0,32

Выводы. Таким образом в результате проведенных исследований можно заключить, что разработанные

композиты превосходят базовый полимер при оптимальном (15 масс. % ГС и 3 масс. % ТРГ) содержа-

нии наполнителей, по модулю упругости в 1,9, модулю сдвига 1,7, коэффициенту Пуассона 1,8 раза, что позволяет использовать их для подвижных соединений машин и механизмов, а также деталей ответственного назначения.

Список литературы

1. Баглиев, Б. Е. Возможности применения порошковых полимерных материалов для изделий различного функционального назначения [Текст] / Б. Е. Баглиев, А. В. Черноглазова, С. В. Темникова, И. Р. Тимебулатова, Д. Р. Биктимиров // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 7. – С. 93–96.
1. 2. Будник, А. Ф. Структурированные нанообъекты политетрафторэтиленовых композитов [Текст] / А. Ф. Будник, П. В. Руденко, К. В. Берладир, О. А. Будник // Журнал нано- та електронної фізики. – 2015. – Т. 7, № 2. – С. 02022-1–02022-9.
2. Буря, О. І. Вплив режимів експлуатації на коефіцієнт тертя нанокомпозитів на основі фенілону С-2, наповненого фулереновою сажею [Текст]: мат. ХХ міжд. науч. – техн. конф. / О. І. Буря, О. Ю. Кузнецова, В. І. Колесников, Н. О. Мяснікова // Машиностроение и техносфера XXI века, 2013 – № 1. – С. 106–108.
3. 4. Ширинзаде, И. Н. Особенности структурообразования модифицированных композиционных материалов [Текст] / И. Н. Ширинзаде, И. Г. Мамедова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 4/5 (76). – С. 46–51. doi: 10.15587/1729-4061.2015.48352
4. Нелюб, В. А. Применение полимерных композиционных материалов в судостроении для ремонта корабельных надстроек [Текст] / В. А. Нелюб // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2013. – № 5. – С. 21–24.
5. 6. Утевская, Л. В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения [Текст] / Л. В. Утевская // Вісник ХДАДМ. Серія «Дизайн». – 2010. – № 1. – С. 59–62.
6. Пугачев, А. К. Переработка фторопластов в изделия: Технология и оборудование [Текст] / А. К. Пугачев, О. А. Росляков. – Л.: Химия, 1987. – 168 с.
7. Терморасширенный графит [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://szu.com.ua/novosti2/item/73-termorasshirennyj-grafit-ss/73-termorasshirennyj-grafit-ss>
8. Графит серебристый [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ferro.in.ua/index.php?cat=407>
9. Пат. № 108379 UA, Підшипник кочення МПК F16C 19/00 [Текст] / Буря О. І., Калініченко С. В., Пустовалов Ю. П., Вишняков Л. Р. – № у 2016 00957; заявл. 05.02.2016.; опубл.

11.07.2016. Бюл. № 13. Режим доступа: <http://uapatents.com/4-108379-pidshipnik-kochennya.html>

10. Херцберг, Р. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов [Текст] / Р. В. Херцберг. – М.: Металлургия. – 1989. – 560 с.
11. Лунатов, Ю. С. Межфазные явления в полимерах [Текст] / Ю. С. Лунатов. – К.: Наукова Думка, 1980. – 260 с.

Bibliography (transliterated):

1. Baghlyev, B. E., Chernoglazova, A. V., Temnykova, S. V., Tymberbulatova, Y. R., Byktymyrov, D. R. (2011). Mozhylyvosti zastosuvannya poroshkovykh polimernykh materialiv dlia vyrobiv riznoho funktsionalnoho pryznachennia. Vestnyk Kazanskogo tekhnologhycheskogho unyversytet, 7, 93–96.
2. Budnyk, A. F., Rudenko, P. V., Berladyr, K. V., Budnyk, O. A. (2015). Strukturovani nanoobiektiv politetraforetilenovykh kompozytiv. Zhurnal nano- ta elektronnoi fizyky, 2 (7), 02022-1–02022-9.
3. Burya, O. I., Kuznetsova, O. Yu., Kolesnykov, V. I., Miasnikova, N. O. (2013). Vplyv rezhymiv ekspluatatsii na koefitsient tertia nanokompozytiv na osnovi fenilonu S-2, napovnenoho fulereno-voiu sazheiu. Mashynobuduvannia i tekhnosfera XXI stolittia, 1, 106–108.
4. Shirinzade, I. N., Mamedova, I. H. (2015). Osoblyvosti strukturo-ovsity modyfykovanykh kompozytsiinykh materialiv. Skhidno - Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii, 4 (5 (76)), 46–51. doi: 10.15587/1729-4061.2015.48352
5. Neliub, V. A. (2013). Zastosuvannya polimernykh kompozytsi-nykh materialiv v sudnobuduvanni dlia remontu korabelnykh nadbudov. Remont. Vidnovlennia. Modernizatsiia, 5, 21–24.
6. Utevskaia, L. V. (2010). Polimerni kompozytsiini materialy konstrukttsiinoho pryznachennia. Visnyk KhDADM. Serija «Dizajn», 1, 59–62.
7. Puhachov, A. K., Rosliakov, O. A. (1987). Pererobka ftoroplastov v vyrobny: Tekhnolohiia i ustatkuvannia. Leninhrad: Khimiia, 168.
8. Termorozshyrenyi hrafyt. Available at: <http://szu.com.ua/novosti2/item/73-termorasshirennyj-grafit-ss/73-termorasshirennyj-grafit-ss>
9. Hrafyt sribliastyi. Available at: <http://ferro.in.ua/index.php?cat=407>
10. Burya, O. I., Kalinichenko, S. V., Pustovalov, Yu. P., Vyshniakov, L. R. (2016). Pat. No. 108379 UA. Pidshypnyk kochennia MIPK F16C 19/00 No. u 2016 00957; declared: 05.02.2016; published: 11.07.2016, Bul. No. 13. Available at: <http://uapatents.com/4-108379-pidshipnik-kochennya.html>
11. Hertsberh, R. V. (1989). Deformatsiia i mekhanika ruinovannia konstrukttsiinykh materialiv. Moskva: Metalurhiia, 560.
12. Lipatov, Yu. S. (1980). Mizhfaznyi yavyscha v polimerakh. Kyiv: Naukova Dumka, 260.

Поступила (received) 20.04.2016

Библиографические описания / Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Исследование физико-механических характеристик графитопластов/ А. И. Буря, С. В. Калиниченко, А. – М. В. Томина, Г. А. Баглиук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С.3–7.– Бібліогр.: 12назв. – ISSN 2079-5459.

Дослідження фізико-механічних властивостей графітопластів/ О. І. Буря, С. В. Калініченко, А. – М. В. Томина, Г. А. Баглиук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С.3–7. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Investigation of physicomechanical characteristics of graphite plastics/ A. Burya, S. Kalinichenko, A. – M. Tomina, G. Bahliuk // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 3–7. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-5459

Сведения об авторах / Відомості про авторів / About the Authors

Буря Александр Иванович – кандидат технічних наук, професор,, Дніпровський державний технічний університет, професор кафедри «Фізики конденсованого стану», вул. Днепростроевская 2, м Кам'янське, Україна, 51918; e-mail: ol.burya@gmail.com

Буря Александр Иванович – кандидат технических наук, профессор, Днепропетровский государственный технический университет, профессор кафедры «Физики конденсированного состояния», ул. Днепропетровская 2, г. Камыньское, Украина, 51918; e-mail: ol.burya@gmail.com

Burya Oleksandr – PhD in Technical Sciences, Professor, Professor of department of the condensed matter physics, Dneprovskii State Technical University; 2 Dniprobudivska str., 51918, Kamianske, Ukraine, e-mail: ol.burya@gmail.com

Калініченко Сергій Володимирович – асистент кафедри «Технології машинобудування», Дніпровський державний технічний університет вул. Дніпропетровська 2, м Кам'янське, Україна, 51918; e-mail: Prof3g@rambler.ru

Калиниченко Сергей Владимирович – асистент кафедри «Технологии машиностроения», Днепропетровский государственный технический университет ул. Днепропетровская 2, г. Камыньское, Украина, 51918; e-mail: Prof3g@rambler.ru

Kalinichenko Serhii – assistant of the department "Technology of Mechanical Engineering", Dneprovskii State Technical University; 2 Dniprobudivska str., 51918, Kamianske, Ukraine, e-mail: Prof3g@rambler.ru

Томіна Анна-Марія Вадимівна – аспірант кафедри «Фізики конденсованого стану», Дніпровський державний технічний університет вул. Дніпропетровська 2, м Кам'янське, Україна, 51918; e-mail: an.mtomina@gmail.com

Томина Анна-Мария Вадимовна – аспирант кафедры «Физики конденсированного состояния», Днепропетровский государственный технический университет ул. Днепропетровская 2, г. Камыньское, Украина, 51918; e-mail: an.mtomina@gmail.com

Tomina Anna-Mariia, Phd student of department of the condensed matter physics, Dneprovskii State Technical University; 2 Dniprobudivska str., 51918, Kamianske, Ukraine, e-mail: an.mtomina@gmail.com

Баглюк Геннадій Анатолійович – доктор технічних наук, Інститут Проблем Матеріалознавства ім. І.М. Францевича, старший науковий співробітник відділення «зносоустійкість і корозійностійких порошкових конструкційних матеріалів», вул. Крижанівського 3, м Київ, Україна, 03680 e-mail: gbag@rambler.ru

Баглюк Геннадий Анатольевич – доктор технических наук, Институт Проблем Материаловедения им. И.М. Францевича, старший научный сотрудник отделения «Износостойких и коррозионностойких порошковых конструкционных материалов», ул. Крижановского 3, г. Киев, Украина, 03680 e-mail: gbag@rambler.ru

Bahliuk Gennady – doctor of Engineering, Institute of Problems of Materials Science. THEM. Frantsevich, Senior Researcher, "Wear-Resistant and Corrosion-Resistant Powder Structural Materials", 3 Krizhanovsky str., 03680., Kiev, Ukraine, e-mail: gbag@rambler.ru

УДК 621.798-18

А. Н. КОЛОСКОВА

КЛАССИФИКАТОР МНОГОСЛОЙНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Запропоновано вдосконалена класифікацію матеріалів, які використовуються при формуванні багатошарового пакування, з одночасним використанням у якості класифікаційних ознак як матеріалів шарів, так і технологій їхнього приєднання. На основі запропонованої класифікації розроблений вдосконалений класифікатор багатошарових комбінованих пакувальних матеріалів. Побудова класифікатора проводиться за принципом поетапного додавання шарів з позначенням технологій, що використовуються, а також їхнього місця у багатошарових комбінованих структурах.

Ключові слова: багатошарові матеріали, комбіновані матеріали, технологія приєднання, класифікатор.

Предложена усовершенствованная классификация материалов, применяемых при формировании многослойной упаковки, с одновременным использованием в качестве классификационных признаков как материалов слоев, так и технологий их присоединения. На основе предложенной классификации разработан усовершенствованный классификатор многослойных комбинированных упаковочных материалов. Построение классификатора проводится по принципу поэтапного добавления слоев с указанием используемых технологий, а также их места в многослойных комбинированных структурах.

Ключевые слова: многослойные материалы, комбинированные материалы, технология присоединения, классификатор.

The problems connected to classification of multi-layer combined materials used in packaging industry are investigated. The term of multi-layer combined structure is developed meaning the combination of two and more separate layers of materials adjoined with each other. The main result of the investigation is in improvement of the unified classifier of multi-layer combined packaging materials based on their unified improved classification. The represented classifier is built on principle of step-by-step layers adding with used technologies being mentioned together with their places in multi-layer combined structure. Proposed improved classification of the materials forming the multi-layer combined packaging materials uses both materials and technologies of their adjoining as classification attributes. Classification and classifier of multi-layer combined materials are improved by using both materials and methods of their adjoining as classification attributes. Represented classifier application allows to provide full information on used multi-layer packaging materials in clear structured form for packaging specialist.

Keywords: multi-layer materials, combined materials, adjoining technology, classifier.

© А. Н. Колоскова. 2017

Введение. Не секрет, что упаковка играет очень важную роль при выборе потребителем того или иного товара. Однако в одном ряду с привлекательностью упаковки стоят такие немаловажные ее характеристики, как степень сохранности естественных свойств упакованного продукта, защита его от таких внешних факторов, как свет, газ, влага, тепло, а также механические повреждения. Всего несколько лет назад рынок упаковочных материалов был ориентирован главным образом на выпуск и использование традиционных однослойных материалов. В настоящее время развитие экономики привело к резкому повышению интереса к барьерным материалам с различными свойствами защиты продукции. Многослойные материалы доминируют среди материалов, используемых в упаковочной промышленности, а также, находят все большее применение в других отраслях благодаря своим уникальным качествам и низкой цене. Комбинируя несколько слоев из различных материалов, можно одновременно использовать механические свойства одних и барьерные свойства других для создания «совершенной» упаковки.

Технолог современного производства должен иметь представление обо всех представленных на рынке упаковочных материалах, доступных для применения, а также о технологиях их изготовления. Большое многообразие комбинированных материалов создает трудности при их верном выборе с точки зрения экономической эффективности, а в некоторых случаях даже делает экономически неоправданным создание новых материалов. В этой связи актуальным является создание обобщенного классификатора многослойных комбинированных материалов, применяемых в упаковочной индустрии.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. В упаковочной промышленности используется огромное количество видов комбинированных материалов. Зачастую их условно разделяют на две разновидности: многослойные материалы, к которым относят многослойные полимерные пленки, и комбинированные, имеющие в своем составе другие компоненты – чаще всего это бумага и алюминиевая фольга. На сегодняшний день наиболее широко изучены полимерные композиции. В частности, в работах [1–3] проведен достаточно глубокий обзор гибких комбинированных материалов, созданных на основе полимерных композиций, описаны их структура, методы производства и области применения. В [4–6] представлены классификации многослойных полимерных пленок, дано описание их свойств и характеристик. В работе [7] приведена обширная классификация многослойных полимерных пленок, разработанная из условия их применимости, а также описаны материалы, из которых могут быть созданы многослойные композиции, где в одном ряду с полимерами стоит алюминиевая фольга. Также в статье [7] автором отмечено, что существует огромное разнообразие возможных комбинаций различных материалов, поэтому в полном объеме исследовать их невозможно. В работе [8] дана характеристика многослойных упаковочных материалов, описаны основные механизмы проведения их испытаний. В то же время, описание раз-

личными авторами комбинированных материалов сводится лишь к отображению основных слоев, входящих в их состав, – принципы и процессы создания таких материалов практически не описаны, их классификация также отсутствует.

Общим недостатком изученных работ по данной теме является то, что практически не учитывается существование значительного количества упаковочных материалов, которые не относятся ни к многослойным, ни к комбинированным, хотя по своей структуре они не могут быть отнесены и к однослойным. Так, например, гофрированный картон имеет минимум три слоя – бумагу, клей и гофрированную бумагу, а белая жесть состоит из двух слоев – стального слоя, а также слоя из олова, цинка, хрома или лака.

Для получения необходимых свойств многослойных упаковочных материалов, их компоненты должны быть не просто совмещены, а надежно присоединены друг к другу. Поэтому еще одним немаловажным фактором при создании многослойных материалов выступает используемый в них метод соединения слоев. В работах автора [9, 10] были представлены модели прочностных свойств соединительных слоев для полимерных многослойных материалов, которые легли в основу при рассмотрении влияния методов соединения их между собой. Также в работе [9], была сформирована укрупненная классификация многослойных упаковочных материалов.

От выбора технологии соединения слоев зачастую зависит не только качество, но и свойства полученного материала, однако, данная информация технологу практически недоступна – получая для использования тот или иной материал, он не обладает сведениями о физико-механических и технологических особенностях создания его слоев. В то же время, доступная информация об указанных характеристиках представлена в литературных источниках в разрозненном виде, и ее систематизация в каждом конкретном случае является высокочувствительным по времени заданием. С учетом всего вышеизложенного, основной проблемой является отсутствие классификатора многослойных материалов, который бы не только полностью описывал их структуру, но и представлял информацию о технологиях, используемых для их получения.

Цель работы и задачи исследования. Целью данной работы является усовершенствование классификации многослойных комбинированных упаковочных материалов.

Для достижения поставленной цели в представленном исследовании были решены следующие задачи:

1. Разработана единая классификация материалов, используемых при формировании многослойных комбинированных упаковочных материалов.
2. Разработан единый классификатор многослойных комбинированных упаковочных материалов.

Материалы исследования многослойных комбинированных упаковочных материалов. Как показал анализ литературных источников по вопросу классификации многослойных и комбинированных материалов, подходы, применяемые при описании понятий многослойный или комбинированный материал, единой основы не имеют. В данную категорию

различные исследователи включают те или иные отдельные их виды – как правило, на полимерной основе. В то же время, к подобным материалам следует отнести любые слоистые комбинированные структуры, свойства которых в общем случае зависят от характеристик образующих их слоев. Для устранения данного несоответствия в представленном исследовании был введен и использовался термин «многослойная комбинированная структура (МКС)» в следующем значении: «комбинация двух и более отдельных слоев материалов, соединенных между собой».

Близким по звучанию к представленному термину МКС является определение композиционных материалов, которые в общем случае состоят из волокнистой арматуры, пропитанной полимерным связующим. Однако подобные материалы нельзя рассматривать, как композицию отделенных друг от друга слоев с разными характеристиками, поскольку в процессе пропитки не образуется отдельный соединительный слой. В практике проектирования и производства подобных материалов принято рассматривать их как однослойные с усредненными по толщине физико-механическими характеристиками [11].

Объектом исследования стали МКС, применяемые в упаковочной индустрии.

Предметом исследования являются материалы, используемые при формировании МКС.

Классификация материалов, используемых при формировании многослойных комбинированных упаковочных материалов. Основными факторами, влияющими на функциональные и качественные характеристики МКС, являются:

1. Физико-механические свойства материалов, используемых для создания МКС;
2. Методы, применяемые для соединения слоев МКС;
3. Последовательность расположения слоев.

При создании МКС в упаковочной промышленности применяется большое количество материалов, самыми распространенными из которых являются бумага, металл и полимерный материал. В зависимости от вида выстраиваемой структуры любой из однослойных материалов может выступать как основным (несущим на себе все остальные слои), так и наносимым слоем. Поэтому целесообразным является введение единого классификационного кода для описания всех однослойных материалов, применяемых для построения МКС. Поскольку одной из основных характеристик материала, входящего в МКС, является его толщина, то код будет иметь двухуровневую структуру. Первые три позиции (первый уровень) указывают класс и подкласс материала, следующие три позиции (второй уровень) – его толщину. Таким образом, классификационные группировки классификатора признака материала будут иметь каноническую структуру. Это позволяет представить в простом, компактном виде плоский граф классификационного признака одно-

слойных материалов, применяемых для создания МКС (рис. 1).

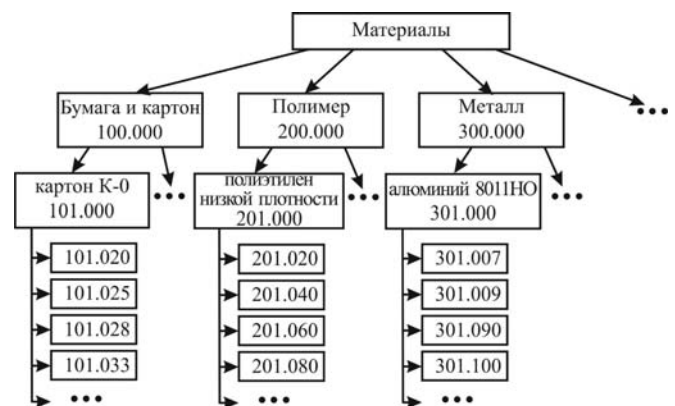


Рис. 1 – Упрощенный плоский граф классификационного признака однослойных материалов

Любая корректная классификация должна иметь резервы своего развития. В предлагаемой классификации резервами классов является диапазон от 400 до 900.

Основными методами соединения слоев при построении МКС для упаковочной промышленности являются: ламинирование, каширование, соэкструзия, приклеивание, напыление, металлизация. Каждый из этих методов имеет несколько технологических схем, причем выбор той или иной технологической схемы полностью зависит от вида материала соединяемых слоев. В тоже время, не все методы, применяемые для соединения слоев, находятся в прямой зависимости от вида соединяемых материалов. Так, к примеру, нанесение полимерного слоя методом ламинирования может производиться как на бумагу разного типа, так и на металл. Следовательно, каждый слой МКС должен рассматриваться с учетом метода его присоединения. Для этого была введена классификация по признаку технологии присоединения слоев. Упрощенный плоский граф признака технологии присоединения слоев в МКС представлен на рис. 2.

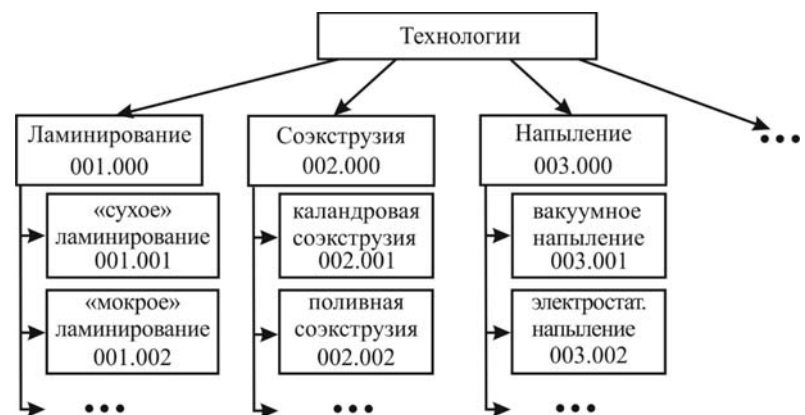


Рис. 2 – Упрощенный плоский граф классификационного признака технологии присоединения слоев

Кодировка данной классификации может быть представлена шестью позициями, из которых первые

три показывают метод присоединения, а вторые – используемую технологию. Данная классификация также имеет свой резерв развития.

Классификатор многослойных комбинированных упаковочных материалов. В основу единой

классификации многослойных комбинированных материалов были положены принципы, используемые при построении универсальной десятичной классификации. Система построения кода классификатора МКС представлена на рис. 3.

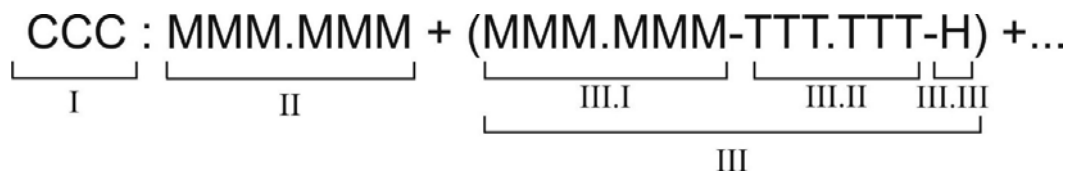


Рис. 3 – Система построения кода классификатора многослойных комбинированных структур

Первая позиция кода показывает количество слоев в многослойном комбинированном материале. Хотя этот показатель и не является основным при определении свойств материала, однако он будет ведущим при оценке его технологичности и экономической эффективности.

Вторая позиция представляет собой код материала основного слоя. Здесь под основным (первым) понимается слой, относительно которого будет технологически выстраиваться вся остальная структура.

На третьей и всех последующих позициях показан код, представляющий вид материала присоединяемого слоя (рис. 3, позиция III.I), а также метод его присоединения (рис. 3, позиция III.II). Построение добавочных кодов присоединяемых слоев при этом производится в соответствии с технологией изготовления МКС. Поскольку основной слой не всегда является внешним в МКС, то одним из основных факторов, влияющих на функциональные и качественные характеристики многослойного комбинированного материала является направление нанесения слоев относительно основного слоя. Поверхности многослойного материала разделяют по функциональному назначению на поверхности, контактирующие с продуктом, и поверхности, находящиеся в контакте с окружающей средой. Поэтому последняя позиция в характеристиках присоединяемого слоя (рис. 3, позиция III.III) указывает направление его нанесения: 1 – на сторону, обращенную к продукту; 2 – на сторону взаимодействия с окружающей средой.

Результаты исследования многослойных комбинированных упаковочных материалов. Основным результатом представленного исследования является усовершенствование единого классификатора многослойных комбинированных упаковочных материалов, основанное на их единой усовершенствованной классификации. Построение классификатора проводится по принципу поэтапного добавления слоев с указанием используемых технологий, а также их места в МКС. Предложенная усовершенствованная классификация материалов, применяемых при формировании многослойных комбинированных упаковочных материалов, использует в качестве классификационных признаков материалы и технологии их присоединения.

Научная новизна представленных результатов состоит в одновременном использовании в качестве обобщающих классификационных признаков как ма-

териалов слоев, входящих в МКС, так и технологий изготовления данных структур.

Обсуждение результатов исследования многослойных комбинированных упаковочных материалов. Разработанная классификация многослойных комбинированных упаковочных материалов построена в строгом соответствии с теорией классификаций и имеет избыточные резервы своего развития, что позволяет использовать ее в широком спектре областей науки и техники, где применяются МКС. Практическая значимость представленного классификатора состоит прежде всего в возможности обеспечить в специалиста-упаковщика полной информацией об используемых многослойных упаковочных материалах в четком структурированном виде.

В ходе дальнейших исследований целесообразным представляется составление полных классификационных таблиц материалов и технологий, применяемых для создания МКС, что позволит использовать представленные классификацию и классификатор для создания информационной системы поддержки принятия решения в сфере управления проектами модификаций многослойных комбинированных материалов, а также синтеза экономически эффективных вариантов производства упаковки на их основе.

Выводы. Основываясь на анализе однослойных материалов, применяемых для формирования МКС, а также методов их соединения, была усовершенствована обобщенная классификация материалов слоев, используемых при формировании многослойных комбинированных упаковочных материалов, путем применения в качестве классификационных признаков как самих материалов, так и технологий их присоединения.

На основе предложенной классификации было разработано усовершенствование единого классификатора многослойных комбинированных упаковочных материалов.

Список литературы:

1. Шредер, В. Л. Многослойные пленки, барьерность ...и многое другое [Текст] / В. Л. Шредер, В. Н. Кривошей. // Упаковка. – 2014. – № 2. – С. 19–25.
2. Бристон, Х. Полимерные пленки [Текст] / Х. Бристон, Л. Л. Катан. – М.: Химия, 1993. – 384 с.
3. Шредер, В. Л. Упаковывание пищевых продуктов в гибкие материалы [Текст] / В. Л. Шредер, А. Н. Гаваа, В. Н. Кривошей // Упаковка. – 2011. – № 3. – С. 23–27.
4. Виды полимерных пленок и их свойства [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

- http://www.eximpack.com/publikacii/vidy_polimernyh_plenok_i_ih_svoystva/
5. Plastic films in food packaging. Materials, technology, and applications. [Text] / Editor: S. Ebnesajjad. – William Andrew, 2012. – 384 p.
 6. Любешикина, Е. Г. Полимерные материалы для упаковки пищевых продуктов: требования и принципы выбора [Текст] / Е. Г. Любешикина // Полимерные материалы. – 2009. – № 4. – С.4–10.
 7. Классификация и сферы применения многослойных пленок. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.himhelp.ru/section30/polymer_market/section164/597.html
 8. Яценко, Л. А. Определение качества материалов для изготовления тары и упаковки жиросодержащих продуктов [Текст] / Л. А. Яценко, А. В. Миняйло, О. С. Ратинова // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 3/5 (51), – С. 44–45. Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1590/1487>
 9. Колоскова, А.Н. Моделивання полімерних шарів багатшарових комбінованих пакувальних матеріалів [Текст] / А. Н. Колоскова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи і комплекси. – 2016. – № 4 (1176). – С.16–20.
 10. Gaydachuk, V. Mathematical modeling of strength of honeycomb panel for packing containers and packaging with regard to deviations in the filler parameters [Text] / V. Gaydachuk, G. Koloskova. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. –№ 6/1 (84). – С. 37–43. doi: 10.15587/1729-4061.2016.85853
 11. Бичков, С. А. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів [Текст] / С. А. Бичков, О. В. Гайдачук, В. С. Гайдачук. – Київ.: ІСДО. –1995. –376 с.
 1. Shreder, V. L. (2014). Mnogosloynnyye plenki, bar'yernost' ...i mnogoye drugoye. Upakovka, 2, 19–25.
 2. Briston, K. H., Katan, L. L. (1993). Polimernyye plenki. Moscow: Khimiya, 384.
 3. Shreder, V. L., Gavva, A. N., Krivoshej, V. N. (2011). Upakovyvaniye pishchevykh produktov v gibkiye materialy. Upakovka, 3, 23–27.
 4. Vidy polimernykh plenok i ikh svoystva. Eksimpak-oborudovaniye. Available at: http://www.eximpack.com/publikacii/vidy_polimernyh_plenok_i_ih_svoystva/
 5. Ebnesajjad, S. (Ed) (2012). Plastic films in food packaging. Materials, technology, and applications. William Andrew, 384.
 6. Lyubeshkina, Ye. G. (2009). Polimernyye materialy dlya upakovki pishchevykh produktov: trebovaniya i printsipy vybora. Polimernyye materialy, 4, 4–10.
 7. Klassifikatsiya i sfery primeneniya mnogosloynnykh plenok. HimHelp. Available at: http://www.himhelp.ru/section30/polymer_market/section164/597.html
 8. Yatsenko, L. A., Minyaylo, A. V., Ratinova, O. S. (2011) Opredeleniye kachestva materialov dlya izgotovleniya tary i upakovki zhirosoderzhashchikh produktov. Vostochno-yeuropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. 3 (5 (51)), 44–45. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1590/1487>
 9. Koloskova, G. N. (2016) Modelirovaniye polimernykh sloyev mnogosloynnykh kombinirovannykh upakovochnykh materialov. Bulletin of NTU «KhPI». Series: Mechanical-technological systems and complexes 4 (1176), 16–20.
 10. Gaydachuk, V., Koloskova, G. (2016). Mathematical modeling of strength of honeycomb panel for packing and packaging with regard to deviations in the filler parameters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(1 (84)), 37–43. doi: 10.15587/1729-4061.2016.85853
 11. By'chkov, S. A., Gajdachuk, O. V., Gajdachuk, V. Ye., Grechka, V. D., Kobrin, V. M. (1995). Tekhnologiya vy'robny'cztva lital'ny'x aparativ iz kompozy'cijny'x materialiv. Kyiv.: ISDO, 376.

Bibliography (transliterated):

Поступила (received) 12.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Класифікатор багатшарових комбінованих пакувальних матеріалів/ Г. М. Колоскова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 7–11. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Класифікатор многослойных комбинированных упаковочных материалов/ А. Н. Колоскова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С.7–11. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Classifier of multi-layer combined packaging materials/ G. Koloskova //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 7–11. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Колоскова Ганна Миколаївна – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», доцент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем; вул. Чкалова, 17, м. Харків, Україна, 61070; e-mail: sceperich@mail.ru.

Колоскова Анна Николаевна – кандидат технических наук, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», доцент кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем; ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61070; e-mail: sceperich@mail.ru.

Koloskova Ganna – PhD, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”; associate professor of the department «Theoretical Mechanics, Mechanical Engineering and Robotic systems»; str. Chkalova, 17, Kharkov, Ukraine, 61070; e-mail: sceperich@mail.ru.

УДК 620.194.22

Л. І. НИРКОВА

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КОМБІНАЦІЇ СТРЕС-КОРОЗИЙНИХ ЧИННИКІВ НА КОРОЗИЙНЕ РОЗТРИСКУВАННЯ ВІД НАПРУЖЕННЯ ТРУБНОЇ СТАЛІ ПРИ рН, БЛИЗЬКИХ ДО НЕЙТРАЛЬНИХ

Досліджено корозійно-механічні властивості трубної сталі типу X70 в умовах комбінації чинників, за яких можливо корозійне розтріскування від напруження (КРН). Встановлено, що при потенціалі корозії, накопичених напруженнях у присутності локального осередку корозії (ЛОК) трубна сталь проявляє схильність до КРН за змінного змочування, яке не проявляється при повному зануренні. Змінне змочування за потенціалу -1,0 В в деякому ступені може прискорювати процес КРН. Схильність до КРН сталі з накопиченим рівнем напружень та ЛОК однакова як при повному, так і при змінному змочуванні, що вказує на превалюючий вплив на процес КРН катодного потенціалу та ЛОК порівняно із змінним змочуванням.

Ключові слова: корозійне розтріскування від напруження, трубна сталь, потенціал, стрес-корозійні чинники.

Исследованы коррозионно-механические свойства трубной стали типа X70 в условиях комбинации факторов, вызывающих коррозионное растрескивание под напряжением (КРН). Установлено, что при потенциале коррозии, при накопленном уровне напряжений в присутствии локального очага коррозии (ЛОК) трубная сталь проявляет склонность к КРН при переменном смачивании, что не проявляется при полном погружении. Переменное смачивание при потенциале -1,0 В в некоторой степени способствует ускорению процесса КРН. Склонность к КРН стали с накопленным уровнем напряжений и ЛОК одинакова как при полном, так и при переменном смачивании, что указывает на превалирующее влияние на процесс КРН катодного потенциала и ЛОК по сравнению с переменным смачиванием.

Ключевые слова: коррозионное растрескивание под напряжением, трубная сталь, потенциал, стресс-коррозионные факторы.

Corrosion-mechanical properties of pipe steel X70 in model soil electrolyte (MSE) under influence of different combination of factors were investigated. It was established that factors which led to stress-corrosion cracking (SCC), are corrosion environment, applied loads (stretching and cyclic) and cathodic potential. The presence of local corrosion defect (LCD) and variable moistening may promote in some extent SCC process. For example, under variable moistening by MSE at corrosion potential the pipe steel specimens with accumulated cyclic stress and LCD demonstrate the inclination to SCC, which don't occur at full immersion. At applied cathodic potential -1,0 V both at full immersion and at variable moistening pipe steel specimens in the initial state, with accumulated cycle stress without LCD and with accumulated cycle stress and LCD show the inclination to SCC. It should be noted that inclination to SCC of pipe steel with accumulated cyclic stress and in the presence of LCD is practically identical both at full immersion and at variable moistening, that indicate on prevail influence of cathode potential and LCD over variable moistening.

Keywords: stress-corrosion cracking, pipe steel, potential, stress-corrosion factors

Вступ. Аналізуючи досвід експлуатації магістральних газопроводів (МГ), можна виділити три найбільш значущі причини їх руйнування: корозійний знос, втома, корозійне розтріскування від напруження (КРН). Корозійне розтріскування від напруження розвивається із зовнішньої поверхні труби, що знаходиться в умовах катодного захисту, під покривом, що відшарувалося, у присутності ґрунтових електролітів, які містять карбонати і бікарбонати, зовнішніх і внутрішніх механічних напружень, що виникають при експлуатації газопроводів і виробництві труб [1].

Досвід експлуатації МГ показує, що КРН розвиваються навіть при належному функціонуванні системи катодного захисту як на прямошовних, так і на спіральшовних трубах з плівковою та гумовобітумною ізоляцією, в місцях її дефектів і відшарувань. Стосовно МГ термін КРН використовують для опису руйнувань металу труб, що відбуваються внаслідок повільного розвитку тріщин у процесі тривалої експлуатації.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Чинниками КРН, яким приділяють увагу сучасні вітчизняні та закордонні дослідники, є: рН середовища [2, 3], стан захисного покриву [4, 5], значення потенціалу катодного захисту [6, 7], особливості мікроструктури [8, 9], технологія виготовлення труби [10], нерівноважні термодинамічні процеси під дією терморушійних сил [11, 12] тощо.

В роботі [13] розглянуто чинники, присутність яких сприяє стрес-корозійному розтріскуванню МГ, яким присвоєно рекомендовані вагові коефіцієнти, наприклад: стан захисного покриву – 0,25; рівень ґрунтових вод – 0,20; змінне змочування поверхневими та внутрішньогрунтовими водами – 0,20; напружено-деформований стан МГ на ділянці – 0,15; тип ґрунту – 0,1; корозійна агресивність ґрунту – 0,05; магнітні

аномалії, виявлені з поверхні землі – 0,05. Сума вагових коефіцієнтів перерахованих чинників дорівнює 1.

Як видно з цих даних стану захисного покриву, змінному змочуванню та напружено-деформованому стану відповідають найбільші вагові коефіцієнти, і, імовірно ці чинники можна вважати найбільш вагомими. Але слід відмітити, що в переліку відсутній катодний потенціал, який, як показав досвід експлуатації МГ, може суттєво впливати на механізм КРН. Наприклад, для трубної сталі типу X70 за катодної поляризації при рН, близьких до нейтрального, існує критичний діапазон потенціалів (від -730 мВ до -920 мВ (відносно стандартного каломельного електроду), в якому реакція анодного розчинення може перебігати за катодної поляризації: якщо поляризаційний потенціал знаходиться в цій області, КРН перебігає за сумісного впливу обох механізмів [14]. Звичайно процес КРН перебігає за сумісного впливу кількох чинників одночасно, тому робота, в якій досліджено різні комбінації стрес-корозійних чинників є актуальною

Ціль та задачі дослідження. Мета роботи полягала в дослідженні впливу комплексу стрес-корозійних чинників у різній їх комбінації на схильність трубної сталі до КРН та визначенні такої, при якій схильність найвища. Задача досліджень містилася в обґрунтуванні вибору стрес-корозійних чинників та аналізі їх впливу на КРН. Для досягнення сформульованої мети поставлено та виконано такі завдання:

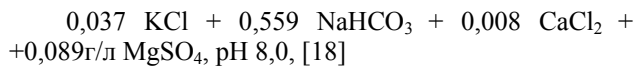
– проаналізовано зовнішні та внутрішні чинники КРН;

– досліджено та оцінено схильність трубної сталі до КРН при різній комбінації цих чинників в лабораторних умовах в розчинах з рН, близькими до нейтральних.

© Л. І. Ниркова. 2017

Матеріали та методи досліджень схильності трубної сталі до КРН в лабораторних умовах. Дослідження проводили на зразках трубної сталі типу Х70, виготовлених з труби діаметром 1420 мм з товщиною стінки 15,7 мм такого хімічного складу (у ваг. %): 0,095 С, 1,39 Мн, 0,255 Si, 0,005 S, 0,017 Р, 0,032 Al, 0,04 Ni, 0,03 Мо, 0,004 Ti, 0,05 V, 0,027 Nb, 0,04 Cr. Механічні характеристики сталі: тимчасовий опір розриву $\sigma_b = 588$ МПа, границя текучості $\sigma_T = 441$ МПа.

Робочим розчином слугував модельний ґрунтовий електроліт (МГЕ) складу, г/л:



з додаванням буферного розчину у співвідношенні 9:1, рН 8,2. Буферний розчин готували на дистильованій воді згідно з [15] змішуванням в потрібному співвідношенні гідрофосфатів натрію і калію – $1/15 \text{ M Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ та $1/15 \text{ M KH}_2\text{PO}_4$.

Потенціал вимірювали відносно хлорсрібного електроду порівняння на потенціостаті ПИ-50. Порівняльні дослідження схильності до КРН проводили методом деформації з повільною швидкістю 10^{-6} м/с плоских зразків на розривній машині АИМА-5-1. Під час корозійно-механічних випробувань контролювали такі показники: подовження зразка ΔL , час до руйнування τ , площа перерізу зразка в місті руйнування

S , відносне звужування Ψ ($\Psi = \frac{S_0 - S}{S_0}$, де S_0 і S –

площа поперечного перерізу зразка до та після випробувань, відповідно). Схильність сталі до КРН оцінювали за коефіцієнтом K (безрозмірна величина), яку обчислювали, як відношення відносного звужування зразка під час випробувань у повітрі до відносного звужування у розчині – $K = \frac{\Psi_n}{\Psi_p}$. Вважали, якщо при

будь-якій комбінації чинників обчислене значення коефіцієнту $K \geq 1,6$ і в руйнуванні присутня крихка складова, сталь є схильною до КРН; якщо $K < 1,6$ і злам в'язкий – не схильна.

Результати аналізу стрес-корозійних чинників та лабораторних досліджень схильності трубної сталі типу Х70 до КРН при їх різній комбінації. Як було зазначено вище, КРН розвивається в умовах сумісної дії корозійно-активного середовища, активного

та пасивного захисту та напружень, що розтягують. Чинники, які залежать від марки трубної сталі, технології виробництва труби, рівня навантажень є внутрішніми; від умов пролягання МГ, агресивності ґрунтових вод, рівня потенціалу катодного захисту – зовнішніми.

Для газопроводів України характерним є КРН при рН, близьких до нейтральних. Найбільша кількість стрес-корозійних дефектів, як відомо з досвіду експлуатації МГ, утворюється при переходах через річки, в ярах, заболоченій місцевості та на ділянках зі змінним змочуванням. Для відтворення таких умов дослідження проводили при змінному змочуванні зразків розчином за схемою 10 хв у повітрі, 50 хв у розчині.

Вплив напружень на МГ під час експлуатації моделювали попереднім циклюванням зразків в повітрі в діапазоні граничних напружень від $0,4\sigma_T$ до $0,8\sigma_T$ з частотою 10 Гц впродовж 10^5 циклів. З досвіду експлуатації МГ також відомо, що стрес-корозійна тріщина починається від локальних корозійних дефектів, тому для прискорення її ініціювання та відтворення механізму локального анодного розчинення в лабораторних умовах на зразку трубної сталі моделювали локальний осередок корозії (далі ЛОК) V-подібної форми глибиною від 0,25 мм до 0,3 мм, який наносили на одну з поверхонь зразка механічним способом. Робили припущення, що стан зразка з накопиченими напруженнями та змодельованим ЛОК можна порівнювати зі станом експлуатованого МГ.

Вплив електрохімічного захисту моделювали наведенням потенціалу катодного захисту, який знаходився в діапазоні захисних поляризаційних потенціалів згідно з ДСТУ 4219 від -0,85 В до -1,15 В (відносно мідно-сульфатного електроду порівняння, що відповідає діапазону потенціалів від -0,75 В до -1,05 В відносно хлорсрібного).

Дослідження проводили за таких умов. Комбінацію внутрішніх чинників (хімічний склад сталі та технологія виробництва труби, рівень накопичених циклічних напружень, наявність локального осередка корозії) обирали однаковою. Варіювали зовнішні чинники: тривалість контакту із середовищем (повне занурення або змінне змочування) і значення потенціалу. Досліджено чотири комбінації чинників, які описано в табл. 1. Там же наведено результати корозійно-механічних випробувань зразків трубної сталі типу Х70 у повітрі та у розчині при цих комбінаціях чинників, фото зламу зразків – на рис. 1.

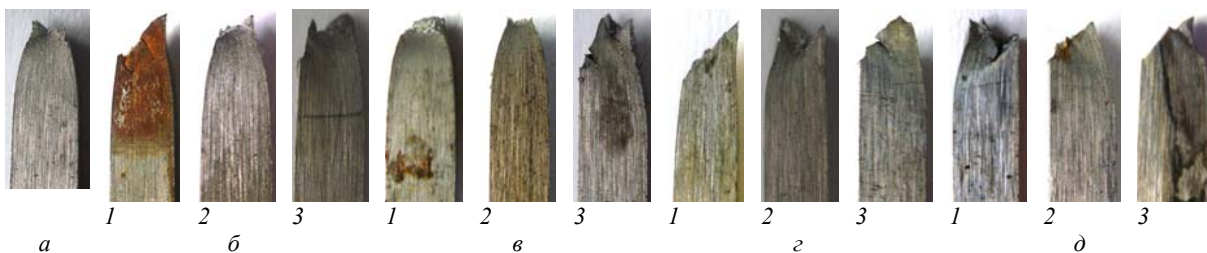
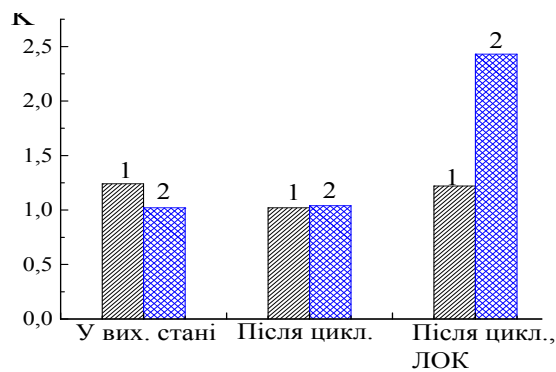


Рис. 1 – Фотографії зламу зразків трубної сталі типу Х70 у повітрі та у модельному ґрунтовому електроліті за різних потенціалів: а – у повітрі; б, в – при повному змочуванні розчином; г, д – при змінному змочуванні; б, в – за потенціалу корозії, г, д – за потенціалу -1,0 В; 1 – у вихідному стані; 2 – після циклювання, 3 – після циклювання з ЛОК

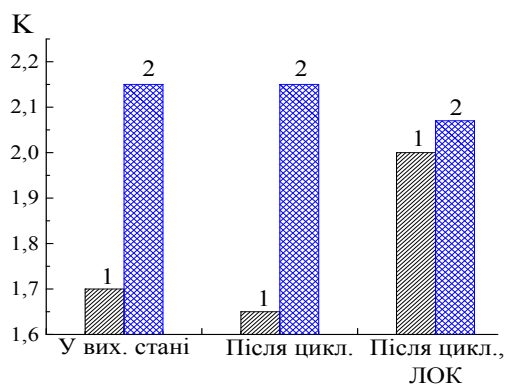
Таблиця 1 – Корозійно-механічні властивості зразків трубної сталі типу Х70 у повітрі та у розчині за різній комбінації стрес-корозійних чинників

Комплекс чинників	τ , год.	ΔL , м	S , мм ²	Ψ %	K	Характер руйнування
Вихідний стан, повітря	19,5	0,00582	3,97	56	-	В'язкий
Вихідний стан, розчин, E_k	18,3	0,00497	4,97	45	1,24	В'язкий
Циклювання, розчин, E_k	17,0	0,00466	4,02	55	1,02	В'язкий
Циклювання, ЛОК, розчин, E_k	10	0,00292	4,69	46	1,22	В'язкий
Вихідний стан, змінне змочування, E_k	21	0,00592	4,05	55	1,02	В'язкий
Циклювання, змінне змочування, E_k	19	0,0061	4,14	54	1,04	В'язкий
Циклювання, ЛОК, змінне змочування, E_k	9	0,00204	6,97	23	2,43	Крихкий, в'язкий долом
Вихідний стан, розчин, -1,0 В	18,0	0,00505	6,07	33	1,7	Крихкий, в'язкий долом
Циклювання, розчин, -1,0 В	17,0	0,00507	5,94	34	1,65	Крихкий, в'язкий долом
Циклювання, ЛОК, розчин, -1,0 В	2,5	0,00051	6,5	28	2,00	Крихкий, в'язкий долом
Вихідний стан, змінне змочування, -1,0 В	14,5	0,00426	6,67	26	2,15	Крихкий, в'язкий долом
Циклювання, змінне змочування, -1,0 В	16	0,00468	6,62	26	2,15	Крихкий, в'язкий долом
Циклювання, ЛОК, розчин, змінне змочування, -1,0 В	7,5	0,00262	6,53	28	2,00	Крихкий, в'язкий долом

Обговорення результатів досліджень схильності трубної сталі до КРН в умовах різної комбінації стрес-корозійних чинників. З аналізу отриманих даних видно, що при повному зануренні в розчин та потенціалі корозії (у вихідному стані, після циклювання та після циклювання з ЛОК) руйнування – в'язке (рис. 1, б, фото 1-3), відносне звужування становило 45 %, 55 % та 46 %, відповідно, оцінена ступінь схильності до КРН – 1,24, 1,02 та 1,22 (табл. 1, рис. 2, а), тобто за такої комбінації чинників труба сталь виявилася не схильною до КРН.



а



б

Рис. 2 – Ступінь схильності до КРН трубної сталі типу Х70 за різних потенціалів: а – за потенціалу корозії; б – та за потенціалу -1,0 В; 1 – при повному зануренні у розчин, 2 – при змінному змочуванні

Слід відмітити, що за цих умов ні циклювання, ні сумісний вплив циклювання та ЛОК не привели до зміни характеру руйнування.

Присутність змінного змочування не сприяло зміні характеру руйнування зразків у вихідному стані та після циклювання (рис. 1, в, фото 1 і 2), яке було в'язким. За цих умов відносне звужування за цих умов становило 55 % та 54 %, відповідно, коефіцієнт схильності до КРН становив 1,02 і 1,04, як видно з табл. 1, рис. 2, а. Тільки для зразків після циклювання з ЛОК відмічене суттєве підвищення схильності до КРН, оцінено коефіцієнтом 2,43, чому відповідало крихке руйнування з в'язким долом, рис. 1, в (фото 3). Виходячи з отриманих даних можна припустити, якщо тривало експлуатований МГ знаходиться в умовах змінного змочування і на його стінці наявні локальні корозійні дефекти висока імовірність зародження та розвитку стрес-корозійної тріщини.

За наведення катодного потенціалу -1,0 В при повному зануренні в розчин для всіх зразків (у вихідному стані, після циклювання та після циклювання з ЛОК), спостерігали зміну характеру руйнування, порівняно з руйнуванням за потенціалу корозії: воно стало крихким з в'язким доломом, рис. 1, г (фото 1-3), що корелювало зі зменшенням відносного звужування до 28-34 % (табл. 1) та вказувало на збільшення частки крихкої складової в зламі. Коефіцієнт схильності до КРН збільшився і для цих умов дорівнював 1,7, 1,65 і 2,0, відповідно.

При змінному змочуванні, як і при повному зануренні, для всіх зразків (у вихідному стані, після циклювання та після циклювання з ЛОК), за потенціалу катодного захисту -1,0 В руйнування мало крихкий характер з в'язким доломом, рис. 1, д (фото 1-3). Відносне звужування становило 26 %, 26 % і 28 %. Відмічене підвищення коефіцієнту схильності до КРН порівняно із повним зануренням близько на 20 % для зразків у вихідному стані та після циклювання, відповідно, рис. 2, б. Ступінь схильності до КРН для зразка після циклювання з ЛОК не змінилася, що імовірно обумовлено тим, що потенціал катодного захисту та ЛОК інтенсивніше впливають на цей процес, ніж змінне змочування.

Висновки

1. Досліджено вплив різних комбінацій стрес-корозійних чинників на схильність трубної сталі типу Х70 до корозійного розтріскування від напруження. Встановлено, що при повному змочуванні за потенціалу корозії трубна сталь з накопиченим рівнем навантажень і локальним осередком корозії трубна не схильна до КРН. В умовах змінного змочування за таких самих умов трубна сталь проявляє схильність до КРН за змінного змочування, яке не проявляється при повному зануренні.

2. За наведеного потенціалу катодного захисту - 1,0 В, як при повному змочуванні, так і при змінному трубна сталь у вихідному стані, з накопиченим рівнем напружень без ЛОК і з накопиченим рівнем напружень та ЛОК схильна до КРН. Змінне змочування сприяє підвищенню схильності до КРН близько на 20 %. Ступінь схильності до КРН сталі з накопиченим рівнем напружень та ЛОК однакова як в умовах повного змочування, так і при змінному, що імовірно обумовлено тим, що потенціал катодного захисту та ЛОК інтенсивніше впливають на цей процес, ніж змінне змочування.

Подяки

Автор висловлює подяку співробітникам відділу № 28 «Технологія зварювання труб» Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України пров. інж. Мельничуку С.Л., інж. П кат. Дарагановій Н. О., м.н.с. Осадчук С. О. за участь в проведенні досліджень та обробленні результатів, зав. відділом, к.т.н. Рибаківу А. О. – в обговоренні отриманих результатів.

Список літератури:

1. Антонов, В. Г. Коррозионное растрескивание под напряжением труб магистральных газопроводов [Текст] / В. Г. Антонов, А. Г. Арабей, В. Н. Воронин, И. А. Долгов, М. М. Кантор, З. Кношински, Ю. П. Сурков. – М.: Наука, 2006. – 104 с.
2. Parkins, R. N. Transgranular stress corrosion cracking of high-pressure pipelines in contact with solutions of near neutral pH [Text] / R. N. Parkins, W. K. Blanchard, B. S. Delanty // Corrosion. – 1994. – Vol. 50, No. 5. – P. 394–408. doi: [10.5006/1.3294348](https://doi.org/10.5006/1.3294348)
3. Fu, A. Q. Characterization of corrosion of X70 pipeline steel in thin electrolyte layer under disbonded coating by scanning Kelvin probe [Text] / A. Q. Fu, X. Tang, Y. F. Cheng // Corrosion Science. – 2009. – Vol. 51, № 1. – P. 186–190. doi: [10.1016/j.corsci.2008.10.018](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.10.018)
4. Глазов, Н. П., Влияние состояния изоляции трубопроводов на скорость их коррозионного разрушения [Текст] / Н. П. Глазов, Н. Н. Глазов, М. А. Башаев // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2009. – № 1. – С. 47–49.
5. Хижняков, В. И. Предупреждение выделения водорода при выборе потенциала катодной защиты подземных стальных трубопроводов [Текст] / В. И. Хижняков // Коррозия: материалы, защита. – 2009. – № 9. – С. 7–10.
6. Мазель, А. Г. Водород – фактор коррозійного растрескивання трубопроводов [Текст] / Мазель А. Г. // Строительство трубопроводов. – 1992. – № 9. – С. 23–26.
7. Asahi, H. Role of Microstructures on Stress Corrosion Cracking of Pipeline Steels in Carbonate-Bicarbonate Solution [Text] / H. Asahi, T. Kushida, M. Kimura, H. Fukai, S. Okano // Corrosion. – 1999. – Vol. 55, № 7. – P. 644–652. doi: [10.5006/1.3284018](https://doi.org/10.5006/1.3284018)
8. Chu, R. Microstructure Dependence of Stress Corrosion Cracking Initiation in X-65 Pipeline Steel Exposed to a Near-Neutral pH Soil Environment [Text] / W. Chen, S.-H. Wang, F. King, T. R. Jack, R. R. Fessler // Corrosion. – 2004. – Vol. 60, № 3. – P. 275–283. doi: [10.5006/1.3287732](https://doi.org/10.5006/1.3287732)

9. Kentish, P. Stress corrosion cracking of gas pipelines – Effect of surface roughness, orientations and flattening [Text] / P. Kentish // Corrosion Science. – 2007. – Vol. 49, № 6. – P. 2521–2533. doi: [10.1016/j.corsci.2006.12.014](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.12.014)
10. Гаррис, Н. Активизация коррозионных процессов на магистральных газопроводах большого диаметра при импульсном изменении температуры [Электронный ресурс] / Н. Гаррис, Г. Аскаргов // Нефтегазовое дело. – 2006. – № 1. Режим доступа: http://ogbus.ru/authors/Garris/Garris_5.pdf
11. Гаррис, Н. А. Изменение теплофизических характеристик грунта вокруг газопровода большого диаметра как причина активизации коррозионных процессов [Текст] / Н. А. Гаррис, И. Г. Исмагилов, А. Н. Бактегареева // Нефтегазовое дело. – 2010. – № 1. – Режим доступа: http://ogbus.ru/authors/Garris/Garris_6.pdf
12. СТО Газпром 2-2.3-173-2007 Инструкция по комплексному обследованию и диагностике магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://znaytovar.ru/gost/2/STO_Gazprom_2231732007_Instruk.html
13. Liu, Z. Y. Stress corrosion cracking behavior of X70 pipe steel in an acidic soil environment [Text] / Z. Y. Liu, X. G. Li, C. W. Du, G. L. Zhai Y. F. Cheng // Corrosion Science. – 2008. – Vol 50, № 8. – P. 2251–2257. doi: [10.1016/j.corsci.2008.05.011](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.05.011)
14. Лурье, Ю. Ю. Справочник по аналитической химии [Текст] / Ю. Ю. Лурье. – М.: Химия. – 1971. – 456 с.

Bibliography (transliterated):

1. Antonov, V. G., Arabey, A. G., Voronin, V. N., Dolgov, I. A., Kantor, M. M., Knoshinski, Z., Surkov, Ju. P. (2006). Korrozionnoe rastreskivanie pod naprjazheniem trub magistral'nyh gazoprovodov. Moscow: Nauka, 104.
2. Parkins, R. N., Blanchard, W. K., Delanty, B. S. (1994). Transgranular stress corrosion cracking of high-pressure pipelines in contact with solutions of near neutral pH. Corrosion, 50 (5), 394–408. doi: [10.5006/1.3294348](https://doi.org/10.5006/1.3294348)
3. Fu, A. Q., Tang, X., Cheng, Y. F. (2009). Characterization of corrosion of X70 pipeline steel in thin electrolyte layer under disbonded coating by scanning Kelvin probe. Corrosion Science, 51 (1), 186–190. doi: [10.1016/j.corsci.2008.10.018](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.10.018)
4. Glazov, N. P., Glazov, N. N., Bashaev, M. A. (2009). Vlijanie sostojanija izoljacji truboprovodov na skorost' ih korrozionnogo razrushenija. Truboprovodnyj transport: teorija i praktika, 1, 47–49.
5. Khyzhniakov, V. Y. (2009). Preduprezhdenye vydelenija vodoroda pry vybore potentsyala katodnoi zashchyty podzemnykh stalnykh truboprovodov. Korrozija: materijaly, zashchyta, 9, 7–10.
6. Mazel', A. Gh. (1992). Vodorod – faktor korrozionnogo rastreskivanyja truboprovodov. Stroitelstvo truboprovodov, 9, 23–26.
7. Asahi, H., Kushida, T., Kimura, M., Fukai, H., Okano, S. (1999). Role of Microstructures on Stress Corrosion Cracking of Pipeline Steels in Carbonate-Bicarbonate Solution. Corrosion, 55 (7), 644–652. doi: [10.5006/1.3284018](https://doi.org/10.5006/1.3284018)
8. Chu, R., Chen, W., Wang, S.-H., King, F., Jack, T. R., Fessler, R. R. (2004). Microstructure Dependence of Stress Corrosion Cracking Initiation in X-65 Pipeline Steel Exposed to a Near-Neutral pH Soil Environment. Corrosion, 60 (3), 275–283. doi: [10.5006/1.3287732](https://doi.org/10.5006/1.3287732)
9. Kentish, P. (2007). Stress corrosion cracking of gas pipelines – Effect of surface roughness, orientations and flattening. Corrosion Science, 49 (6), 2521–2533. doi: [10.1016/j.corsci.2006.12.014](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.12.014)
10. Gharrys, N., Askarov, Gh. (2006). Aktyvyzacyja korrozionnykh processov na maghystal'nykh ghazoprovodakh bol'shogo diametra pry ympul'snom yzmenenyy temperatury Neftegazovoe delo, 1. Available at: http://ogbus.ru/authors/Garris/Garris_5.pdf
11. Gharrys, N. A., Ysmaghylov, Y. Gh., Bakhteghareeva, A. N. (2010). Yzmenenye teplofyzicheskykh kharakterystyk ghrunta vokrug ghazoprovoda bol'shogo diametra kak prychyna aktyvyzacyi korrozionnykh processov. Neftegazovoe delo, 1. Available at: http://ogbus.ru/authors/Garris/Garris_6.pdf
12. STO Ghazprom 2-2.3-173-2007. Ynstrukcyja po kompleksnomu obsledovanyju y dyagnostyke maghystal'nykh ghazoprovodov, podverzhennykh korrozionnomu rastreskivanyju pod naprjazheniem. Available at:

https://znaytovar.ru/gost/2/STO_Gazprom_2231732007_Instruk.html

13. Liu, Z. Y., Li, X. G., Du, C. W., Zhai, G. L., Cheng, Y. F. (2008). Stress corrosion cracking behavior of X70 pipe steel in an acidic

soil environment. Corrosion Science, 50 (8), 2251–2257. doi: [10.1016/j.corsci.2008.05.011](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.05.011)

14. Lur'e, Ju. Ju. (1971). Spravochnik po analiticheskoj himii. Moscow: Himija. 456.

Надійшла (received) 19.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз впливу комбінації стрес-корозійних чинників на корозійне розтріскування від напруження трубної сталі при рН, близьких до нейтральних/ Л. І. Ниркова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 16(1238). – С.12–16. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Анализ влияния комбинации стресс-коррозионных факторов на коррозионное растрескивание под напряжения трубой стали при рН, близких к нейтральным/ Л. И. Ныркова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 16(1238). – С. 12–16.– Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Analysis of influence of stress-corrosion factors combination on stress-corrosion cracking of pipe steel at near neutral pH / L. Nyrkova // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 12–16.– Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ниркова Людмила Іванівна – кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник відділу № 28 «Технологія зварювання труб» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України; вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ-150, Україна, 03150, e-mail: lnyrkova@gmail.com

Ныркова Людмила Ивановна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник отдела № 28 «Технология сварки труб» Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины; ул. Казимира Малевича, 11, г. Киев, Украина, 03150, тел.: (044) 205-25-81, e-mail: lnyrkova@gmail.com

Lyudmila Nyrkova – PhD, senior staff scientist of Department No 28 «Technology of pipes welding» Electric Welding Institute named by E. O Paton NAS of Ukraine; Kazimir Malevich str., 11, Kyiv, Ukraine, 03150 Tel.: (044) 205-25-81, e-mail: lnyrkova@gmail.com

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА КОМПЛЕКСАМИ

УДК.514.18

Є. О. АДОНЬЄВ, В. М. ВЕРЕЩАГА, К. Ю. ЛИСЕНКО

РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ ТЕХНІКИ АЛГЕБРАЇЧНОГО ФОРМУВАННЯ Б-ФУНКЦІЙ ДЛЯ ЧОТИРЬОХ ТОЧОК

Розроблено алгебраїчну техніку формування Б-функцій P_i для чотирьох точок, у загальному вигляді, тобто для усіх можливих варіантів значень параметрів від 0 до 1 для двох точок B і C , що знаходяться всередині відрізка AD . Запропоновано техніку знаходження кореляційних коефіцієнтів Б-функцій P_i . Наведено приклад застосування узагальненої техніки формування Б-функцій P_i .

Ключові слова: Б-функції, Б-криві, техніка формування, кореляційний коефіцієнт.

Разработана алгебраическая техника формирования Б-функций P_i для четырех точек, в общем виде, то есть для всех возможных вариантов значений параметров от 0 до 1 для двух точек B и C , которые находятся внутри отрезка AD . Предложено технику нахождения корреляционных коэффициентов Б-функций P_i . Приведен пример применения обобщенной техники формирования Б-функций P_i .

Ключевые слова: Б-функции, Б-кривые, техника формирования, корреляционный коэффициент.

The article proposed algebraic technique of forming B-functions (Balyuba functions) P_i to four points, in general, ie for all possible parameter values from 0 to 1 for the two points B and C, which are within the segment AD . A technique of finding of correlation coefficients B-functions P_i is proposed. An example of using generalized forming technique of B-functions P_i was shown. The application of the mathematical apparatus of the Balyuba-Naidysh point calculus for the modeling of multifactor processes is considered. In particular, we consider a method for constructing parabolic response surfaces on the basis of B-functions in point calculus. The authors take as a basis the scheme for constructing a second-order parabola in the point calculus. Researches of the properties of the function-parameters on the examples of constructing the curve from four points showed that the B-functions can also be obtained algebraically for the purpose of constructing models of multifactorial processes.

Keywords: four points, B-functions, B-curves, functional correlation coefficient, generalized forming technique, point calculation.

Вступ. У рамках точкового БН-числення [1] досить часто застосовують функції-параметри, які названі авторами Б-функції, що, при визначенні наперед значеннях параметрів, дорівнюють одиниці або нулю Б-функції, що позначаються P_i , є параметрами Б-кривих, які подані у точковій формі, і використовуються у створенні моделей процесів або ситуацій. Наразі існує проблема подальшого розвитку теорії Б-функцій, якій і присвячено дослідження цієї статті.

Аналіз останніх досліджень. У попередніх наших дослідженнях, що знаходяться у публікаціях, було розроблено техніку частинну для шістьох точок, узагальнену для трьох точок. З метою створення теорії Б-функцій, вважаємо за необхідне розробляти техніку формування Б-функцій для кривих, що проходять через більшу кількість, наперед заданих, точок.

Формування мети дослідження. Розробити техніку алгебраїчного формування Б-функцій, в узагальненій формі, для Б-кривих, які проходять через чотири, наперед визначених, точки.

Основна частина. Розглянемо випадок створення Б-функцій для Б-кривої, що повинна пройти через чотири, наперед визначені, точки A, B, C, D (рис.1).

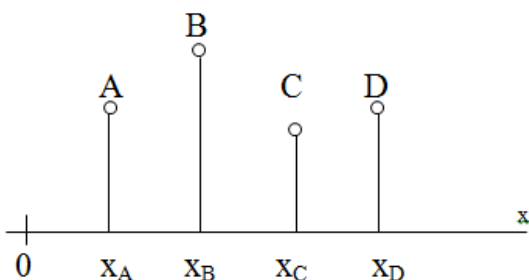


Рис. 1 – Схема щодо визначення параметру t_i ($i = A, B, C, D$).

Нехай параметр t , що є аргументом для Б-функцій, визначається як відношення різниці координат x_i , для кожної з чотирьох точок

$$\begin{aligned} t_A &= \frac{x_A - x_A}{x_D - x_A} = 0; & t_B &= \frac{x_B - x_A}{x_D - x_A} = \frac{x_{BA}}{x_{DA}}; \\ t_C &= \frac{x_C - x_A}{x_D - x_A} = \frac{x_{CA}}{x_{DA}}; \\ t_D &= \frac{x_D - x_A}{x_D - x_A} = \frac{x_{DA}}{x_{DA}} = 1. \end{aligned} \quad (1)$$

Безумовно, для визначення аргументу t_i , можна обрати інші відношення, але у цій статті їх не будемо розглядати. Як бачимо з (1), $0 \leq t \leq 1$. Нехай Б-крива, що проходить через визначені точки A, B, C, D , задана точковим рівнянням:

$$M = AP_A + BP_B + CP_C + DP_D, \quad (2)$$

де P_A, P_B, P_C, P_D – Б-функції, які необхідно сформувати,

$$P_A + P_B + P_C + P_D = 1. \quad (3)$$

Розглянемо тепер окремо кожну з Б-функцій P_i , де $i = A : B : C : D$, для значень аргументу t_i з (1). Кожна з цих Б-функцій один раз має прийняти значення одиниці і три рази повинна дорівнювати нулю.

Наприклад, P_A у точці A дорівнює одиниці, а в точках B, C, D $P_A = 0$. Виходячи з наявного досвіду формування Б-функцій, спочатку P_A будемо формувати у точках B, C, D і наостанок у точці A , у якій $P_A = 1$. Для формування P_i необхідно ввести аргумент $\bar{t} = 1 - t$, що доповнює t до одиниці.

1) Сформуємо P_A для точки B , у якій $t_B = \frac{x_{BA}}{x_{DA}}$, $\bar{t}_B = 1 - \frac{x_{BA}}{x_{DA}}$, $P_A = 0$. Найпростіший вигляд Б-функції буде наступним:

$$P_A = \alpha_{B1} t_B - \bar{t}_B, \text{ або } P_A = t_B - \alpha_{B2} \bar{t}_B. \quad (4)$$

Звідкіля

$$\alpha_{B1} = \frac{\bar{t}_B}{t_B}, \text{ або } \alpha_{B2} = \frac{t_B}{\bar{t}_B}, \text{ тобто } \alpha_{B2} = \frac{1}{\alpha_{B1}}. \quad (5)$$

Тут позначення α обрано через те, формується Б-функція P_A для точки A у точці B , на що вказує індекс B 1. Одиниця відповідає першому варіанту.

У подальшому будемо розглядати перший варіант із (4).

$$P_A = \alpha_{B1} t - \bar{t}. \quad (6)$$

Зауважимо, тут показано лише два варіанти для коефіцієнту α , але їх можна утворити безліч.

2) Розглянемо техніку подальшого формування Б-функції P_A у точці C , аргументами у якій є $t_C = \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$ та $\bar{t}_C = 1 - \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$, $P_A = 0$, Б-функція у точці C повинна враховувати (5), тому у (6) підставимо аргументи для точки C , дістанемо:

$$P_A = \alpha_{B1} \frac{x_{CA}}{x_{DA}} - 1 + \frac{x_{CA}}{x_{DA}} = \frac{x_{CA}}{x_{DA}} (\alpha_{B1} + 1) - 1. \quad (7)$$

Зауважимо, що при будь-яких значеннях x_{CA} , x_{DA} , α_{B1} рівняння (7) не буде дорівнювати нулю, а за умовою утворення Б-функцій P_A у точці C має дорівнювати нулю, тобто

$$P_A = b_1 (\alpha_{C1} t_C - \bar{t}_C), \text{ або } P_A = b_2 (t_C - \alpha_{C2} \bar{t}_C), \quad (8)$$

де

$$b_1 = \alpha_{B1} t - \bar{t}; b_2 = t - \alpha_{B2} \bar{t}.$$

У (7) розглянемо перший варіант, який має дорівнювати нулю, дістанемо:

$$b_1 (\alpha_{C1} t_C - \bar{t}_C) = 0, \text{ звідкіля } \alpha_{C1} = \frac{\bar{t}_C}{t_C}; \alpha_{C2} = \frac{1}{\alpha_{C1}}. \quad (9)$$

Якщо позначимо $\alpha_{C1} t_C - \bar{t}_C = c_1$, то Б-функція P_A у точці C , матиме вигляд:

$$P_A = b_1 c_1 = (\alpha_{B1} t - \bar{t}) (\alpha_{C1} t - \bar{t}). \quad (10)$$

3) Розглянемо техніку подальшого формування Б-функції P_A у точці D , аргументами у якій є $t = 1; \bar{t} = 0$; Б-функція у точці D повинна враховувати (10) і дорівнювати 0, у такому разі P_A у точці D матиме вигляд

$$P_A = b_1 c_1 \bar{t}. \quad (11)$$

4) І насамкінець, сформуємо Б-функцію P_A у точці A , у якій аргументи $t_A = 1; \bar{t}_A = 0; P_A = 1$, тоді Б-функція P_A у точці A матиме вигляд:

$$P_A = |b_1 c_1 \bar{t}| = |\bar{t} (\alpha_{B1} t - \bar{t}) (\alpha_{C1} t - \bar{t})|. \quad (12)$$

$$t = 0; \bar{t} = 1; P_B = 0.$$

5) Розглянемо техніку формування Б-функції P_B у точці A , у якій аргумент C

Враховуючи вихідні умови за аргументом, можемо записати, що у точці :

$$P_B = t. \quad (13)$$

6) Розглянемо подальше формування Б-функції P_B у точці C , аргументи у якій є $t_C = \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$ та

$\bar{t} = 1 - \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$, $P_B = 0$, Б-функція у точці повинна враховувати (13), тому можемо записати:

$$P_B = t (\beta_{C1} t_C - \bar{t}_C). \quad (14)$$

Дорівняємо (14) нулю, отримаємо:

$$t_C (\beta_{C1} t_C - \bar{t}_C) = 0,$$

звідкіля

$$\beta_{C1} = \frac{\bar{t}_C}{t_C}; \beta_{C2} = \frac{1}{\beta_{C1}}. \quad (15)$$

Враховуючи (15), можемо записати Б-функцію з (14) у точці C наступним чином:

$$P_B = t (\beta_{C1} t - \bar{t}) = c_2. \quad (16)$$

7) Сформуємо Б-функцію P_B у точці D , аргументами у якій є $t_D = 1; \bar{t}_D = 0; P_B = 0$.

Б-функція P_B у точці D повинна враховувати (16), тоді маємо записати:

$$P_B = c_2 \bar{t}. \quad (17)$$

8) І насамкінець, сформуємо Б-функцію P_B у точці B , у якій аргументи $t_B = \frac{x_{BA}}{x_{DA}}$ та $\frac{x_{BA}}{x_{DA}}$, $P_B = 1$.

Скористаємося Б-функцією (16)

$$\beta \frac{x_{BA}}{x_{DA}} \left(1 - \frac{x_{BA}}{x_{DA}} \right) \left(\beta_{C1} \frac{x_{BA}}{x_{DA}} - \left(1 - \frac{x_{BA}}{x_{DA}} \right) \right) = 1, \bar{t}_B = 1 -$$

звідкіля дістанемо

$$\beta = \frac{1}{\frac{x_{BA}}{x_{DA}} \left(1 - \frac{x_{BA}}{x_{DA}} \right) \left(\beta_{C1} \frac{x_{BA}}{x_{DA}} - \left(1 - \frac{x_{BA}}{x_{DA}} \right) \right)}. \quad (18)$$

Тоді, враховуючи (18) та (17), Б-функція P_B у точці B матиме вигляд:

$$P_B = |\beta \bar{t}_C| = |\beta t \bar{t} (\beta_{C1} t - \bar{t})|. \quad (19)$$

9) Розглянемо техніку формування Б-функції P_C у точці A , у якій аргумент $t = 0; \bar{t} = 1$, а сама $P_C = 0$. Тоді:

$$P_C = t. \quad \text{т} \quad (20)$$

10) Сформуємо Б-функцію P_C у точці B , у якій $t_B = \frac{x_{BA}}{x_{DA}}$; $\bar{t}_B = 1 - \frac{x_{BA}}{x_{DA}}$, а функція P_C має дорівнювати нулю $P_C = 0$. Враховуючи (20), маємо записати:

$$P_C = t (\gamma_{B1} t_B - \bar{t}_B),$$

тоді

$$\gamma_{B1} t_B - \bar{t}_B = 0 \rightarrow \gamma_{B1} = \frac{\bar{t}_B}{t_B}$$

$$t_B - \gamma_{B2} \bar{t}_B = 0 \rightarrow \gamma_{B2} = \frac{t_B}{\bar{t}_B}, \quad (21)$$

звідкіля

$$\gamma_{B2} = \frac{1}{\gamma_{B1}}.$$

Тоді кінцевий вираз Б-функції P_C у точці B матиме вигляд:

$$P_C = t (\gamma_{B1} t - \bar{t}) = c_3. \quad (22)$$

11) Сформуємо Б-функцію P_C у точці D , у якій аргументи дорівнюють $t = 1; \bar{t} = 0$, а Б-функція $P_C = 0$.

$$P_C = c_3 \bar{t} = t \bar{t} (\gamma_{B1} t - \bar{t}). \quad (23)$$

12) І насамкінець, сформуємо Б-функцію P_C у точці C , у якій аргументи дорівнюють $t_C = \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$ та

$\bar{t}_C = 1 - \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$, а сама Б-функція $P_C = 1$. Враховуючи

вихідні дані, маємо записати:

$$P_C = \gamma_{C1} t_C (1 - t_C) (\gamma_{B1} t_C - \bar{t}_C),$$

тоді

$$\gamma = \frac{1}{t_C (1 - t_C) (\gamma_{B1} t_C - \bar{t}_C)}. \quad (24)$$

Кінцевий вираз Б-функції P_C у точці C матиме вигляд:

$$P_C = |\gamma_{C1} t \bar{t} (\gamma_{B1} t - \bar{t})|. \quad (25)$$

13) Сформуємо Б-функцію P_D у точці A , у якій аргументами є $t = 0; \bar{t} = 1$, а сама Б-функція $P_D = 0$. Виходячи з вихідних даних

$$P_D = t. \quad (26)$$

14) Сформуємо Б-функцію P_D у точці B , у якій аргументами є $t_B = \frac{x_{BA}}{x_{DA}}$; $\bar{t}_B = 1 - \frac{x_{BA}}{x_{DA}}$, а Б-функція $P_D = 0$. Визначимо коефіцієнти:

$$\delta_{B1} t_B - \bar{t}_B = 0 \rightarrow \delta_{B1} = \frac{\bar{t}_B}{t_B};$$

$$t_B - \delta_{B2} \bar{t}_B = 0 \rightarrow \delta_{B2} = \frac{t_B}{\bar{t}_B}; \rightarrow \delta_{B2} = \frac{1}{\delta_{B1}}. \quad (27)$$

Тоді кінцевий вираз Б-функції у точці B матиме вигляд:

$$P_D = t (\delta_{B1} t - \bar{t}) = d_1. \quad (28)$$

15) Сформуємо Б-функцію P_D у точці C , у якій аргументами є $t_C = \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$; $\bar{t}_C = 1 - \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$, а Б-функція $P_D = 0$.

Визначимо коефіцієнти:

$$\delta_{C1} t_C - \bar{t}_C = 0 \rightarrow \delta_{C1} = \frac{\bar{t}_C}{t_C};$$

$$t_C - \delta_{C2} \bar{t}_C = 0 \rightarrow \delta_{C2} = \frac{t_C}{\bar{t}_C}; \rightarrow \delta_{C2} = \frac{1}{\delta_{C1}}. \quad (29)$$

Тоді кінцевий вираз Б-функції P_D у точці C матиме вигляд:

$$P_D = d_1 (\delta_{C1} t - \bar{t}). \quad (30)$$

16) Сформуємо Б-функцію P_D у точці D , аргументами у якій є $t_D = 1; \bar{t}_D = 0; P_D = 1$.

Враховуючи вихідні дані можемо записати:

$$\delta t(\delta_{B1}t - \bar{t})(\delta_{C1}t - \bar{t}) = 1,$$

звідкіля

$$\delta = \frac{1}{t(\delta_{B1}t - \bar{t})(\delta_{C1}t - \bar{t})}. \quad (31)$$

Тоді кінцевий вираз Б-функції P_D у точці D матиме вигляд:

$$P_D = |\delta t(\delta_{B1}t - \bar{t})(\delta_{C1}t - \bar{t})|. \quad (32)$$

Згуртуємо кінцеві вирази Б-функцій P_i у табл. 1.

Таблиця 1 – Узагальнені вирази Б-функцій P_i

P_i	Узагальнений вираз	Номер за текстом
P_A	$ \bar{t}(\alpha_{B1}t - \bar{t})(\alpha_{C1}t - \bar{t}) $	(12)
P_B	$ \beta t \bar{t}(\beta_{C1}t - \bar{t}) $	(19)
P_C	$ \gamma_{C1} \bar{t}(\gamma_{B1}t - \bar{t}) $	(25)
P_D	$ \delta t(\delta_{B1}t - \bar{t})(\delta_{C1}t - \bar{t}) $	(32)

Якщо уважно придивитися, то можна побачити симетричність P_A і P_D , P_B і P_C , тобто кінцевих Б-функцій P_A і P_D та Б-функцій, що знаходяться всередині P_B і P_C . Дійсно, симетричність, відповідних за місцем розташування, Б-функцій P_i є характерною особливістю.

Приклад. Нехай координати x вихідних точок дорівнюють $x_A = 2; x_B = 5; x_C = 9; x_D = 11$, тоді у відповідності до (1), $t_A = 0; t_B = \frac{1}{3}; t_C = \frac{7}{9}; t_D = 1$.

Розрахуємо за (12) P_A для усіх t_A, t_B, t_C, t_D .

Значення P_A :

– у точці $A: t = 0; \bar{t} = 1$; тоді

$$P_A = |1(0-1)(0-1)| = 1;$$

– у точці $B: t = \frac{1}{3}; \bar{t} = \frac{2}{3}$; тоді

$$P_A = \left| \frac{2}{3} \left(\frac{2}{3} - \frac{2}{3} \right) \left(\frac{2}{21} - \frac{2}{3} \right) \right| = 0;$$

– у точці $C: t = \frac{7}{9}; \bar{t} = \frac{2}{9}$; тоді

$$P_A = \left| \frac{2}{9} \left(2 \cdot \frac{7}{9} - \frac{2}{9} \right) \left(\frac{2}{9} - \frac{2}{9} \right) \right| = 0;$$

– у точці $D: t = 1; \bar{t} = 0$; тоді

$$P_A = \left| 0(2-0) \left(\frac{2}{7} - 0 \right) \right| = 0;$$

Розрахуємо за (19) P_B для усіх t_A, t_B, t_C, t_D .

Значення P_B :

– у точці $A: t = 0; \bar{t} = 1$; тоді

$$P_B = \left| 1 \cdot 0 \cdot 1 \left(\frac{2}{7} \cdot 0 - 1 \right) \right| = 0;$$

– у точці $B: t = \frac{1}{3}; \bar{t} = \frac{2}{3}$; тоді

$$P_B = \left| -\frac{189}{24} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{2}{3} \left(\frac{4}{189} - \frac{4}{27} \right) \right| = 1;$$

– у точці $C: t = \frac{7}{9}; \bar{t} = \frac{2}{9}$; тоді

$$P_B = \left| \beta \cdot \frac{7}{9} \cdot \frac{2}{9} \left(\frac{2}{9} \cdot \frac{7}{9} - \frac{2}{9} \right) \right| = 0;$$

– у точці $D: t = 1; \bar{t} = 0$; тоді

$$P_B = \left| \beta \cdot 1 \cdot 0 \left(\frac{2}{7} \cdot 1 - 0 \right) \right| = 0;$$

Розрахуємо за (25) P_C для усіх t_A, t_B, t_C, t_D .

Значення P_C :

– у точці $A: t = 0; \bar{t} = 1$; тоді

$$P_C = |1 \cdot 0 \cdot 1(2 \cdot 0 - 1)| = 0;$$

– у точці $B: t = \frac{1}{3}; \bar{t} = \frac{2}{3}$; тоді

$$P_C = \left| \gamma \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{2}{3} \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3} - \frac{2}{3} \right) \right| = 0;$$

– у точці $C: t = \frac{7}{9}; \bar{t} = \frac{2}{9}$; тоді

$$P_C = \left| \frac{243}{56} \cdot \frac{7}{9} \cdot \frac{2}{9} \left(2 \cdot \frac{7}{9} - \frac{2}{9} \right) \right| = 1;$$

– у точці $D: t = 1; \bar{t} = 0$; тоді

$$P_C = |\gamma \cdot 1 \cdot 0(2 \cdot 1 - 0)| = 0;$$

Розрахуємо за (32) P_D для усіх t_A, t_B, t_C, t_D .

Значення P_D :

– у точці $A: t = 0; \bar{t} = 1$; тоді

$$P_D = \left| 0 \cdot \delta(2 \cdot 0 - 1) \left(\frac{2}{7} \cdot 0 - 1 \right) \right| = 0;$$

– у точці $B: t = \frac{1}{3}; \bar{t} = \frac{2}{3}$; тоді

$$P_D = \left| \frac{1}{3} \cdot \delta \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3} - \frac{2}{3} \right) \left(\frac{2}{7} \cdot \frac{1}{3} - \frac{2}{3} \right) \right| = 0;$$

– у точці $C: t = \frac{7}{9}; \bar{t} = \frac{2}{9}$; тоді

$$P_D = \left| \delta \cdot \frac{7}{9} \left(2 \cdot \frac{7}{9} - \frac{2}{9} \right) \left(\frac{2}{7} \cdot \frac{7}{9} - \frac{2}{9} \right) \right| = 0;$$

– у точці $D: t=1; \bar{t}=0$; тоді

$$P_D = \left| \frac{7}{4} \cdot 1(2 \cdot 1 - 0) \left(\frac{2}{7} \cdot 1 - 0 \right) \right| = 1.$$

Результати розрахунків за цим прикладом зведемо у табл. 2.

Таблиця 2 – Розрахунки за прикладом

	A	B	C	D
P_A	1	0	0	0
P_B	0	1	0	0
P_C	0	0	1	0
P_D	0	0	0	1
ΣP_i	1	1	1	1

Як бачимо у вихідних точках, у яких було сформовано Б-функції P_i , їхня сума $\Sigma P_i = 1$. Однак, у проміжку між ними не завжди буде зберігатися одиниця для суми P_i . Це відбувається через те, що значення $P_i = 0$ не є зумовленим єдиною геометричною схемою і можуть належати до різних геометричних схем. Для усунення цієї не зумовленості треба для будь-яких значень параметрів t що не співпадають з параметрами точок, наприклад

$$\begin{aligned} t_{AB} &= \frac{t_A + t_B}{2}; t_{BC1} = \frac{t_B + t_C}{3}; \\ t_{BC2} &= \frac{2(t_B + t_C)}{3}; t_{CD} = \frac{t_C + t_D}{2}. \end{aligned} \quad (33)$$

У цьому прикладі на відріжку CB взято два параметри то, що у наведеному вище прикладі, відрізок CB є найбільшим, а для взаємно-однозначного розв'язання необхідно розглянути не менш чотирьох рівнянь.

$$\begin{aligned} &a \left| \bar{t}_{AB} (\alpha_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) (\alpha_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| + \\ &+ b \left| \beta t_{AB} \bar{t}_{AB} (\beta_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| + \\ &+ c \left| \gamma t_{AB} \bar{t}_{AB} (\gamma_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| + \\ &+ d \left| \delta t_{AB} (\delta_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) (\delta_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| = 1. \end{aligned} \quad (34)$$

Введемо позначення:

$$\begin{aligned} x_{11} &= \left| \bar{t}_{AB} (\alpha_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) (\alpha_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| \\ x_{11} &= \left| \bar{t}_{AB} (\alpha_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) (\alpha_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| \\ x_{11} &= \left| \bar{t}_{AB} (\alpha_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) (\alpha_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| \\ x_{14} &= \left| \delta t_{AB} (\delta_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) (\delta_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| \\ x_{14} &= \left| \delta t_{AB} (\delta_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) (\delta_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| \\ x_{22} &= \left| \beta t_{BC1} \bar{t}_{BC1} (\beta_{C1} t_{BC1} - \bar{t}_{BC1}) \right| \\ x_{23} &= \left| \gamma t_{BC1} \bar{t}_{BC1} (\gamma_{B1} t_{BC1} - \bar{t}_{BC1}) \right| \\ x_{24} &= \left| \delta t_{BC1} (\delta_{B1} t_{BC1} - \bar{t}_{BC1}) (\delta_{C1} t_{BC1} - \bar{t}_{BC1}) \right| \\ x_{31} &= \left| \bar{t}_{BC2} (\alpha_{B1} t_{BC2} - \bar{t}_{BC2}) (\alpha_{C1} t_{BC2} - \bar{t}_{BC2}) \right| \\ x_{32} &= \left| \beta t_{BC2} \bar{t}_{BC2} (\beta_{C1} t_{BC2} - \bar{t}_{BC2}) \right| \\ x_{33} &= \left| \gamma t_{BC2} \bar{t}_{BC2} (\gamma_{B1} t_{BC2} - \bar{t}_{BC2}) \right| \\ x_{34} &= \left| \delta t_{BC2} (\delta_{B1} t_{BC2} - \bar{t}_{BC2}) (\delta_{C1} t_{BC2} - \bar{t}_{BC2}) \right| \\ x_{41} &= \left| \bar{t}_{CD} (\alpha_{B1} t_{CD} - \bar{t}_{CD}) (\alpha_{C1} t_{CD} - \bar{t}_{CD}) \right| \\ x_{42} &= \left| \beta t_{CD} \bar{t}_{CD} (\beta_{C1} t_{CD} - \bar{t}_{CD}) \right| \\ x_{43} &= \left| \gamma t_{CD} \bar{t}_{CD} (\gamma_{B1} t_{CD} - \bar{t}_{CD}) \right| \\ x_{44} &= \left| \delta t_{CD} (\delta_{B1} t_{CD} - \bar{t}_{CD}) (\delta_{C1} t_{CD} - \bar{t}_{CD}) \right| \end{aligned} \quad (35)$$

Тоді, враховуючи (35), аналогічно (34), складемо систему рівнянь, за допомогою якої буде здійснено кореляцію сформованих Б-функцій:

$$\left. \begin{aligned} ax_{11} + bx_{12} + cx_{13} + dx_{14} &= 1 \\ ax_{21} + bx_{22} + cx_{23} + dx_{24} &= 1 \\ ax_{31} + bx_{32} + cx_{33} + dx_{34} &= 1 \\ ax_{41} + bx_{42} + cx_{43} + dx_{44} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Застосовуючи до (36) правило Крамера, отримаємо значення кореляційних коефіцієнтів:

$$a = \frac{D_a}{D}; b = \frac{D_b}{D}; c = \frac{D_c}{D}; d = \frac{D_d}{D}, \quad (37)$$

де

$$D = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{vmatrix}; D_a = \begin{vmatrix} 1 & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ 1 & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ 1 & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ 1 & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{vmatrix};$$

$$D_b = \begin{vmatrix} x_{11} & 1 & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & 1 & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & 1 & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & 1 & x_{43} & x_{44} \end{vmatrix}; D_c = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & 1 & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & 1 & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & 1 & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & 1 & x_{44} \end{vmatrix};$$

$$D_d = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & 1 \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & 1 \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & 1 \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & 1 \end{vmatrix}. \quad (38)$$

Треба зауважити, що за допомогою коефіцієнтів з (37) відбувається кореляція не тільки у точках з аргументами (33), а й неперервно по усій Б-кривій (2) в цілому:

$$aP_A + bP_B + cP_C + dP_D = 1. \quad (39)$$

З урахуванням (39), точкове рівняння Б-кривої (2) матиме вигляд:

$$M = AaP_A + BbP_B + CcP_C + DdP_D. \quad (40)$$

Висновок. Розроблено узагальнену техніку алгебраїчного формування Б-функцій P_i для Б-кривої, яка мусить пройти через чотири, наперед визначені, точки. При цьому, Б-функції P_i формуються на базі параметру t_i , який є відношенням різниці абсцис вихідних точок. Запропоновано техніку знаходження коефіцієнтів кореляції для Б-функцій P_i з метою об'єднання їх для подання Б-кривої у вигляді точкового рівняння.

Застосування запропонованої техніки алгебраїчного формування Б-функцій P_i дозволить створити клас Б-кривих, на основі яких буде виконуватися моделювання багатофакторних процесів.

Список літератури:

1. Адоньєв, Є. О. Застосування поверхонь відгуку при моделюванні сталого енергетичного розвитку міст [Текст] / Є. О. Адоньєв, В. М. Верещага // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2016. – № 3. – С. 471–476.
2. Балюба, І. Г. Точечное исчисление [Текст]: учеб. пос. / І. Г. Балюба, В. М. Найдьш; под ред. В. М. Верещаги. – Мелітополь: МГПУ ім. Б. Хмельницького, 2015. – 236 с.
3. Бумага, А. І. Точкове рівняння дуги параболи другого порядку [Текст] / А. І. Бумага // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – 2012. – № 90 – С. 49–52.
4. Верещага, В. М. Спосіб згортання (розгортання) чарунок [Текст] / В. М. Верещага, Є. О. Адоньєв, О. М. Павленко // Сучасні проблеми моделювання. – 2016. – № 7. – С. 32–38.
5. Верещага, В. М. Монофакторний принцип побудови моделі багатофакторних задач термомодифікації будівель [Текст] / В. М. Верещага, Є. О. Адоньєв // Сучасні проблеми моделювання. – 2016. – № 7. – С. 24–31.
6. Конопачий, Є. В. Геометричне моделювання алгебраїчних кривих та їх використання при конструюванні поверхонь у

- точковому численні Балюби-Найдьша [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01 / Є. В. Конопачий. – Мелітополь: ТДАТУ, 2012. – 26 с.
7. Кучеренко, В. В. Формалізовані геометричні моделі нерегулярної поверхні для гіперкілісної дискретної скінченної множини точок [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01 / В. В. Кучеренко. – Мелітополь, ТДАТУ, 2013 – 234 с.
8. Мартинов, В. Л. Моделювання оптимальних геометричних параметрів енергоефективних будівель гранної форми [Текст]: дис. ... Докт. Тех. Наук : 05.01.01 / в. Л. Мартинов. – Київ, 2015. – 390 с.
9. Нечволод, Л. І. Сучасний словник іншомовних слів [Текст] / Л. І. Нечволод. – Харків: Торсинг плюс, 2007. – 768 с.
10. Підгорний, О. Л. Актуальні проблеми геометричного моделювання в задачах енергозбереження у будівництві [Текст] / О. Л. Підгорний, В. О. Плоский, О. В. Сергійчук // Вентиляція, освітлення та теплозапобігання. – 2010. – № 14. – С. 25–31.

Bibliography (transliterated):

1. Adoniev, Ye. O., Vereshchaha, V. M. (2016). Zastosuvannya poverkhon vidhuku pry modeliuванні staloho enerhetychnoho rozvytku mist. Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, 3, 471–476.
2. Baliuba, Y. H., Naidysh, V. M., ed.: Vereshchaha V. M. (2015). Tochechnoe yschyslenye. Melitopol: MHPU ym. B. Khmelnytskoho, 234.
3. Bumaha, A. I. (2012). Tochkovye rivniannya dughy paraboly druhogo poriadku. Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika, 90, 49–52.
4. Vereshchaha, V. M., Adoniev, Ye. O., Pavlenko, O. M. (2016). Sposib zhortannia (rozhortannia) charunok. Suchasni problemy modeliuвання, 7, 32–38.
5. Vereshchaha, V. M., Adoniev, Ye. O. (2016) Monofaktorny pryntsy pobudovy modeli bahatofaktornykh zadach termorenovatsii budivel. Suchasni problemy modeliuвання, 7, 24–31.
6. Konopatskiy, Ye. V. (2012). Heometrychne modeliuвання alhebraichnykh kryvykh ta yikh vykorystannia pry konstruiuvanni poverkhon u tochkovomu chyslenni Baliuby-Naidysya, Melitopol: TDAU, 163.
7. Kucherenko, V. V. (2013). Formalizovani heometrychni modeli nerehularnoi poverkhni dlia hiperkilisnoi dyskretnoi skinchenoi mnozhyny tochok, Melitopol: TDAU, 232.
8. Martynov, V. L. (2014). Modeliuвання optymalnykh heometrychnykh parametriv enerhoeffektyvnykh budivel hranoi formy. Kyiv, 390.
9. Nechvolod, L. I. (2007) Suchasnyi slovnyk inshomovnykh sliv. Kharkiv: Torsynh plus, 768.
10. Pidhorniy, O. L., Ploskiy, O. V. Sergejchuk, O. V. (2010) Aktualni problemy heometrychnoho modeliuвання v zadakhk enerhobzberzhennia u budivnytstvi. Ventyliatsia, osvittennia ta teplozapobigannia, 14, 25–31.

Надійшла (received) 19.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розробка узагальненої техніки алгебраїчного формування Б-функцій для чотирьох точок/ Є. О. Адоньєв, В. М. Верещага, К. Ю. Лисенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С. 17–23.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Разработка обобщенной техники алгебраического формирования Б-функций для трех точек/ Е. А. Адоньєв, В. М. Верещага, К. Ю. Лысенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С. 17–23.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Development of a generalized technique for the algebraic formation of B-functions for four points/ Y. Adoniev, V. Vereshchaha, K. Lysenko // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 17–23. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Адоньєв Євген Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, декан Економіко-гуманітарного факультету Запорізького національного університету в м. Мелітополі; вул. Героїв України, 160А., м. Мелітополь, Україна, 72316; e-mail: evgen.adoniev@gmail.com.

Верещага Віктор Михайлович – доктор технічних наук, професор кафедри прикладної математики та інформаційних технологій Мелітопольського державного педагогічного університету ім. Богдана Хмельницького; вул. Гетьманська, 20, м. Мелітополь, Україна, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

Лисенко Ксенія Юрївна – магістрант, кафедра прикладної математики та інформаційних технологій Мелітопольського державного педагогічного університету ім. Богдана Хмельницького; вул. Гетьманська, 20, м. Мелітополь, Україна, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

Адоньев Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, декан Экономико-гуманитарного факультета Запорожского национального университета в г. Мелитополье; ул. Героев Украины, 160А, г. Мелитополь, Украина, 72316, e-mail: evgen.adoniev@gmail.com.

Верещага Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и информационных технологий Мелитопольского государственного педагогического университета им. Богдана Хмельницкого; ул. Гетьманская, 20, г. Мелитополь, Украина, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

Лысенко Ксения Юрьевна – магистрант, кафедра прикладной математики и информационных технологий Мелитопольского государственного педагогического университета им. Богдана Хмельницкого; ул. Гетьманская, 20, г. Мелитополь, Украина, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

Adoniev Yvhen – PhD, associate professor, dean of the Economics and Humanities Faculty of the Zaporizhzhya National University in Melitopol. Heroiv Ukrainy str., 160A, Melitopol, Ukraine, 72316.

Vereshchaga Viktor – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies of the Melitopol State Pedagogical University named after Bohdan Khmelnytsky; Getmansky str., 20, Melitopol, Ukraine, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

Lysenko Ksenia – Master of Science, Department of Applied Mathematics and Information Technologies of the Melitopol State Pedagogical University named after Bohdan Khmelnytsky; Getmansky str., 20, Melitopol, Ukraine, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

УДК 621.397.48 : 004.932.2

А. В. БЕЛЯЕВ, О. В. ЗУБКОВ, К. С. ТАРАСОВ, В. М. КАРТАШОВ

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В УНИВЕРСАЛЬНОМ МУЛЬТИМЕДИЙНОМ СТРЕЛКОВОМ ТРЕНАЖЕРЕ

Методом теории статистических решений в статье синтезированы оптимальные алгоритмы обработки сигналов в мультимедийном стрелковом тренажере. В статье приводится краткий анализ моделей сигналов и помех, которые встречаются в рассматриваемой системе. В ходе статьи был предложен алгоритм оптимального обнаружения «пробоины», полученной в результате воздействия стрелкового оружия, или обнаружения светового пятна, образуемого лучом лазерного имитатора оружия. Синтезированный оптимальный алгоритм позволяет формировать максимально правдоподобные оценки пространственных координат центра светового пятна или пробоины на экране стрелкового комплекса.

Ключевые слова: обработка изображений, алгоритмы слежения, распознавание образов, оптимальное обнаружение, стрелковый тренажер.

Методом теорії статистичних рішень в статті синтезовані оптимальні алгоритми обробки сигналів в мультимедійному стрілецькому тренажері. У статті наводиться короткий аналіз моделей сигналів і перешкод, які зустрічаються в даній системі. В ході статті був запропонований алгоритм оптимального виявлення «пробоїни», отриманої в результаті впливу стрілецької зброї, або виявлення світлового плями, утвореного променем лазерного імітатора зброї. Синтезований оптимальний алгоритм дозволяє формувати максимально правдоподібні оцінки просторових координат центру світлової плями або пробоїни на екрані стрілецького комплексу.

Ключові слова: обробка зображень, алгоритми стеження, розпізнавання образів, оптимальне виявлення, стрілецький тренажер.

By the method of the theory of statistical solutions, optimal algorithms for signal processing in a multimedia rifle simulator are synthesized in the article. The article provides a brief analysis of the signal and interference patterns that are encountered in the system under consideration. In the course of the article, an algorithm was proposed for the optimal detection of a "hole", obtained as a result of the impact of small arms, or the detection of a light spot formed by a laser imitator beam of a weapon. The synthesized optimal algorithm allows to form the most plausible estimates of the spatial coordinates of the center of the light spot or holes on the screen of the shooting

Keywords: image processing, tracking algorithms, IMAGE recognition, optimal detection, shooting trainer.

Введение. При обработке и анализе изображений встречаются задачи обнаружения фрагмента с известными параметрами (фрагмент – элемент изображения, содержащий искомый объект, символ и т.п.), а также задачи измерения пространственных координат таких фрагментов [1]. Существует значительное количество методов решения подобных задач, основанных на фильтрации изображений [2], корреляционной обработке [3, 4], на использовании искусственных нейронных сетей и методов нечеткой логики и так далее. Однако, вычислительная эффективность и результаты решения задач обнаружения этими методами не идентичны.

К системам, в которых решаются подобные задачи обнаружения и измерения, относятся мультимедийные стрелковые тренажеры [5,6]. В них на фоне изменяющегося и, чаще всего, неоднородного видео-изображения проводится поиск мелкомасштабных объектов – пулевых отверстий. Мультимедийные стрелковые тренажеры, называемые «универсальными», обеспечивают работу системы в двух режимах: боевом, с использованием реального или пневматического оружия, и в режиме имитации стрельбы, с использованием лазерных насадок.

© А. В. Беляев, О. В. Зубков, К. С. Тарасов, В. М. Карташов.
2017

Модели сигналов и помех. Рассмотрим задачу обнаружения-измерения в применении к двумерному сигналу (изображению) $s(x,y)$. Пусть наблюдаемый сигнал является смесью полезного сигнала $e(x,y)$, аддитивной помехи $c(x,y)$ и шума сенсора $n(x,y)$

$$s(x,y) = e(x,y) + c(x,y) + n(x,y). \quad (1)$$

Задачу обработки сформулируем следующим образом: по реализации $s(x,y)$, доступной наблюдению, необходимо принять решение о наличии в составе $e(x,y)$ искомого фрагмента и оценить пространственные координаты этого фрагмента в пределах изображения.

В данном случае искомым сигналом $s_0(x,y)$ является пятно от лазерного излучателя на мишени или пулевая пробоина, аддитивной помехой $c(x,y)$ – видеоизображение, проецируемое на мишень, и фоновая засветка мишени посторонними источниками света. Компонент смеси $n(x,y)$ представлен шумом регистрирующего устройства – видекамеры.

Для решения задачи обнаружения искомого сигнала $s_0(x,y)$ необходимо описать его форму и размеры. В случае работы стрелкового тренажера в боевом режиме необходимо придерживаться тех размеров пулевых отверстий, которые оставляет на полотне мишени конкретный вид патронов. Однако, форма пулевого отверстия может незначительно меняться от выстрела к выстрелу: в зависимости от угла попадания в мишень и материала полотна мишени. Кроме того, вероятность и точность определения пулевого отверстия зависит от разрешающей способности системы и выбранного алгоритма в случае попадания пули в непосредственной близости от одного из пулевых отверстий от предыдущих стрельб.

В режиме имитации стрельбы размер лазерного луча будет зависеть от расстояния. В идеальном случае лазерный луч оставляет на мишени отметку в виде точки. Такую отметку можно представить в виде двумерной дельта-функции $e(x,y) = \delta(x,y)$. Этот случай соответствует лазерному лучу бесконечно малого поперечного сечения, распространяющемуся в однородной изотропной среде и падающему на поверхность мишени под прямым углом. Очевидно, что в реальной системе подобные упрощения неприменимы. Реальный лазерный излучатель имеет оптическую систему с функцией рассеяния точки (ФРТ) $h_1(x,y)$ [7]. Изображение пятна на мишени может быть определено следующим образом

$$e_m(x,y) = \delta(x,y) \otimes h_1(x,y), \quad (2)$$

где \otimes - символ свертки. В то же время, регистрирующая видекамера также имеет оптическую систему с некоторой ФРТ $h_2(x,y)$. В результате наблюдаемое камерой изображение получит вид

$$e(x,y) = e_m(x,y) \otimes h_2(x,y). \quad (3)$$

Тогда

$$e(x,y) = (\delta(x,y) \otimes h_1(x,y)) \otimes h_2(x,y).$$

Поскольку

$$\delta(x,y) \otimes h_1(x,y) = h_1(x,y), \quad (4)$$

то изображение искомого пятна на плоской поверхности мишени можно записать в виде

$$e(x,y) = h_1(x,y) \otimes h_2(x,y). \quad (5)$$

Следовательно, вид пятна определяется только характеристиками оптических систем лазера и регистрирующей камеры. В настоящей статье формы лазерного пятна и пулевой пробоины приняты близкими к идеальным.

Алгоритм обнаружения сигнального пятна. В мультимедийном стрелковом комплексе синтез алгоритмов обработки сигналов рассматривается применительно к двоично квантованному изображению, что дает возможность значительно повысить их быстродействие. Задача обнаружения пятна двоично квантованных сигналов с точки зрения теории статистических решений формулируется следующим образом.

Рассмотрим следующую выборку значений огибающей

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{pmatrix},$$

на $N \times N$ соседних позициях развертки фотоприемника камеры. Каждое из выборочных значений a_{mn} подвергается затем двоичному квантованию по амплитуде путем сравнения с пороговым уровнем a_l (рис. 1).

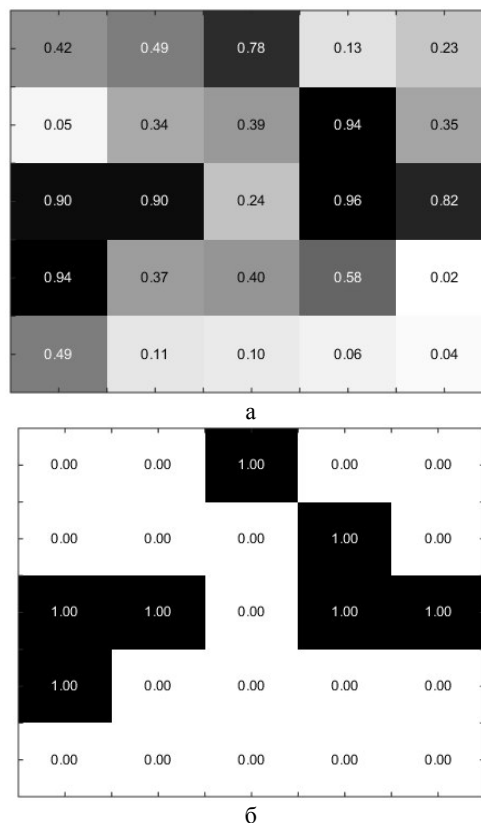


Рис. 1 – Пороговая обработка изображения: а – исходная матрица; б – матрица после применения операции бинаризации

Принято, что результат единичного сравнения a_{mn} будет положительным, если соответствующее выборочное значение превышает порог ($a_{mn}=1$), и отрицательным, если порог не превышает ($a_{mn}=0$).

Таким образом, совокупность результатов квантования будет представлять собой последовательность нулей и единиц. В связи с этим, решающему алгоритму необходимо будет на основе анализа принятой выборки нулей и единиц решить оптимальным образом вопрос – представляет ли эта выборка пятно полезного сигнала или она относится к помехе.

Для решающего алгоритма решение этого вопроса сводится к проверке гипотезы H_0 об отсутствии полезного сигнала против альтернативной гипотезы H_1 о его наличии, то есть к образованию отношения правдоподобия и сравнению этого отношения с некоторым заданным числом, выбираемым исходя из априорной вероятности наличия сигнала и потерь, приписываемых ошибочным решениям (критерий среднего риска), или исходя из допустимой вероятности ложного обнаружения (критерий Неймана - Пирсона) [8, 9].

Прежде всего, синтезу алгоритма обнаружения необходимо определить функцию правдоподобия гипотез H_0 и H_1 . Пусть p_{mn} – вероятность получения единицы на позиции (m,n) пачки, а q_{mn} – вероятность получения нуля на этой позиции. Вероятность получения любого из двух возможных исходов в результате испытания с номером (m,n) запишется в следующем виде

$$P(a_{mn}) = p_{mn}^{a_{mn}} q_{mn}^{1-a_{mn}}. \quad (6)$$

В дальнейшем будем считать выборки огибающей статистически независимыми. Совместная же вероятность получения некоторой комбинации нулей и единиц на всех N^2 позициях пачки будет равна

$$P(a_{11} \dots a_{NN}) = \prod_{m=1}^N \prod_{n=1}^N p_{mn}^{a_{mn}} q_{mn}^{1-a_{mn}}. \quad (7)$$

Исходя из формулы (7) можно записать выражение для условной вероятности любой комбинации нулей и единиц при наличии и отсутствии полезного сигнала.

Выражение для условной вероятности при наличии полезного сигнала будет иметь следующий вид

$$P(a_{11} \dots a_{NN} | H_1) = \prod_{m=1}^N \prod_{n=1}^N p_{S_{mn}}^{a_{mn}} q_{S_{mn}}^{1-a_{mn}}, \quad (8)$$

где $p_{S_{mn}}$ – вероятность получения единицы на позиции (m,n) сигнального пятна, а $q_{S_{mn}} = 1 - p_{S_{mn}}$.

А вот при отсутствии сигнала выражение приобретет такой вид

$$P(a_{11} \dots a_{NN} | H_0) = \prod_{m=1}^N \prod_{n=1}^N p_{N_{mn}}^{a_{mn}} q_{N_{mn}}^{1-a_{mn}}, \quad (9)$$

где $p_{N_{mn}}$ – вероятность получения единицы на позиции (m,n) в области помехи, одинаковая для всех (m,n) , а $q_{N_{mn}} = 1 - p_{N_{mn}}$.

Обозначим заданный порог обнаружения l_0 . В таком случае, с учетом выражений (8) и (9), условие оптимального обнаружения пятна запишется в виде

$$\prod_{m=1}^N \prod_{n=1}^N \left(\frac{p_{S_{mn}}}{p_N} \right)^{a_{mn}} \left(\frac{q_{S_{mn}}}{q_N} \right)^{1-a_{mn}} \geq l_0 \quad (10)$$

После логарифмирования левой и правой частей неравенства (10), имеем

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \left[a_{mn} \ln \frac{p_{S_{mn}}}{p_N} + (1 - a_{mn}) \ln \frac{q_{S_{mn}}}{q_N} \right] \geq \ln l_0$$

Выполнив необходимые преобразования в последнем выражении, получим

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \ln \frac{p_{S_{mn}} q_N}{p_N q_{S_{mn}}} \geq \ln l_0 - \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \ln \frac{q_{S_{mn}}}{q_N} \quad (11)$$

Приняв в выражении (6) следующие обозначения

$$\eta = \ln \frac{p_{S_{mn}} q_N}{p_N q_{S_{mn}}};$$

$$k = \ln l_0 - \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \ln \frac{q_{S_{mn}}}{q_N},$$

получим для алгоритма оптимального обнаружения пачки двоично квантованных сигналов окончательную формулу

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \eta \geq k \quad (12)$$

Алгоритм оптимального обнаружения пачки квантованных сигналов, в соответствии с формулой (12), сводится к выполнению следующих операций.

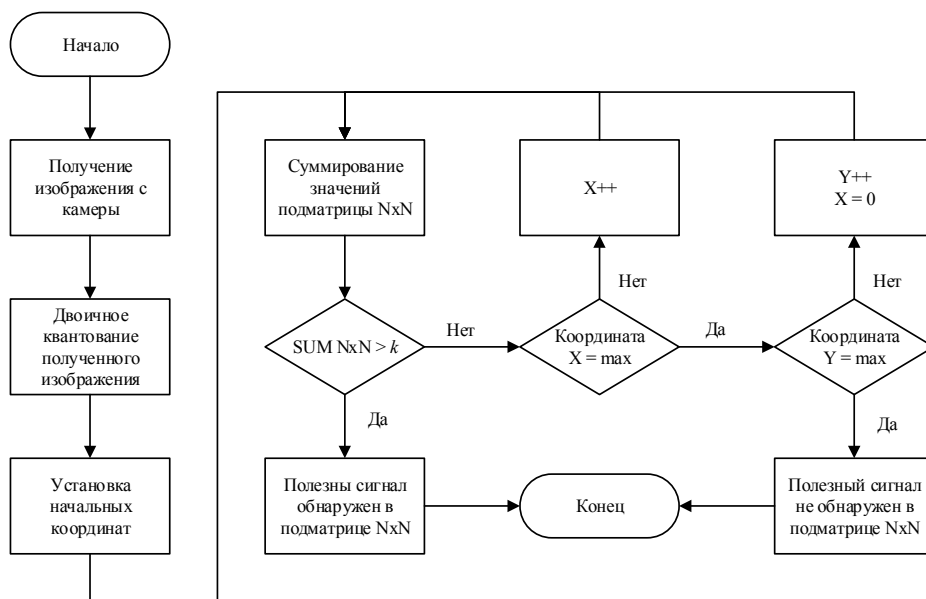


Рис. 2 – Алгоритм оптимального обнаружения пачки квантованных сигналов

Оценка координат центра пятна. Пусть центр пятна, образуемого лазерным лучом на экране, точка O с горизонтальной координатой x_0 и вертикальной – y_0 . Определяя координаты центра пятна используем функцию правдоподобия оцениваемых параметров x_0 и y_0 , которая получается непосредственно из выражения (8) для условной вероятности комбинации нулей и единиц при наличии сигнала

$$L(x_0, y_0) = \prod_{m=1}^N \prod_{n=1}^N P_{S_{mn}}^{a_{mn}} \cdot q_{S_{mn}}^{1-a_{mn}}.$$

Определим вероятность обнаружения сигнала на единичной позиции (m, n) $p_{S_{mn}}$ для случая нефлуктуирующего сигнала по формуле [10]

$$p_{S_{mn}} = 1 - \int_0^{a_1} a_{mn} \exp\left(-\frac{a_{mn}^2 + b_{mn}^2}{2}\right) I_0(a_{mn} b_{mn}) da_{mn}.$$

Как видим, вероятность $p_{S_{mn}}$ является функцией параметра b_{mn} (параметр a_1 считается фиксированным). Однако, все значения b_{mn} определяются однозначно, если известна зависимость

$$b_{mn} = b_0 g((x_{mn}, y_{mn}), (x_0, y_0)), \tag{13}$$

где $g((x_{mn}, y_{mn}), (x_0, y_0))$ – функция огибающей пятна; (x_{mn}, y_{mn}) – координаты позиции пятна (m, n) ; b_0 – отношение сигнала к помехе в центре пятна.

Следовательно, вероятность $p_{S_{mn}} = f(b_0, (x_0, y_0))$ является функцией, зависящей от трех неизвестных параметров b_0, x_0, y_0 . Параметр b_0 в дальнейшем будем считать фиксированным.

Учитывая выражение (13) и сделанные допущения, функция правдоподобия для оценки (x_0, y_0) записывается в виде

$$L(x_0, y_0) = \prod_{m=1}^N \prod_{n=1}^N P_{S_{mn}}^{a_{mn}} ((x_{mn}, y_{mn}), (x_0, y_0)) \times q_{S_{mn}}^{1-a_{mn}} ((x_{mn}, y_{mn}), (x_0, y_0)).$$

Обозначая

$$P_{S_{mn}}((x_{mn}, y_{mn}), (x_0, y_0)) = P,$$

$$q_{S_{mn}}((x_{mn}, y_{mn}), (x_0, y_0)) = Q,$$

функция правдоподобия примет следующий вид

$$L(x_0, y_0) = \prod_{m=1}^N \prod_{n=1}^N P^{a_{mn}} \cdot Q^{1-a_{mn}}$$

Прологарифмировав левую и правую части вышеприведенного выражения, получим логарифм функции правдоподобия

$$\ln L(x_0, y_0) = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} (\ln P - \ln Q) + \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \ln Q \tag{14}$$

Продифференцировав (14) по оцениваемым параметрам x_0 и y_0 получим уравнения правдоподобия

$$\frac{\partial \ln L}{\partial x_0} = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \left(\frac{1}{P} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_0} - \frac{1}{Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x_0} \right) + \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{1}{Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x_0}, \tag{15}$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial y_0} = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{kl} \left(\frac{1}{P} \cdot \frac{\partial P}{\partial y_0} - \frac{1}{Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial y_0} \right) + \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{1}{Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial y_0}. \tag{16}$$

В правой части выражений (15) и (16) вторая сумма не зависит от выборки принимаемых сигналов, а определяется только формой огибающей пятна. Если у этой огибающей имеется симметричная форма, то рассматриваемая вторая сумма приблизительно равна нулю.

Продифференцировав $Q = 1 - P$ по x_0 и y_0 , получим следующие соотношения

$$\frac{\partial Q}{\partial x_0} = -\frac{\partial P}{\partial x_0} \quad (17)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial y_0} = -\frac{\partial P}{\partial y_0} \quad (18)$$

Учитывая эти соотношения и то, что вторая сумма в (15) и (16) равна нулю получим уравнения правдоподобия для оценки координат x_0 и y_0 в виде

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \cdot \frac{1}{P \cdot Q} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_0} \Big|_{x_0=\hat{x}_0} = 0 \quad (19)$$

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \cdot \frac{1}{P \cdot Q} \cdot \frac{\partial P}{\partial y_0} \Big|_{y_0=\hat{y}_0} = 0 \quad (20)$$

Обозначим

$$\Phi_x = \frac{1}{P \cdot Q} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_0} \quad (21)$$

$$\Phi_y = \frac{1}{P \cdot Q} \cdot \frac{\partial P}{\partial y_0} \quad (22)$$

Будем рассматривать дискретные функции (21) и (22) как функции веса позиций пятна в оценке координат точки попадания в цель. В этих функциях огибающие характеризуют количество информации о точке попадания, содержащееся в "единицах", расположенных на различных расстояниях от центра пятна.

После произведенной замены в (21) и (22) уравнения правдоподобия (19) и (20) примут вид:

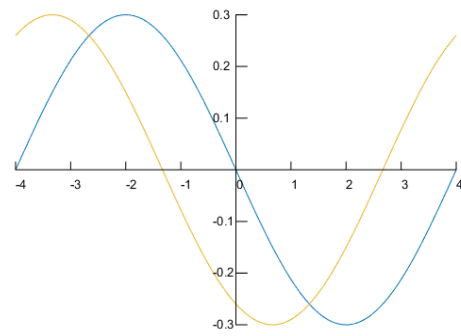
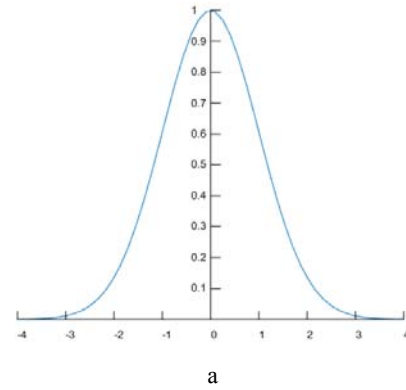
$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \cdot \Phi_x = 0 \quad (23)$$

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \cdot \Phi_y = 0 \quad (24)$$

Исходя из этих уравнений, оценка максимально правдоподобия координат центра пятна получается из условия равенства нулю суммы значений функций Φ_x и Φ_y на позициях, где сигнальные импульсы превышают пороговый уровень амплитудного квантования (в этих точках $a_{mn} = 1$). Принципиально алгоритм (23), (24) будет реализован путем сдвига весовых функций относительно принятой реализации сигнала (изображения). Процесс сдвига и суммирование значений весовых функций на позициях, где $a_{mn} = 1$, будут повторяться до тех пор, пока суммы (23) и (24) не станут равными.

Демонстрация алгоритма по оценке положения центра пятна для одномерного случая показана на рис. 3.

Формы огибающих сигнала и весовых функций, используемых в представленной выше задаче, приведены на рис. 4.



б

Рис. 3 – Пояснение процесса оценки координат центра пятна сигнала: а – огибающая пятна; б – сдвиг весовой функции

Вместе с тем, для определения координат центра пятна может быть использована и несколько иная модификация рассмотренного алгоритма. Для получения модифицированного алгоритма возьмем двойную смешанную производную логарифма функции правдоподобия, определяемого выражением (14), по оцениваемым параметрам

$$\frac{\partial^2 \ln L}{\partial x_0 \partial y_0}$$

С учетом (17) и (18) получим следующее уравнение правдоподобия для оценки двух координат центра пятна:

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \cdot \frac{1}{P \cdot Q} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial x_0 \partial y_0} \Big|_{x_0=\hat{x}_0, y_0=\hat{y}_0} = 0 \quad (25)$$

Введем обозначение

$$\Phi_{xy} = \frac{1}{P \cdot Q} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial x_0 \partial y_0} \quad (26)$$

Таким образом, уравнение правдоподобия получит окончательный вид

$$\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} \Phi_{xy} = 0 \quad (27)$$

На рис. 4, г показан вид весовой функции Φ_{xy} , используемой в выражении (27).

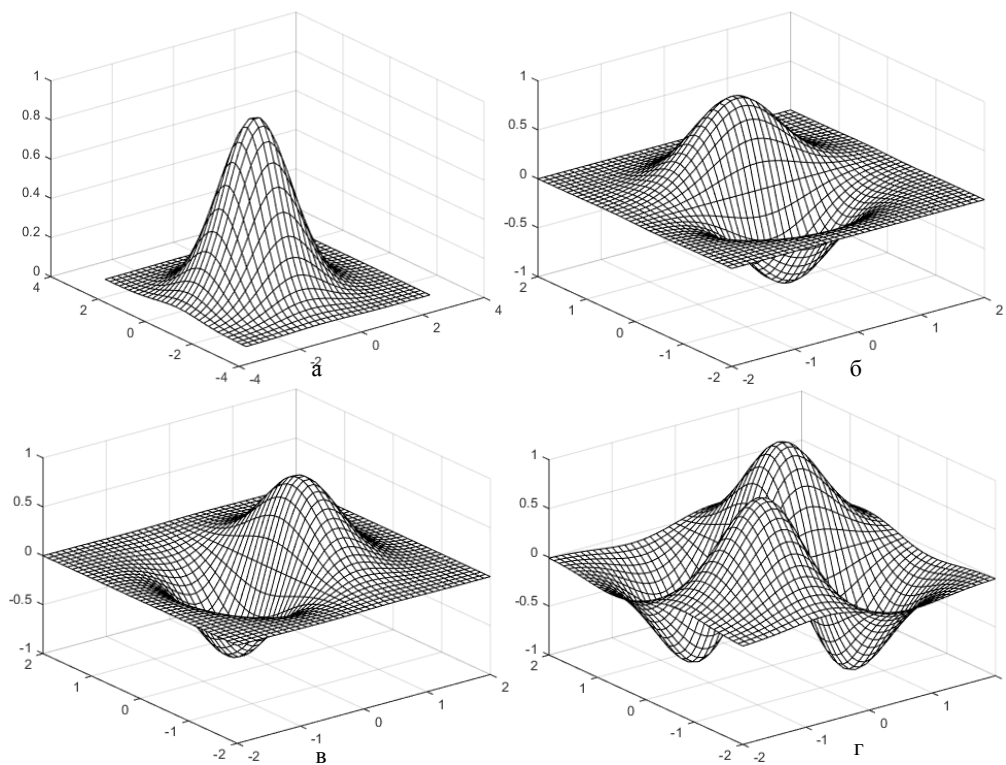


Рис. 4 – Формы огибающих сигнала и весовых функций: а – форма огибающей пятна, б – весовая функция для определения горизонтальной координаты центра пятна, в – весовая функция для определения вертикальной координаты центра пятна, г – весовая функция для определения двух координат центра пятна

Выводы. Методом теории статистических решений в статье синтезированы оптимальные алгоритмы обработки сигналов в мультимедийном стрелковом тренажере. В результате чего найден алгоритм оптимального обнаружения «пробоины», полученной от результатов воздействия стрелкового оружия, или обнаружения светового пятна, образуемого лучом лазерного оружия. То есть, синтезирован оптимальный алгоритм, позволяющий формировать максимально правдоподобные оценки пространственных координат центра светового пятна или пробоины на экране комплекса. В результате чего, полученные оптимальные алгоритмы обработки сигналов позволят существенно повысить качественные показатели мультимедийных стрелковых тренажеров.

Список литературы:

1. *Беляев, А. В.* Обнаружение объектов заданной формы и определение их координат на изображении в мультимедийном стрелковом тренажере [Текст] / *А. В. Беляев, В. М. Карташов* // Системы обработки информации. – 2015. – № 10. – С. 16–21.
2. *Бурлаченко, И.* Разработка метода активной координации видеокамер в оптической навигации на основе мультиагентного подхода [Текст] / *И. Бурлаченко, И. Журавская, М. Мусиенко* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – №9 (85) – С. 17–25. doi: [10.15587/1729-4061.2017.90863](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.90863)
3. *Ципоренко В.В.* Разработка беспойскового метода пеленгования с двумерной корреляционной обработкой пространственного сигнала [Текст] / *В. В. Ципоренко, В. Г. Ципоренко* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 6/9 (84) – С. 63–70. doi: [10.15587/1729-4061.2016.85599](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85599)
4. *Алсалим, Н. И. А.* Анализ методов определения направления прихода сигналов в задачах пространственно-временного до-

ступа [Текст] / *Н. И. А. Алсалим, Н. В. Москалец, С. Н. Теплицкая* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 4/9 (82). – С. 36–44. doi: [10.15587/1729-4061.2016.75716](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75716)

5. Пат. № 59467 UA. Электронный лазерный стрелковый тренажер МПК F41 G 3/26 [Текст] / *Кондрашов, С. В. Коритцев, И. В. Зубков, О. В. Олейников, В. М. Сидоров, Г. I.*; опубл. 10.05.2011, бюл. № 9/2011.
6. Пат. № 95007 UA. Спосіб визначення координат точки влучення кулі у відеоімінь при навчанні стрільби та пристрій для його здійснення МПК F41 G 3/26 [Текст] / *Зубков, О. В. Коритцев, І. В. Сидоров, Г. І. Сидоров Я. Г.*; заявл. 04.04.2009; опубл. 25.06.2011, бюл. №12. – 3 с.
7. *Форсайт, Д.* Компьютерное зрение. Современный подход [Текст] / *Д. Форсайт, Ж. Понс.* – М.: ИД «Вильямс», 2004. – 926 с.
8. *Чердынцев, В. А.* Радиотехнические системы [Текст] / *В. А. Чердынцев.* – М: Высшая школа, 1988. – 369 с.
9. *Гонсалес, Р.* Цифровая обработка изображений [Текст] / *Р. Гонсалес, Р. Вудс.* – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
10. *Павлидис, Т.* Алгоритмы машинной графики и обработки изображений [Текст] / *Т. Павлидис.* – М.: Радио и связь, 2003. – 198 с.

Bibliography (transliterated):

1. *Bieliayev, A. V., Kartashov, V. M.* (2015). Objects detection and determination of their coordinates on the image in a multimedia shooting simulator. Information processing systems, 10, 16–21.
2. *Burlachenko, I., Zhuravska, I., Musiyenko, M.* (2017). Devising a method for the active coordination of video cameras in optical navigation based on the multi-agent approach. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (9 (85)), 17–25. doi: [10.15587/1729-4061.2017.90863](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.90863)
3. *Tsyporenko, V., Tsyporenko, V.* (2016). Development of direct method of direction finding with two-dimensional correlative processing of spatial signal. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (9 (84)), 63–70. doi: [10.15587/1729-4061.2016.85599](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85599)
4. *Alsaleem, N. Y. A., Moskalets, M., Teplytska, S.* (2016). The analysis of methods for determining direction of arrival of signals

- in problems of space-time access. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (9 (82)), 36–44. doi: [10.15587/1729-4061.2016.75716](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75716)
5. Kondrashov, E. V., Koryttsev, I. V., Zubkov, O. V., Oleynikov, V. M., Sidorov, G. I., (2011). Pat. No. 59467 UA. Electronic laser shooting simulator. MPKF41G3/26; published 10.05.2011, Bul. No. 9/2011.
 6. Zubkov, O. V., Koryttsev, I. V., Sydorov, H. I., Sydorov, Y. H. (2011). Pat. No. 95007 UA. Sposib vyznachennia koordynat tochky vluchennia kuli u videomishen pry navchanni strilby ta prystrii dlia yoho zdiisnennia. MPKF41G3/26 published 25.06.2011, Bul. No. 2.
 7. Forsait, D. (2004). Kompiuternoe zrenye. Sovremennii podkhod. Moscow: YD «Vyliams», 926.
 8. Cherdyn'tsev, V. A. (1988). Radyotekhnicheskyye systemy. Moscow: Vysshaya shkola, 396.
 9. Honsales, R., Vuds, R. (2005). Tsyfrovaia obrabotka izobrazheniy. Moscow: Tekhnosfera, 1072.
 10. Pavlydys T. (2003). Alhorytmy mashynnoi hrafyky i obrabotki izobrazheniy. Moscow: Radio i svjaz, 198.

Поступила (received) 10.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Обробка сигналів в універсальному мультимедійному стрілецькому тренажері/ О. В. Беляєв, О. В. Зубков, К. С. Тарасов, В. М. Карташов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С.23–29. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Обработка сигналов в универсальном мультимедийном стрелковом тренажере/ А. В. Беляев, О. В. Зубков, К. С. Тарасов, В. М. Карташов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 23–29. Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Signal processing in the universal multimedia shooting simulator/ О. Bieliaiev, О. Zubkov, К. Tarasov, V. Kartashov //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 23–29. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Беляєв Олексій Володимирович – аспірант, асистент кафедри Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166; e-mail: oleksii.bieliaiev@nure.ua.

Зубков Олег Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166; e-mail: oleh.zubkov@nure.ua.

Тарасов Кирило Сергійович – студент кафедри Радіотехнологій інформаційно-комуникаційних систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166; e-mail: niakros@gmail.com.

Карташов Володимир Михайлович – доктор технічних наук, завідувач кафедри Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166; e-mail: volodymyr.kartashov@nure.ua.

Беляєв Олексій Володимирович – аспірант, асистент кафедри Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166; e-mail: oleksii.bieliaiev@nure.ua.

Зубков Олег Вікторович – кандидат технических наук, доцент кафедры Медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: oleh.zubkov@nure.ua.

Тарасов Кирилл Сергеевич – студент кафедры радиотехнологий информационно-коммуникационных систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166.

Карташов Владимир Михайлович – доктор технических наук, заведующий кафедры Медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: volodymyr.kartashov@nure.ua.

Belyaev Alexey – postgraduate student, assistant of the Department of Media Engineering and Information Radioelectronic Systems, Kharkov National University of Radio Electronics, 14 Nauka Avenue, Kharkov, Ukraine, 61166; E-mail: oleksii.bieliaiev@nure.ua.

Zubkov Oleg – PhD, associate professor of the Department of Media Engineering and Information Radioelectronic Systems, Kharkov National University of Radioelectronics, 14 Nauka Avenue, Kharkov, Ukraine, 61166; E-mail: oleh.zubkov@nure.ua.

Tarasov Kirill – student of the Department of Radio Technologies of Information and Communication Systems, Kharkov National University of Radio Electronics, 14 Nauka Avenue, Kharkov, Ukraine, 61166; E-mail: niakros@gmail.com.

Kartashov Volodymyr – Doctor of technical sciences, professor, Head of the Department of Media Engineering and Information Radioelectronic Systems, Kharkov National University of Radioelectronics, 14 Nauka Avenue, Kharkov, Ukraine, 61166; E-mail: volodymyr.kartashov@nure.ua.

УДК 004.93+621.74

ДИМКО Є. П., ЮРЧЕНКО В. В., ШАМРАЙ А. В., КИЯШКО С. Ю., ДЬОМІНА А. В., МАКАРЕНКО Д. М.

ПАРАМЕТРИЧНА КЛАСИФІКАЦІЯ ЯК ОСНОВА СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ВИПЛАВКОЮ ЗНОСОСТІЙКОГО ЧАВУНУ

В результаті дослідження встановлено класифікуюче правило, що дозволяє визначити, чи відноситься чавун до класу з $HRC > 52$, чи до класу з $HRC < 52$. Це принципово дуже важливо, бо така межа дозволяє визначити область використання чавуну за елементами його хімічного складу. Отримане класифікаційне правило має вигляд лінійної дискримінантної функції та може бути застосовано в системах підтримки прийняття рішень для управління процесами виплавки зносостійкого чавуну.

Ключові слова: управління процесом виплавки, система підтримки прийняття рішень, зносостійкий чавун, класифікаційне правило

В результате исследования установлено классифицирующее правило, позволяющее определить, относится чугун к классу с $HRC > 52$, или к классу с $HRC < 52$. Это принципиально важно, т. к. такая граница позволяет определить область использования чугуна по элементам его химического состава. Полученное классификационное правило имеет вид линейной дискриминантной функции и может быть применено в системах поддержки принятия решений для управления процессами выплавки износостойкого чугуна.

Ключевые слова: управление процессом выплавки, система поддержки принятия решений, износостойкий чугун, классификационное правило

The relevance of the research is related to the fact that modern trends in informatization and generation of control systems in the foundry industry are based on the development of mathematical support for control systems or decision support systems if it is impossible to provide a fully automatic mode of the processes. As a result of the research, a classification rule has been established that allows to determine whether cast iron belongs to the class with $HRC > 52$, or to the class with $HRC < 52$. This is of fundamental importance, since such boundary makes it possible to determine the area of use of cast iron by the elements of its chemical composition. The resulting classification rule has the form of a linear discriminant function and can be applied in decision support systems for control of wear-resistant cast iron smelting. The distribution histograms of the classes are shown in the graphic form the principle of assignment of the objects - wear-resistant cast irons - to one of the classes.

Keywords: melting control, decision support system, wear-resistant cast iron, classification rule

Вступ. Останні тенденції в розвитку інформаційних технологій у ливарному виробництві засновані на використанні математичного моделювання, що йде по шляху типізації математичного опису технологічних об'єктів ливарного виробництва та урахування динаміки ливарних процесів при створенні адекватних математичних моделей [1, 2]. Очевидно, що такі моделі мають використовуватися в системах керування технологічними процесами ливарного виробництва. Але якщо неможливо реалізувати деякі процеси в автоматичному режимі, все одно варто мати математичний опис як основу для систем підтримки прийняття рішень (СППР). Такі описи є основою для систем управління ливарного виробництва.

Аналіз літературних даних. Основу СППР мають складати деякі класифікаційні правила, що дозволяють відносити об'єкт до одного з класів [3–5]. Такі правила можуть бути отримані або параметричними методами, або непараметричними методами, а також з використання нейронних мереж [6–10]. Відповідно до прикладних задач обирається найбільш придатний метод, стосовно можливості виявлення впливу хімічного складу чавунів зі спеціальними можливостями, наприклад зносостійких чавунів, раціональними є методи параметричної класифікації. Як показано в роботах [3–5, 7], в цьому методі мають бути визначені коефіцієнти лінійної дискримінантної функції та порогове значення. З точки зору точності класифікації, до цього методу є зауваження, бо не завжди можна якісно поділити кластери довільної форми лінійною поверхнею. Один з варіантів рішення цієї проблеми описано в роботі [10], де запропоновано для підвищення точності класифікації використовувати планування експерименту. Для задач розпізнавання зносостійкого чавуну за хімічним складом необхідно отримати виборку вхідних даних, зібраних в умовах діючого ливарного виробництва.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є побудова класифікаційного правила для системи підтримки прийняття рішень щодо управління процесами виплавки зносостійкого чавуну. Для досягнення поставленої мети вирішувалася задача розрахунку коефіцієнтів параметричного опису у вигляді лінійної дискримінантної функції.

Розробка моделі та результати комп'ютерного моделювання заповнення форми розплавом. Для вирішення проблеми щодо розпізнавання класів чавунів різних марок за величиною твердості проаналізовано виборку експериментально-промислових даних, отриманих на ПАТ «Кременчуцький завод дорожніх машин» (м. Кременчук, Україна). Відповідні дані відібрані з серійних плавок на основі хімічного аналізу та визначення твердості HRC, занесені в таблицю вихідних даних. Виборка з цієї таблиці представлено в табл. 1.

Експериментальні дані оброблювалися методами параметричної класифікації, суть якої полягає у побудові класифікаційного правила у вигляді лінійної дискримінантної функції, що дозволяє відносити об'єкт до одного з класів [6, 10]

$$y_0 = \frac{1}{2}(m_A + m_B)' \text{cov}^{-1}(x)(m_A - m_B) - \ln \frac{P(A)}{P(B)}, \quad (1)$$

де m_A і m_B – математичні очікування векторів X для класів A та B ($A - HRC < 52$, $B - HRC > 52$), y_0 – порогове значення, що дозволяє визначитися з тим, до якого класу об'єктів слід відносити даний

$\text{cov}(x) = \frac{1}{N} X^T X - m^T m$ – коваріаційна матриця, $P(A)$,

$P(B)$ – апіорні ймовірності класів.

Виборка вихідних даних для розпізнавання для класів A та B відповідно наведено в табл. 2–3 відповідно.

© Є. П. Димко, В. В. Юрченко, А. В. Шамрай, С. Ю. Кияшко, А. В. Дьоміна, Д. М. Макаренко. 2017

Таблиця 1 – Експериментальні дані, отримані за результатами серійних плавок

№ експерименту	C	Si	Mn	C+0,3Si+ +0,4Mn	HRC
1	1,85	1,5	0,6	2,54	32
2	2,6	0,65	0,75	3,095	41
3	1,5	2,85	0,65	2,615	47
4	2,55	0,65	0,75	3,045	59
5	1,95	1	0,5	2,45	56
6	3	1	0,5	3,5	62
7	1,85	0,7	3,05	3,28	42
8	2	0,7	3,05	3,43	29
9	2,2	0,7	3,05	3,63	52
10	3	0,8	0,9	3,6	60
11	2,9	0,65	0,6	3,335	60
12	2,2	0,7	5,6	4,65	53
13	2,8	0,7	4,85	4,95	56
14	2,8	0,8	0,65	3,3	58
15	2,2	1,15	2	3,345	60
16	2,9	0,7	3,6	4,55	60
17	3,35	1,5	3,6	5,24	60
Статистичні характеристики					
Математичне очікування	2,45	0,9853	2,0412	3,562059	52,17647
Середньоквадратичне відхилення (СКО)	0,522	0,55502	1,6934	0,823083	10,3455

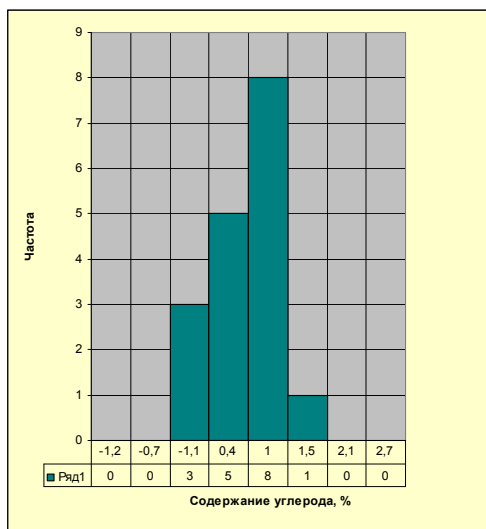


Рис. 1 – Гістограма розподілу вмісту вуглецю

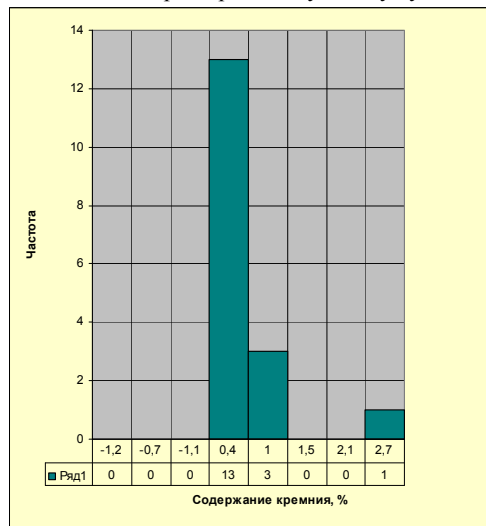


Рис. 2 – Гістограма розподілу вмісту кремнію

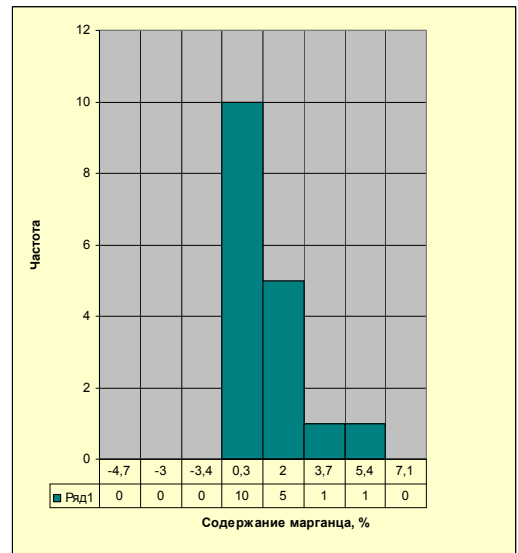


Рис. 3 – Гістограма розподілу вмісту марганцю

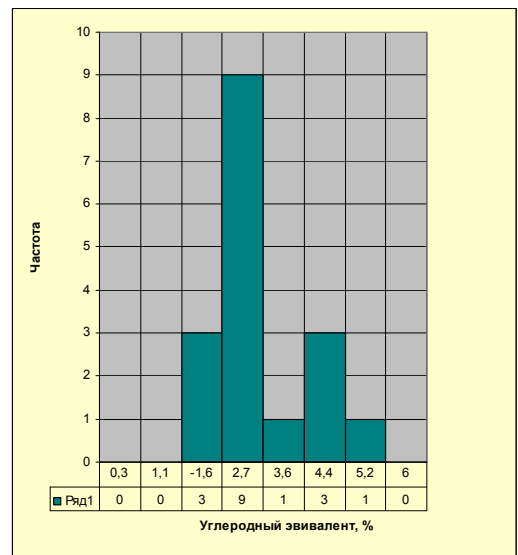


Рис. 4 – Гістограма розподілу вуглецевого еквіваленту

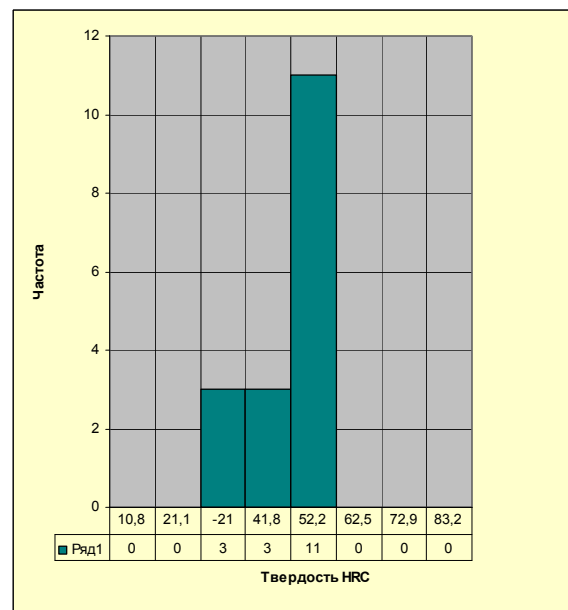


Рис. 5 – Гістограма розподілу твердості

Таблиця 2 – Виборка даних для класу А

Число об'єктів		12
HRC<52		
Скв, %	Cr, %	Сu, %
2,54	34	0,1
3,095	25,5	0,4
2,615	27	2,25
3,045	25,5	0,85
2,45	33	3,1
3,5	33	3,1
3,28	30,5	0,1
3,43	31	0,1
3,63	31,5	0,1
3,6	16	0,1
3,335	13,5	0,1
3,3	12,5	0,1

Таблиця 3 – Виборка даних для класу В

Число об'єктів		12
HRC>52		
Скв, %	Cr, %	Сu, %
3,345	15	1
4,55	13,5	0,1
5,24	19,5	0,32
3,63	0,4	0,1
3,6	16	0,1
3,335	31,5	0,1
4,65	12,5	0,1
4,95	13	0,1
3,335	13,5	0,1
4,65	12,5	0,1
4,95	13	0,1
4,55	13,5	0,1

На рис. 6 показано отриманий результат щодо розподілу об'єктів за класами

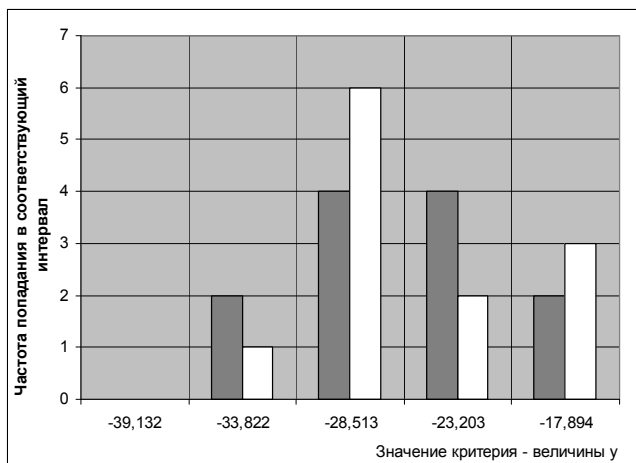


Рис. 6 – Гістограма розподілу класів

Обговорення результатів. Отримані результати дозволяють стверджувати про можливість використання отриманого класифікаційного правила для систем підтримки прийняття рішень щодо управління процесами плавки. Відповідне управління має таким чином змінювати параметри плавки, щоб забезпечувати отримання заданих значень твердості. Якщо вважати, що розглянуті вхідні змінні є нечіткими, можливо побудувати класифікаційне правило, розглядаючи вхідні змінні у вигляді нечітких чисел з заданими функціями приналежності [11]. При цьому слід обирати такі рішення, що мінімізують тіло невизначеності, але принципова структура класифікаційного правила буде такою ж.

Слід все ж таки визначити недолік даного дослідження, що полягає в побудові класифікаційного правила без попер нього обґрунтування закону розподілу вхідних даних. Невідповідність такого закону нормальному приводить до погіршення точності класифікації.

Висновки. За допомогою параметричних методів класифікації отримано класифікуюче правило, що дозволяє визначити, чи відноситься чавун до класу з HRC>52, чи до класу з HRC<52. Це принципово дуже важливо, бо така межа дозволяє визначити область використання чавуну за елементами його хімічного складу. Отримане класифікаційне правило може бути застосовано в системах підтримки прийняття рішень для управління процесами виплавки зносостійкого чавуну.

Список літератури:

1. Демин, Д. А. Типизация математического описания в задачах синтеза оптимального регулятора технологических параметров литейного производства [Текст] / Д. А. Демин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 1/4 (67). – С. 43–56. Режим доступа: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/21203/19147>
2. Демин, Д. А. Адаптивное моделирование в задаче поиска оптимального управления термовременной обработкой чугуна [Текст] / Д. А. Демин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 6/4 (66). – С. 31–37. – Режим доступа: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/19453/17110>
3. Васенко, Ю. А. Удосконалення технології отримання зносостійкого чавуну [Текст] / Ю. А. Васенко // Технологічний аудит і резерви виробництва. – 2012. – № 1/1 (3). – С. 17–21. doi: [10.15587/2312-8372.2012.4870](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4870)
4. Manikaeva, O. Development of the decision support subsystem in the systems of neural network pattern recognition by statistical information [Text] / O. Manikaeva, E. Arsirii, A. Vasilevskaja // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – № 6/4 (78). – 4–12. doi: [10.15587/1729-4061.2015.56429](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56429)
5. Пономаренко, О. И. Компьютерное моделирование процессов кристаллизации как резерв повышения качества поршней ДВС [Текст] / О. И. Пономаренко Н. С. Тренёв // Технологический аудит и резервы производства – 2013. – № 6/2 (14). – С. 36–40. doi: [10.15587/2312-8372.2013.19529](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.19529)
6. Демин, Д. А. Принятие решений в процессе управления электроплавкой с учетом факторов нестабильности технологического процесса [Текст] / Д. А. Демин // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 17. – С. 67–72.
7. Демин, Д. А. Идентификация чугуна для определения рациональных режимов легирования [Текст] / Д. А. Демин, А. Б. Божко, А. В. Зрайченко, А. Г. Некрасов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – № 4/1 (22). – С. 29–32.
8. Frazee-Frazenko, O. O. Algorithm of study neural network for image recognition [Text] / O. O. Frazee-Frazenko // Technology Au-

- dit and Production Reserves. – 2012. – № 4/1 (6). – P. 33–34. doi: [10.15587/2312-8372.2012.4781](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4781)
9. Unglert, K. Principal component analysis vs. self-organizing maps combined with hierarchical clustering for pattern recognition in volcano seismic spectra. [Text] / K. Unglert, V. Radić, A. M. Jellinek // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2016. – № 320. – P. 58–74. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2016.04.014](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.04.014)
 10. Mourad, A. Localization of vectors–patterns in the problems of parametric classification with the purpose of increasing its accuracy [Text] / A. Mourad // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/4 (82). – P. 10–20. doi: [10.15587/1729-4061.2016.76171](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.76171)
 11. Демин, Д. А. Нечеткая кластеризация в задаче построения моделей «состав – свойство» по данным пассивного эксперимента в условиях неопределённости [Текст] / Д. А. Демин // Проблемы машиностроения. – 2013. – Т. 16, № 6. – С. 15–23.
- Bibliography (transliterated):**
1. Demin, D. A. (2014). Tipizacija matematičeskogo opisanija v zadachah sinteza optimal'nogo reguljatora tehnoloģičeskikh parametrov litejnogo proizvodstva. Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij, 1 (4 (67)), 43–56. Available at: <http://journals.uran.ua/ejeet/article/view/21203/19147>
 2. Demin, D. A. (2013). Adaptivnoe modelirovanie v zadache poiska optimal'nogo upravlenija termovremennoj obrabotkoj chuguna. Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij, 6 (4 (66)), 31–37. Available at: <http://journals.uran.ua/ejeet/article/view/19453/17110>
 3. Vasenko, Ju. A. (2012). Technology for improved wear iron. Technology Audit and Production Reserves, 1(1(3)), 17–21. doi: [10.15587/2312-8372.2012.4870](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4870)
 4. Manikaeva, O., Arsiri, E., Vasilevskaja, A. (2015). Development of the decision support subsystem in the systems of neural network pattern recognition by statistical information. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (4 (78)), 4. doi: [10.15587/1729-4061.2015.56429](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56429)
 5. Ponomarenko, O. I., Trenjov, N. S. (2013). Computer modeling of crystallization processes as a reserve of improving the quality of pistons of ICE. Technology Audit and Production Reserves, 6 (2 (14)), 36–40. doi: [10.15587/2312-8372.2013.19529](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.19529)
 6. Demin, D. A. (2010). Prinjatje reshenij v processe upravlenija jelektroplavkoj s uchetom faktorov nestabil'nosti tehnoloģičeskogo processa. Vestnik NTU «HPI», 17, 67–72.
 7. Demin, D. A., Bozhko, A. B., Zrajchenko, A. V., Nekrasov, A. G. (2006). Identifikacija chuguna dlja opredelenija racional'nyh rezhimov legirovanija. Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij, 4 (1 (22)), 29–32.
 8. Frazze-Frazenko, O. O. (2012). Algorithm of study neural network for image recognition. Technology Audit and Production Reserves, 4 (1 (6)), 33–34. doi: [10.15587/2312-8372.2012.4781](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4781)
 9. Unglert, K., Radić, V., Jellinek, A. M. (2016). Principal component analysis vs. self-organizing maps combined with hierarchical clustering for pattern recognition in volcano seismic spectra. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 320, 58–74. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2016.04.014](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.04.014)
 10. Mourad, A. (2016). Localization of vectors–patterns in the problems of parametric classification with the purpose of increasing its accuracy. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (4 (82)), 10–12. doi: [10.15587/1729-4061.2016.76171](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.76171)
 11. Demin, D. A. (2013). Nechetkaja klasterizacija v zadache postroenija modelej «sostav – svojstvo» po dannym passivnogo jeksperimenta v uslovijah neopredeljonnosti. Problemy mashinostroenija, 16 (6), 15–23.

Поступила (received) 06.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Параметрическая классификация как основа системы поддержки принятия решений для управления выплавкой износостойкого чугуна/ Е. П. Дымко, В. В. Юрченко, А. В. Шамрай, С. Ю. Кияшко, А. В. Демина // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С.30–34. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Параметрична класифікація як основа системи підтримки прийняття рішень для управління виправкою зносостійкого чавуну/ Є. П. Димко, В. В. Юрченко, А. В. Шамрай, С. Ю. Кияшко, А. В. Дьоміна // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С.30–34. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Parametric classification as the basis of a decision support system for the control of wear-resistant cast iron smelting/ I. Dymko, V. Yurchenko, A. Shamrai, S. Kyiashko, A. Domina //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P.30–34. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дымко Егор Павлович – Заместитель начальника эксплуатационно-технического отдела, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua

Юрченко Владислав Витальевич – магистр, Кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002.

Шамрай Андрей Игоревич – магистр, Кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002.

Кияшко Сергей Юрьевич – магистр, Кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002.

Демина Алина Викторовна – магистр, Кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002.

Макаренко Дмитрий Николаевич – старший преподаватель, Кафедра химии, экологии и экспертных технологий, Национальный Аэрокосмический Университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», ул. Чкалова, 17, Украина, 61070; e-mail: d.makarenko@khai.edu

Димко Єгор Павлович – Заступник начальника експлуатаційно-технічного відділу, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

Юрченко Владислав Віталєвич – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

Шамрай Андрій Вікторович – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Кіяшко Сергій Юрійович – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Дьоміна Аліна Вікторівна – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Макаренко Дмитро Миколайович – старший викладач, Кафедра хімії, екології та експертних технологій, Національний Аерокосмічний Університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», вул. Чкалова, 17, м. Харків, Україна, 61070; e-mail: d.makarenko@khai.edu

Думко Ієгор – Deputy Head of Technical Department, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua

Yurchenko Vladyslav – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Shamrai Andrii – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Kiiashko Serhii – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Domina Alina – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Makarenko Dmytro – Senior lecturer, Department of Chemistry, ecology and expertise technologies, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Chkalova str., 17, Kharkiv, Ukraine, 61070.

УДК 620.179.148

В. Г. БАЖЕНОВ, І. І. ІВІЦЬКИЙ, Д. К. ІВІЦЬКА

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО МЕТОДУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ У ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛАХ

Досліджено застосування електростатичного методу неруйнівного контролю для визначення наявності дефектів у полімерних композиційних матеріалах. Створена лабораторна установка, яка складається з джерела живлення Б5-7, осцилографа С1-64, генератора Г3-118 та фазометра Ф2-34. В якості дослідного матеріалу застосовувався зразок з поліметилметакрилату з габаритами 40x38x400 мм. Було побудовано амплітудно-частотну характеристику сенсора та зроблено висновок що отримані сенсори перевершують заявлені параметри. Можна стверджувати що верхня полоса частоти пропускання сигналу лежить в межах 20кГц.

Ключові слова: електростатичний метод, ємнісний метод, неруйнівний контроль, контроль дефектів, полімерні матеріали.

Исследовано применение электростатического метода неразрушающего контроля для определения наличия дефектов в полимерных композиционных материалах. Создана лабораторная установка, состоящая из источника питания Б5-7, осциллографа С1-64, генератора Г3-118 и фазометра Ф2-34. В качестве исследовательского материала применялся образец из полиметилметакрилата с габаритами 40x38x400 мм. Была построена амплитудно-частотная характеристика сенсора и сделан вывод, что полученные сенсоры превосходят заявленные параметры. Можно утверждать, что верхняя полоса частоты пропускания сигнала лежит в пределах 20 кГц.

Ключевые слова: электростатический метод, емкостный метод, неразрушающий контроль, контроль дефектов, полимерные материалы.

Electrostatic method of nondestructive testing to determine the presence of defects in polymer composite materials is investigated. A laboratory installation consisting of a power supply B5-7, an oscilloscope C1-64, a generator G3-118 and a phase meter F2-34. As a research material was used a sample of polymethylmethacrylate with dimensions of 40x38x400 mm. During the research, the installation proved to be workable. The amplitude of the signal was proportional to the change in potentials. A phase change indicated a change in the direction of the gradient of the electric field. This result can be repeated, the signal is predictable. The amplitude-frequency characteristic of the sensor was constructed and it was concluded that the received sensors exceeded the declared parameters. It can be argued that the upper frequency band of the signal is within 20 kHz.

Keywords: electrostatic method, capacitive method, non-destructive testing, control of defects, polymer materials.

Вступ. Останнім часом у промисловості значно підвищився інтерес до створення методів контролю структури об'єкту без використання щільного контакту з ним. При неперервному технологічному процесі виготовленні полімерних композиційних матеріалів методом екструзії існує необхідність постійного контролю наявності дефектів. Проте, контакт сенсора з полімерним матеріалом небажаний, у зв'язку з

вірогідністю деформації ще не до кінця охолодженого виробу [1].

Електростатичний метод неруйнівного контролю дозволяє визначати наявність дефектів у широкому спектрі матеріалів, без застосування контакту сенсора та об'єкту контролю [2].

© В. Г. Баженов, І. І. Івіцький, Д. К. Івіцька. 2017

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Традиційно, взаємодія твердотільних пристроїв з електромагнітним полем здійснювалося, головним чином, шляхом виявлення збурень у магнітному полі [3-8]. Сенсори Холла, наприклад, забезпечують надійну роботу в багатьох аналогових і цифрових застосуваннях [9].

Електрометри вимірюють електричний заряд або різницю потенціалів і, по суті, є вольтметрами з таким високим вхідним імпедансом, що їх вхідний струм можна вважати рівним нулю. До недавнього часу електрометри користувалися репутацією неточних приладів, в яких часто використовувалися компоненти, чутливі до механічних ударів. Останні технології були втілені у сенсорі Electric Potential Integrated Circuit (EPIC), на базі якого побудовано дослідну установку.

Сенсор EPIC є дуже надійним твердотільним електрометром з високим вхідним імпедансом, завдяки чому цей прилад можна вважати ідеальним вольтметром. Він являє собою мікросхему з сенсором для вимірювання електричного потенціалу. EPIC - безконтактний електрометр, електрод якого захищений шаром діелектрика для ізоляції від вимірюваного об'єкта. Смуга пропускання сенсора за рівнем -3 дБ лежить в діапазоні від декількох десятків Гц до 20 кГц. Ця характеристика підлаштовується під потреби конкретного застосування. У несиметричному режимі цей пристрій застосовується для визначення електричного потенціалу, а в диференціальному режимі сенсор вимірює локальне електричне поле або використовується для відображення просторового розподілу потенціалу.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є застосування електростатичного методу неруйнівного контролю для визначення наявності дефектів у полімерних композиційних матеріалах. Відповідно до мети поставлені такі задачі:

- створення макету експериментальної установки;
- розробка методики проведення контролю, що забезпечує найкраще знаходження дефектів;
- проведення експериментальних досліджень та отримання вихідних даних;
- обробка результатів та їх верифікація.

Матеріали та методи експериментального дослідження електростатичного методу неруйнівного контролю дефектів. Для експериментальних досліджень застосовувалася лабораторна база кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Джерело живлення Б5-7, зображене на рис. 1, призначене для живлення низьковольтної радіоапаратури в процесі її налаштування або виробництва. Вихідна напруга приладу ступінчасто і плавно регулюється від 0 до 30 В при струмі навантаження до 3 А.

Для контролю наявності сигналу використовувався осцилограф С1-64 (рис. 2). Високоімпедансний вхід якого дає можливість контролювати сигнал в будь-якій точці схеми. Діапазон вимірюваних напруг від 28 мВ до 30 В. Смуга пропускання сигналу від 0 до 50 МГц.



Рис. 1 – Джерело живлення Б5-7



Рис. 2 – Осцилограф С1-64

Джерелом синусоїдального сигналу слугував генератор Г3-118 (рис. 3), що являє собою RC-генератор з частотним діапазоном від 10 Гц до 100 кГц, з дискретною установкою частоти і системою стабілізації рівня вихідної напруги.

Для прецензійних вимірювань фазових зсувів та їх приростів між двома синхронними гармонійними сигналами в широкому діапазоні частот застосовувався фазометр Ф2-34 (рис. 4).



Рис. 3 – Генератор Г3-118



Рис. 4 – Фазометр Ф2-34

В якості дослідного матеріалу застосовувався зразок з поліметилметакрилату (ПММА, плексиглас) з габаритами 40x38x400 мм (рис. 5).

Дослідження проводились наступним чином: на лабораторний стіл кладеться мідна пластина, яка виступає екраном. На мідну пластину накладається діелектрик, щоб унеможливити неконтрольоване замикання джерела сигналу на землю. Випромінювач електричних сигналів, металева пластина, кладеться на діелектричну підкладку, яка відділяє його від контакту із землею, земля від генератора сигналу підключена до одної пластини, а сигнальний провід до другої мідної пластини.



Рис. 5 – Дослідний зразок з ПММА

На рис. 6 представлена базова структурна схема сенсора ЕРІС [9]. Розмір його електрода вибирається довільно і залежить від вхідної ємності, яка визначається конкретним застосуванням. Для пристроїв, що знаходяться в декількох метрах від вимірюваного об'єкта, ємнісний зв'язок визначається тільки власною ємністю електрода, а їх характеристика в значній мірі залежить від вхідного імпедансу при взаємодії об'єкта з полем. При цьому слід врахувати, що в активному режимі сенсор ЕРІС забирає у поля дуже малу кількість енергії.

Вхідний опір пристрою підвищується з допомогою зворотного зв'язку, а зниження вхідної ємності досягається за рахунок методів захисту. Вхідну ємність можна знизити до 10-17 Ф, а вхідний опір збільшити до 1015 Ом, звівши взаємодію з вимірюваним полем до абсолютного мінімуму, коли залишаються тільки малі струми зміщення. Вхідний каскад підсилювача зображено на рис. 7.

Схема підключення сенсора зображена на рис. 8, а вигляд плати з сенсорами на рис. 9.

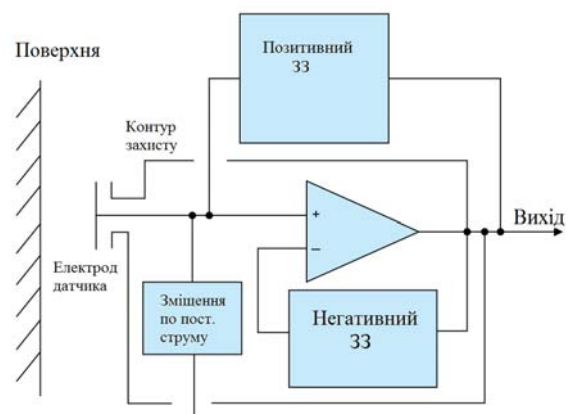


Рис. 6 – Базова структурна схема сенсора ЕРІС

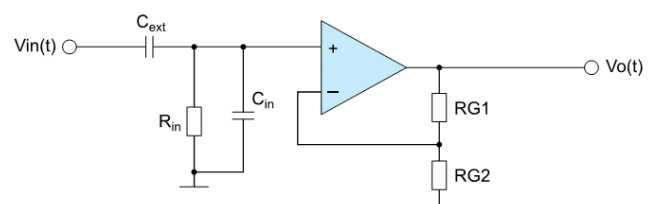


Рис. 7 – Вхідний каскад підсилювача сенсора ЕРІС

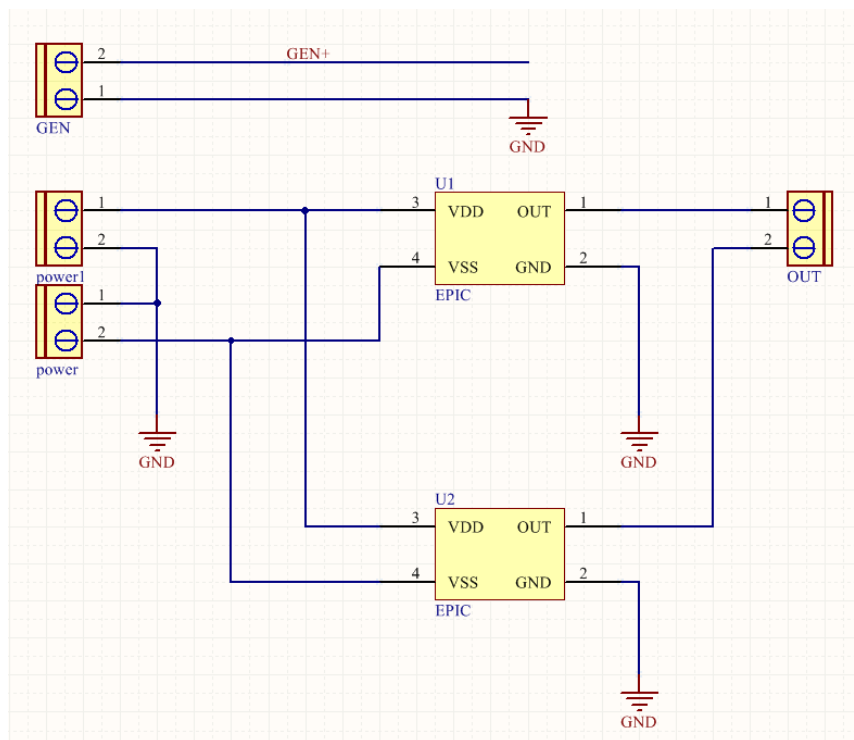


Рис. 8 – Електрична схема плати

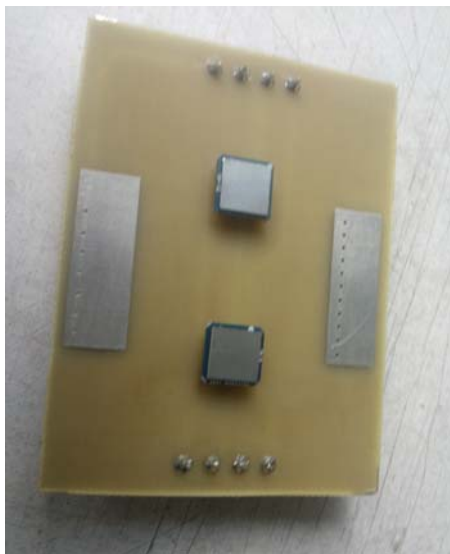


Рис. 9 – Вигляд плати с сенсорами

Результати дослідження експериментального дослідження електростатичного методу неруйнівного контролю дефектів. При проведенні дослідження із сенсорами EPIC в лабораторних умовах необхідне пам'ятати наступне:

Кожний прилад який підключається до мережі змінного струму є джерелом наводки.

Людське тіло чудовий провідник будь-яких електричних сигналів. Тіло людини має порівняно малий опір і слугує джерелом сигналу.

Для усунення наводок мережі (або інших сторонніх сигналів) всі прилади/пристрої які стоять поруч або увімкнені повинні мати спільне з'єднання (заземлені).

Столи на яких виконуються дослідницькі роботи повинні бути підключенні до спільної системи приладів (заземлені).

При досліджах необхідно правильно прикладати/формулювати поле щоб результати вимірювання відображали реальний стан об'єкту контролю.

Від точності позиціонування сенсорів залежить отриманий результат.

Для первинної верифікації роботи приладу було проведено тестування запропонованого авторами способу подавлення завад з використанням двох сенсорів. Результати зображено на рис. 10.

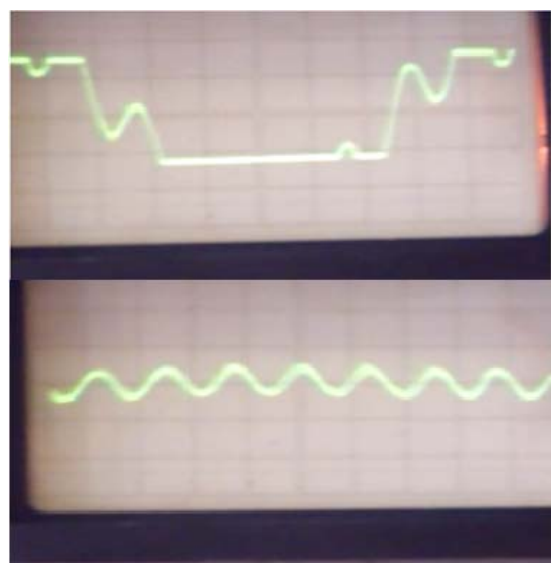


Рис. 10 – Осцилограма сигналу з одним та двома сенсорами

При проведенні досліджень макет виявився працездатним. Амплітуда сигналу була пропорційна зміні потенціалів. А зміна фази вказувала на зміну напрямку градієнту електричного поля. Даний результат можна повторити, сигнал є прогнозованим.

Обговорення результатів дослідження експериментального дослідження електростатичного методу неруйнівного контролю дефектів. Було побудовано амплітудно-частотну характеристику сенсора, рис. 11, та зроблено висновок що отримані сенсори перевершують заявлені параметри. Можна стверджувати що верхня полоса частоти пропускання сигналу лежить в межах 20кГц.

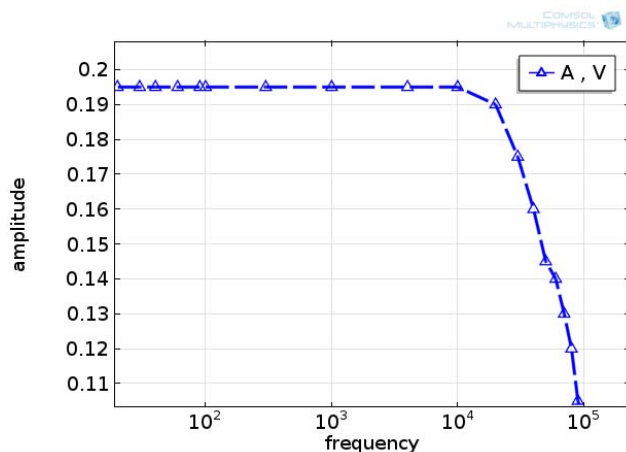


Рис. 11 – Амплітудно-частотна характеристика сенсора

Таким чином установка може застосовуватися для контролю дефектів у діелектричних зразках з достатнім ступенем достовірності, зокрема при виготовленні полімерних композиційних матеріалів з детермінованими властивостями [10–11].

Висновки. В результаті дослідження створено експериментальну установку для реалізації електростатичного методу неруйнівного контролю для визначення наявності дефектів у полімерних композиційних матеріалах, розроблено методику проведення контролю, що забезпечує найкраще знаходження дефектів, проведено експериментальні дослідження та здійснено обробку результатів та їх верифікацію. Перевірено на практиці запропонований авторами спосіб подавлення зовнішніх завад (з частотою 50 Гц), який підтвердив свою ефективність, і дав можливість проведення реальних високочастотних вимірювань в звичайній неекранованій лабораторії.

Список літератури

1. *Ivitskiy, I. I.* Polymer wall slip modelling [Text] / *I. I. Ivitskiy* // Technology Audit and Production Reserves. – 2014. – № 5/3 (19). – P. 8–11. doi: [10.15587/2312-8372.2014.27927](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.27927)
2. *Sun, H.* Electromagnetic methods for measuring material properties of cylindrical rods and array probes for rapid flaw inspection [Text] / *H. Sun*. – Iowa State University, 2005. – 138 p. doi: [10.2172/850045](https://doi.org/10.2172/850045)
3. *Baxter, L. K.* Capacitive Sensors: Design and Applications [Text] / *L. K. Baxter*. – Wiley-IEEE Press, 1997. – 302 p. doi: [10.1109/9780470544228](https://doi.org/10.1109/9780470544228)
4. *Клюев, В. В.* Неразрушающий контроль и диагностика:

- Справочник / *В. В. Клюев, Ф. П. Соснин*. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
5. *Watson, P.* Imaging electrostatic fingerprints with implications for a forensic timeline [Text] / *P. Watson, R. J. Prance, S. T. Beardsmore-Rust, H. Prance* // Forensic Science International. – 2011. – Vol. 209, № 1-3. – P. e41–e45. doi: [10.1016/j.forsciint.2011.02.024](https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.02.024)
6. *Ditchburn, R. J.* Planar rectangular spiral coils in eddy-current non-destructive inspection [Text] / *R. J. Ditchburn, S. K. Burke* // NDT & E International. – 2005. – Vol. 38, № 8. – P. 690–700. doi: [10.1016/j.ndteint.2005.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.04.001)
7. *Fava, J. O.* Multilayer planar rectangular coils for eddy current testing: Design considerations [Text] / *J. O. Fava, L. Lanzani, M. C. Ruch* // NDT & E International. – 2009. – Vol. 42, № 8. – P. 713–720. doi: [10.1016/j.ndteint.2009.06.005](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.06.005)
8. *Aydin, A.* A high sensitivity calibrated electric field meter based on the electric potential sensor [Text] / *A. Aydin, P. B. Stiffell, R. J. Prance, H. Prance* // Measurement Science and Technology. – 2010. – Vol. 21, № 12. – P. 125901. doi: [10.1088/0957-0233/21/12/125901](https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/12/125901)
9. *Connor, S.* EPIC: A New Epoch in Electric Potential Sensing [Electronic resource] / *S. Connor*. – Available at: <http://www.sensorsmag.com/sensors/electric-magnetic/epic-a-new-epoch-electric-potential-sensing-8961>
10. *Ivitskiy, I.* Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material [Text] / *I. Ivitskiy, V. Sivetskiy, V. Bazhenov, D. Ivitska* // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 1/5 (85). – P. 4–9. doi: [10.15587/1729-4061.2017.91659](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91659)
11. *Ivitskiy, I. I.* Simulation of intelligent sensors dipping into the melting polymer composite [Text] / *I. I. Ivitskiy, O. L. Sokolskiy, V. M. Kurylenko* // Technology audit and production reserves. – 2016. – № 5/3 (31). – C. 22–26. doi: [10.15587/2312-8372.2016.81236](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81236)

Bibliography (transliterated):

1. *Ivitskiy, I. I.* (2014). Polymer wall slip modelling. Technology Audit and Production Reserves, 5 (3 (19)), 8–11. doi: [10.15587/2312-8372.2014.27927](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.27927)
2. *Sun, H.* (2005). Electromagnetic methods for measuring materials properties of cylindrical rods and array probes for rapid flaw inspection. Iowa State University, 128. doi: [10.2172/850045](https://doi.org/10.2172/850045)
3. *Baxter, L. K.* (1997). Capacitive Sensors: Design and Applications. Wiley-IEEE Press, 302. doi: [10.1109/9780470544228](https://doi.org/10.1109/9780470544228)
4. *Klyuyev, V. V., Sosnin, F. R.* (2003). Nerauzruhayushchiy kontrol i diagnostika: Spravochnik, Moscow: Mashinostroyeniye, 656.
5. *Watson, P., Prance, R. J., Beardsmore-Rust, S. T., Prance, H.* (2011). Imaging electrostatic fingerprints with implications for a forensic timeline. Forensic Science International, 209 (1-3), e41–e45. doi: [10.1016/j.forsciint.2011.02.024](https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.02.024)
6. *Ditchburn, R. J., Burke, S. K.* (2005). Planar rectangular spiral coils in eddy-current non-destructive inspection. NDT & E International, 38 (8), 690–700. doi: [10.1016/j.ndteint.2005.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.04.001)
7. *Fava, J. O., Lanzani, L., Ruch, M. C.* (2009). Multilayer planar rectangular coils for eddy current testing: Design considerations. NDT & E International, 42 (8), 713–720. doi: [10.1016/j.ndteint.2009.06.005](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.06.005)
8. *Aydin, A., Stiffell, P. B., Prance, R. J., Prance, H.* (2010). A high sensitivity calibrated electric field meter based on the electric potential sensor. Measurement Science and Technology, 21 (12), 125901. doi: [10.1088/0957-0233/21/12/125901](https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/12/125901)
9. *Connor, S.* EPIC: A New Epoch in Electric Potential Sensing. Available at: <http://www.sensorsmag.com/sensors/electric-magnetic/epic-a-new-epoch-electric-potential-sensing-8961>
10. *Ivitskiy, I., Sivetskiy, V., Bazhenov, V., Ivitska, D.* (2017). Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (5 (85)), 4–9. doi: [10.15587/1729-4061.2017.91659](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91659)
11. *Ivitskiy, I. I., Sokolskiy, O. L., Kurylenko V. M.* (2016). Simulation of intelligent sensors dipping into the melting polymer composite. Technology Audit and Production Reserves, 5 (3 (31)), 22–26. doi: [10.15587/2312-8372.2016.81236](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81236)

Надійшла (received) 27.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Експериментальне дослідження електростатичного методу неруйнівного контролю дефектів у полімерних матеріалах/ В. Г. Баженов, І. І. Івіцький, Д. К. Івіцька // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 34–39.– Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Экспериментальное исследование электростатического метода неразрушающего контроля дефектов в полимерных материалах/ В. Г. Баженов, И. И. Ивицкий, Д. К. Ивицкая // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 34–39.– Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Experimental study of electrostatic method of nondestructive testing of defects in polymeric materials/ V. Bazhenov, I. Ivitskiy, D. Ivitska //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 34–39. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Баженов Віктор Григорович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент приладів і систем неруйнівного контролю; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: vgbazhenov@gmail.com.

Івіцький Ігор Ігорович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», старший викладач кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: i.ivitskiy@kpi.ua.

Івіцька Дар'я Костянтинівна – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», аспірант кафедри приладів і систем неруйнівного контролю; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: d.k.ivitskaya@gmail.com.

Баженов Віктор Григорьевич – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», доцент кафедры приборов и систем неразрушающего контроля; пр. Победы, 37, г. Киев, Украина., 03056; e-mail: vgbazhenov@gmail.com.

Ивицкий Игорь Игоревич – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», старший преподаватель кафедры химического, полимерного и силикатного машиностроения; пр. Победы, 37, г. Киев, Украина., 03056; e-mail: i.ivitskiy@kpi.ua.

Ивицкая Дарья Константиновна – аспирант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», аспирант кафедры приборов и систем неразрушающего контроля; пр. Победы, 37, г. Киев, Украина., 03056; e-mail: d.k.ivitskaya@gmail.com.

Bazhenov Victor – PhD, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", assistant professor in devices and systems for non-destructive testing department; Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: vgbazhenov@gmail.com.

Ivitskiy Igor – PhD, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", senior lecturer in chemical, polymer and silicate engineering department; Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: i.ivitskiy@kpi.ua.

Ivitska Darya – postgraduate student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", post-graduate student in devices and systems for non-destructive testing department; Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: d.k.ivitskaya@gmail.com.

УДК 338.24.01

Е. А. КОВАЛЕВА, Е. Ю. МИСЮРА

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ СЕБЕСТОИМОСТИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Данная статья посвящена новому подходу к определению себестоимости теплоснабжения, а именно на основании построения эконометрических моделей с использованием статистических данных КП "Харьковские тепловые сети". В статье авторы рассматривают эконометрические модели двух типов – аддитивную и мультипликативную. Каждая из моделей построена прямым пошаговым методом, на каждой итерации которого методом наименьших квадратов оценивались значения параметров модели, анализировались статистическая значимость коэффициента при переменной, введенной на текущей итерации, и значение скорректированного коэффициента множественной детерминации. Полученные модели подвергаются строгому эконометрическому анализу, на основании которого выявляется лучшая модель.

Ключевые слова: эконометрическая модель, себестоимость, теплоснабжение.

Дана стаття присвячена новому підходу до визначення собівартості теплопостачання, а саме на підставі побудови економітричних моделей з використанням статистичних даних КП "Харківські теплові мережі". У статті автори розглядають економітричні моделі двох типів - аддитивну і мультипликативну. Кожна з моделей побудована прямим покроковим методом, на кожній ітерації якого методом найменших квадратів оцінювалися значення параметрів моделі, аналізувалися статистична значимість коефіцієнта при змінній, введеної на поточній ітерації, і значення скоригованого коефіцієнта множинної детермінації. Отримані моделі піддаються строгому економітричному аналізу, на підставі якого виявляється найкраща модель.

Ключові слова: економітрична модель, собівартість, теплопостачання.

This article is devoted to a new approach to determining the cost of heat supply, namely, based on the construction of econometric models using the statistical data of the Kharkiv Heat Networks. In the article the authors consider econometric models of two types - additive and multiplicative. Each of the models is constructed by a direct step-by-step method, at each iteration of which the values of the model parameters were estimated by the least-squares method, the statistical significance of the coefficient was analyzed with the variable introduced at the current iteration and the value of the adjusted multiple determination coefficient. The obtained models are subject to rigorous econometric analysis, on the basis of which the best model is identified.

Keywords: econometric model, cost price, heat supply.

Введение. На сегодняшний день рейтинговое агентство "Fitch Ratings" повысило национальный долгосрочный рейтинг города Харькова с уровня "A+(ukr)" до "AA-(ukr)" с прогнозом "стабильный" [1]. Несмотря на такой достаточно оптимистичный прогноз, централизованное теплоснабжение Украины на современном этапе развития имеет серьезные недостатки. Главный из них состоит в том, что системы отопления, присоединенные к централизованному теплоснабжению, перегревают помещения, особенно в теплый период отопительного сезона. Этот недостаток характерен как для наиболее распространенных у нас систем теплоснабжения с теплоносителем горячей водой, так и в еще большей степени (при отсутствии автоматизации) для систем с теплоносителем паром. Такой недостаток носит технический характер и авторами статьи далее не рассматривается.

Другим сложным вопросом является тарификация централизованного теплоснабжения Украины. Тариф на тепло для населения Украины почти идентичный тарифу в Венгрии, но в шесть раз ниже, чем в Японии. Об этом сообщает сайт Национальной комиссии, осуществляющей государственное регулирование энергетики и коммунальных услуг [2]. Комиссия сравнила средневзвешенный тариф на тепловую энергию в разных странах мира с тарифом в Украине. Согласно представленным данным, дешевле, чем в Украине, тепло покупают только в Исландии – эквивалентно 363,5 грн/Гкалл. В свою очередь, авторы статьи хотят отметить, что пример Исландии не очень показательный – страна использует для теплоснабжения геотермальную теплоту (96 % потребностей) и электрические котлы (4 %).

Так как в последнее время новых методик расчета стоимости теплоснабжения не приводят, а проблема высоких тарифов для населения остается неизмен-

ной, в данной статье авторы предлагают свой вариант расчета себестоимости теплоснабжения, используя эконометрические модели, концепции, приемы. Это окажет колоссальное влияние на тарифы последнего.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Для обоснованного выбора методологических подходов к моделированию себестоимости теплоснабжения проанализировано достаточное количество работ, включающих опыт эконометрического моделирования большинства социально-экономических систем. Так, в работах [3–6] показано, что на сегодняшний день лучшие результаты дают именно эконометрические модели. Работы [7, 8] посвящены ценообразованию и себестоимости различных объектов так же используя эконометрический подход. Но ни одна из выше перечисленных работ не описывает себестоимость теплоснабжения. Это объясняется тем, что теплоснабжение достаточно сложный вид продукции, себестоимость которого является задачей не только экономического характера, но и затрагивает другие области науки и техники.

С другой стороны, существует достаточное количество статей, посвященных работе систем централизованного теплоснабжения (ЦТ) [9, 10]. Нужно отметить, что в данных работах вопросам себестоимости ЦТ уделено недостаточное внимание, не имеющее математического подтверждения вообще.

Цели и задачи исследования. Исходя из проведенного анализа литературы в статье ставится следующая цель: разработать экономико-математическую модель себестоимости ЦТ на основании реальных статистических данных КП "Харьковские тепловые сети" (г. Харьков, Украина) и государственной службы статистики Украины.

© Е. А. Ковалева, Е. Ю. Мисюра. 2017

Для вышестоящей цели необходимо решить следующие задачи:

1. Отбор факторов (количественных показателей), тем или иным образом влияющих на результирующий признак – себестоимость теплоснабжения.

2. Спецификация формы модели на основании графического представления исходных данных и теоретико-экономического анализа.

3. Оценка параметров модели с учетом отобранных факторов и выбранной формой модели.

4. На основе реальных данных провести расчет себестоимости теплоснабжения для физических лиц, проживающих на территории г. Харькова.

Проверка мультиколлинеарности исходных данных и отбор определяющих факторов для построения модели. На рис. 1 приведены исходные данные, используемые при выполнении корреляционно-регрессионного анализа для выборки из 27 областей Украины, а так же показатели и обозначения, используемые при выполнении корреляционно-регрессионного анализа.

В результате проведения корреляционного анализа была получена матрица коэффициентов Пирсона (табл. 1). Пороговое значение значимости коэффициента

корреляции, определяющее наличие стохастической связи в данном исследовании, было выбрано 0,9.

Значения коэффициентов парной корреляции указывают на весьма тесную связь зависимой переменной Y с факторными переменными $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_7$. В то же время межфакторная связь $r_{x_4x_5} = 0,9964$ весьма тесная и превышает тесноту связи с результирующей переменной Y , что свидетельствует о наличии мультиколлинеарности. В связи с этим для улучшения разрабатываемой модели необходимо исключить из ее структуры данный фактор как малоинформативный и недостаточно статистически надежный.

Таким образом, исследование результатов ранжирования показывает, что наибольшее влияние на результирующий признак Y (себестоимость ЭМИ) оказывают следующие показатели: X_1 (затраты на электроэнергию), X_4 (затраты оплату труда), X_5 (соц. отчисления); среднее влияние на результирующий признак Y оказывает показатели X_2 (затраты на воду), X_3 (прочие затраты) и X_7 (прочие операционные затраты); и наименьшее влияние оказывает показатель X_6 (амортизация).

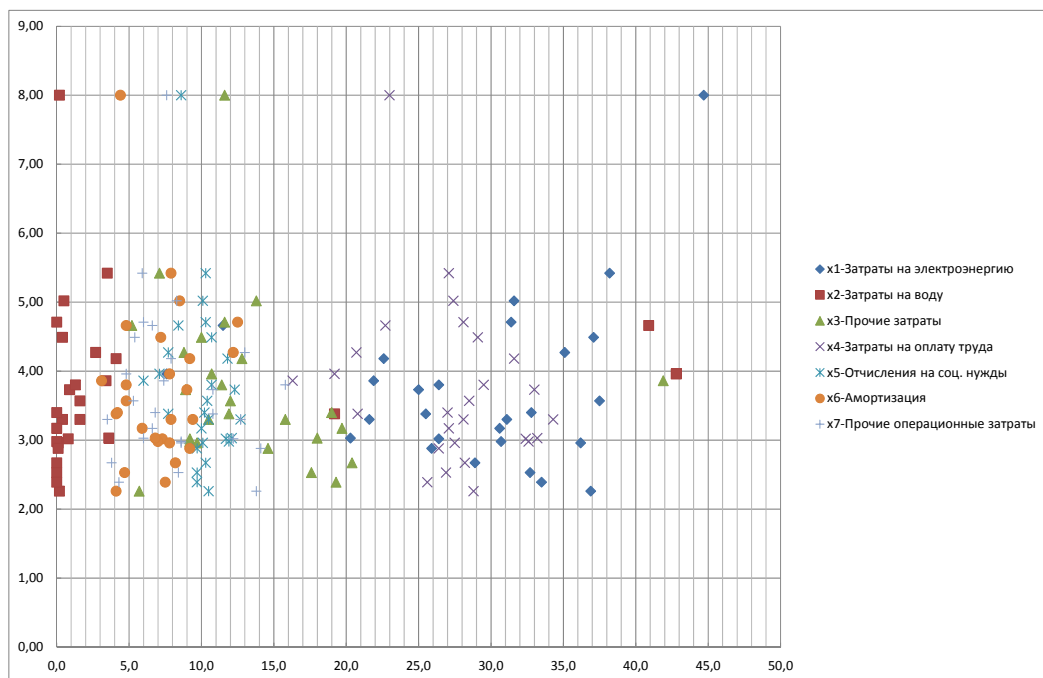


Рис. 1 – Исходные данные для построения модели: \blacklozenge – фактор X_1 , \blacksquare – фактор X_2 , \blacktriangle – фактор X_3 , \times – фактор X_4 , ж – фактор X_5 , \bullet – фактор X_6 , $+$ – фактор X_7

Таблица 1 – Корреляционная матрица Пирсона

Факторы	Y	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
Y	1	0,2176	0,1355	-0,1763	-0,2781	-0,2517	0,0429	-0,1387
x_1	0,2176	1	-0,7168	-0,1023	0,1222	0,1344	-0,0027	-0,0190
x_2	0,1355	-0,7168	1	-0,2095	-0,4935	-0,4947	-0,1485	-0,1782
x_3	-0,1763	-0,1023	-0,2095	1	-0,3673	-0,3717	-0,2847	-0,2881
x_4	-0,2781	0,1222	-0,4935	-0,3673	1	0,9964	0,2322	0,1565
x_5	-0,2517	0,1344	-0,4947	-0,3717	0,9964	1	0,2503	0,1310
x_6	0,0429	-0,0027	-0,1485	-0,2847	0,2322	0,2503	1	-0,0382
x_7	-0,1387	-0,0190	-0,1782	-0,2881	0,1565	0,1310	-0,0382	1

Выбор спецификации и построение регрессионной модели определения себестоимости теплоснабжения. После того, как были выявлены наиболее существенные факторы, влияющие на себестоимость рассматриваемого объекта, был проведен подбор вида функциональной зависимости, т. е. выбор вида многофакторной регрессионной модели, основываясь на графическом отображении исходных данных (рис. 1) и диаграммы рассеяния, приведенную на рис. 2.

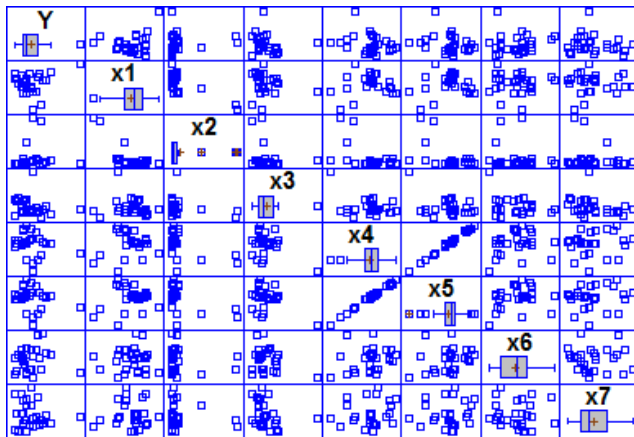


Рис. 2 – Диаграмма рассеяния для исходных наблюдений

От правильности этого выбора зависит, насколько построенная модель будет адекватна изучаемому явлению, т. е. будет ли она соответствовать ему при заданном уровне точности, что в свою очередь, предопределяет практическую ценность получаемых результатов.

Согласно рис. 2 можно использовать наиболее распространенную аддитивную модель, описывающуюся соотношением (1).

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^m \beta_j X_j \quad (1)$$

С другой стороны, задача построения модели себестоимости теплоснабжения является производственной задачей, для которой наиболее часто используются мультипликативные модели:

$$Y = \beta_0 \cdot \prod_{j=1}^m X_j^{\beta_j} \quad (2)$$

Одним из преимуществ модели (2) является то, что параметры b_j ($j = \overline{1, m}$) имеют конкретный экономический смысл – в таких моделях они являются коэффициентами эластичности.

Исходя из проведенного теоретического анализа автором было принято решение по построению модели многофакторной регрессии как вида (1), так и вида

(2) с дальнейшим выбором одной из них, максимально удовлетворяющей соответствующим критериям качества моделей.

Таким образом, результат выполнения построения моделей вида (1) и (2) описывается соответствующими соотношениями (3)–(5):

– аддитивная модель без учета корреляционной зависимости факторов с результирующим признаком:

$$Y = 343,434 + 3,51972 * X_1 + 3,49261 * X_2 + 3,4523 * X_3 + 2,80546 * X_4 + 5,17132 * X_5 + 3,4899 * X_6 + 3,43705 * X_7; \quad (3)$$

– аддитивная модель после выбраковки незначимых членов модели:

$$Y = 0,12739 + 0,102815 * X_1 + 0,0699473 * X_2 + 0,012562 * X_3 + 0,0218221 * X_4 + 0,0848401 * X_6; \quad (4)$$

– мультипликативная модель после выбраковки незначимых членов модели:

$$Y = X_1^{2.3} X_2^{1.1} X_3^{1.41} X_4^{2.03} X_6^{0.9} \quad (5)$$

Эконометрический анализ моделей, включающий в себя проверку гипотез о значимости моделей на основании коэффициента детерминации, F-критерия Фишера, t-критериев Стьюдента, проверку свойств оценок наименьших квадратов коэффициентов множественной регрессии, а так же проверку правильности выбора спецификации моделей, приведен в табл. 2.

Согласно табл. 2, проверка статистической значимости параметров регрессионных уравнений (1)–(3) (коэффициентов регрессии) была выполнена по t-критерию Стьюдента и подтвердила значимость последних (см. столбец 2). Используя F-критерий, так же была проверена гипотеза значимости множественной регрессии с признанием последней адекватной для всех трех моделей (см. столбец 3). Коэффициент детерминации оценивает долю дисперсии результата за счет представленных в уравнении факторов в общей вариации результата. Здесь эта доля составляет соответственно 24,8 %, 35 % и 26 % (см. столбец 4) и указывает на невысокую степень обусловленности вариации результата вариацией факторов, иными словами – на среднюю связь факторов с результатом. Авторы объясняют последнее явление недостаточностью исходных эмпирических данных, однако, согласно работам [7, 10], модели регрессии с невысоким коэффициентом детерминации на достаточном уровне будут аппроксимировать исходные данные.

Для подтверждения вышесказанного авторы статьи приводят графическое отображение остатков моделей. Рис. 3 демонстрирует зависимость остатков от объясняющих переменных. Эти графики не выявили квадратичных эффектов.

Таблица 2 – Эконометрический анализ моделей (3)–(5)

Модель	t-критерии Стюдента					F-критерий Фишера	Коэффициент детерминации
	Parameter	Estimate	Error	Statistic	P-Value		
Модель (1)	CONSTANT	343,434	265,07	1,29563	0,2106	Standard Error of Est. = 1,11058	R-squared = 24,7668 percent R-squared (adjusted for d.f.) = 6,85411 percent
	x1	3,51972	2,64461	1,3309	0,1990		
	x2	3,49261	2,6458	1,32006	0,2025		
	x3	3,4523	2,65567	1,29998	0,2092		
	x4	2,80546	2,78516	1,00729	0,3265		
	x5	5,17132	3,04146	1,70028	0,1054		
	x6	3,4899	2,64791	1,31798	0,2032		
Модель (2)	CONSTANT	0,12739	6,22439	0,0204663	0,9839	Standard Error of Est. = 1,13651	R-squared = 35,0034 percent R-squared (adjusted for d.f.) = 11,0573 percent
	x1	0,102815	0,0700092	1,4686	0,1568		
	x2	0,0699473	0,0664597	1,05248	0,3045		
	x3	0,012562	0,0664464	0,189055	0,8519		
	x5	0,0218221	0,300075	0,0727221	0,9427		
	x6	0,0848401	0,110185	0,769981	0,4499		
Модель (3)	Col 1	2,34246	0,155224	0,498794	0,6234	Standard Error of Est. = 0,271494	R-squared = 26,0684 percent R-squared (adjusted for d.f.) = 3,88897 percent
	Col 2	1,119541	0,13936	1,40224	0,1762		
	Col 3	1,40743	4,30623	1,337	0,1962		
	Col 4	2,02543	4,4092	1,18512	0,2499		
	Col 6	0,8571022	0,16797	0,339955	0,7374		

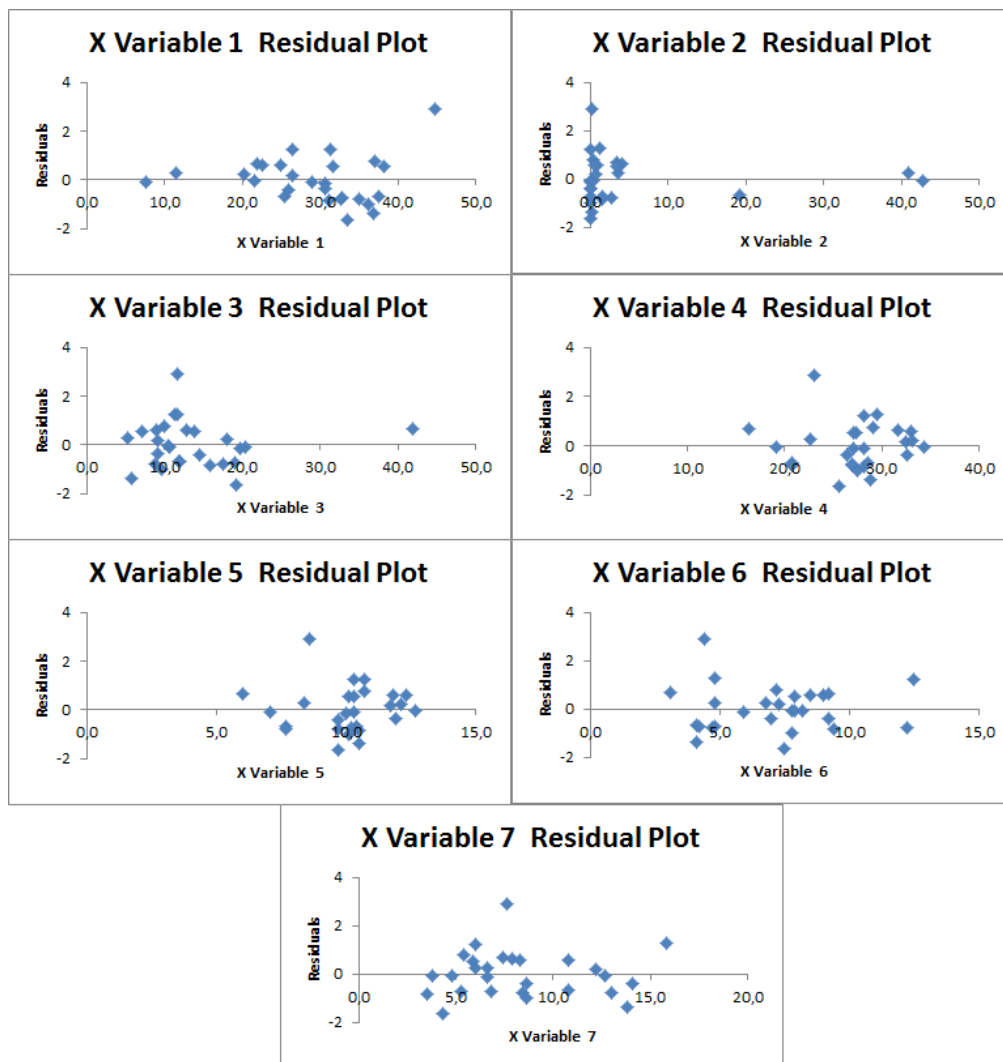


Рис. 3 – Зависимость остатков модели (1) от входящих в нее факторов

Таким образом, анализ качества уравнений (1)–(3) и проверка адекватности уравнения эмпирическим данным подтверждает возможность дальнейшего использования полученных моделей.

Пошаговый подход к построению регрессионной модели. Продолжая анализ задачи авторы определили такой набор объясняющих переменных, который позволил построить адекватную и точную модель без необходимости учитывать все переменные. Одним из основных способов построения таких моделей является пошаговая регрессия, с помощью которой можно определить наилучшую регрессионную модель

без перебора всех регрессионных моделей. В процессе шаговой регрессии F-критерий применяется к модели с любым количеством переменных. Важным свойством пошаговой процедуры является то, что объясняющие переменные, включенные в модель на предыдущих этапах, могут впоследствии исключаться из рассмотрения (табл. 3). Это значит, что на каждом этапе объясняющие переменные как включаются, так и исключаются из модели. Пошаговая регрессия останавливается, когда ни добавление, ни удаление объясняющих переменных не повышают точность модели.

Таблица 3 – Результаты применения метода выбора наилучшего подмножества для решения задачи о себестоимости теплоснабжения

MSE	R-Squared	Adjusted R-Squared	Cp	Included Variables	MSE	R-Squared	Adjusted R-Squared	Cp	Included Variables
					6	7	8	9	10
					1,21895	22,2406	12,0981	3,73087	ABG
1	2	3	4	5	1,2191	22,231	12,0872	3,73368	ACD
1,38671	0,0	0,0	4,23231		1,24735	20,4285	10,0496	4,26059	ACE
1,37392	4,73323	0,92256	4,84868	A	1,38671	11,5385	0,0	8,14794	ACF
1,38671	3,84615	0,0	5,69584	B	1,38671	11,5385	0,0	7,11531	ACG
1,38671	3,84615	0,0	5,32397	C	1,23758	21,0519	10,7544	4,07835	ADE
1,33063	7,73459	4,04397	3,97132	D	1,32354	15,5686	4,55577	5,68126	ADF
1,35078	6,3375	2,591	4,37972	E	1,33389	14,9083	3,8094	5,87427	ADG
1,38671	3,84615	0,0	6,17849	F	1,34511	14,1921	2,9998	6,08362	AEF
1,38671	3,84615	0,0	5,66963	G	1,35252	13,7199	2,46602	6,22166	AEG
1,16878	22,1991	15,7157	1,74301	AB	1,38671	11,5385	0,0	8,27585	AFG
1,38671	7,69231	0,0	6,14796	AC	1,26192	19,499	8,99891	4,5323	BCD
1,28957	14,1586	7,00512	4,09344	AD	1,30151	16,9737	6,14414	5,27052	BCE
1,31038	12,7735	5,5046	4,49833	AE	1,38671	11,5385	0,0	9,02033	BCF
1,38671	7,69231	0,0	6,79337	AF	1,38671	11,5385	0,0	8,09954	BCG
1,38671	7,69231	0,0	6,31891	AG	1,30758	16,5862	5,7061	5,3838	BDE
1,38671	7,69231	0,0	7,02706	BC	1,38671	11,5385	0,0	7,6141	BDF
1,38607	7,73501	0,046256	5,97119	BD	1,38671	11,5385	0,0	7,69439	BDG
1,38671	7,69231	0,0	6,37509	BE	1,38671	11,5385	0,0	8,02248	BEF
1,38671	7,69231	0,0	7,57709	BF	1,38671	11,5385	0,0	8,04695	BEG
1,38671	7,69231	0,0	7,29936	BG	1,38671	11,5385	0,0	9,20729	BFG
1,25147	16,6951	9,75301	3,35196	CD	1,18616	24,3322	14,4625	3,11945	CDE
1,28014	14,7867	7,68554	3,90983	CE	1,30261	16,9037	6,06504	5,29098	CDF
1,38671	7,69231	0,0	7,32229	CF	1,25664	19,8361	9,37992	4,43377	CDG
1,38671	7,69231	0,0	6,17879	CG	1,3321	15,0224	3,9384	5,84091	CEF
1,25325	16,5764	9,62449	3,38663	DE	1,27991	18,3516	7,70183	4,86771	CEG
1,36773	8,95602	1,36902	5,61426	DF	1,38671	11,5385	0,0	8,14541	CFG
1,37212	8,66378	1,05243	5,69969	DG	1,30473	16,7681	5,91182	5,3306	DEF
1,38671	7,69231	0,0	6,02978	EF	1,30762	16,5839	5,70349	5,38447	DEG
1,38671	7,69231	0,0	6,04701	EG	1,38671	11,5385	0,0	7,38745	DFG
1,38671	7,69231	0,0	7,62821	FG	1,38671	11,5385	0,0	7,74407	EFG
1,21914	22,2282	12,084	3,73451	ABC	1,25594	23,3642	9,43044	5,40241	ABCD
1,21044	22,7832	12,7114	3,57227	ABD	1,26776	22,6428	8,57786	5,6133	ABCE
1,21533	22,4711	12,3587	3,66348	ABE	1,23326	24,7478	11,0656	4,99795	ABCF
1,19022	24,0731	14,1696	3,19518	ABF	1,27423	22,2481	8,11138	5,72868	ABCG
1,36393	16,7748	1,64291	7,32866	DEFG	1,17833	28,0999	15,0271	4,01807	ABDE
1,22112	28,8759	11,9416	5,79122	ABCDE	1,22922	24,9943	11,3569	4,92591	ABDF
1,28774	24,9954	7,1372	6,92557	ABCDF	1,26477	22,8252	8,79346	5,55997	ABDG
1,28678	25,0513	7,20635	6,90925	ABCDG	1,23505	24,6387	10,9367	5,02984	ABEF
1,29166	24,7668	6,85411	6,99241	ABCEF	1,26978	22,5194	8,43206	5,64936	ABEG
1,31263	23,5454	5,34194	7,34945	ABCEG	1,24426	24,0769	10,2727	5,19407	ABFG
1,28807	24,9764	7,11359	6,93115	ABCFG	1,17628	28,225	15,175	3,9815	ACDE
1,21926	28,9839	12,0754	5,75964	ABDEF	1,26922	22,554	8,47294	5,63925	ACDF
1,23093	28,3043	11,2339	5,9583	ABDEG	1,23032	24,9272	11,2776	4,94553	ACDG

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,28772	24,9967	7,13882	6,92519	ABDFG	1,29799	20,7984	6,39808	6,15247	ACEF
1,29377	24,644	6,70204	7,02832	ABEFG	1,25316	23,5341	9,63115	5,35277	ACEG
1,23229	28,2251	11,1359	5,98146	ACDEF	1,38671	15,3846	0,0	9,0954	ACFG
1,21832	29,039	12,1435	5,74354	ACDEG	1,28823	21,3938	7,10172	5,97842	ADEF
1,28698	25,0398	7,19218	6,91259	ACDFG	1,29368	21,0615	6,70901	6,07556	ADEG
1,31055	23,6669	5,49233	7,31394	ACEFG	1,37386	16,1685	0,926413	7,50589	ADFG
1,34943	21,4022	2,68839	7,97597	ADEFG	1,38671	15,3846	0,0	7,85441	AEFG
1,26091	26,558	9,07175	6,46881	BCDEF	1,20598	26,4125	13,0329	4,51134	BCDE
1,22589	28,5978	11,5972	5,87253	BCDEG	1,3188	19,5286	4,89747	6,52364	BCDF
1,28662	25,0605	7,21778	6,90655	BCDFG	1,22963	24,9693	11,3274	4,93321	BCDG
1,32064	23,0789	4,76437	7,48581	BCEFG	1,35958	17,0401	1,95644	7,25111	BCEF
1,38671	19,2308	0,0	9,32559	BDEFG	1,26149	23,0255	9,03012	5,50143	CEG
1,28371	25,2301	7,42771	6,85698	CDEFG	1,38671	15,3846	0,0	10,0871	BCFG
1,27697	29,1646	7,91402	7,70682	ABCDEF	1,36383	16,7808	1,65005	7,3269	BDEF
1,27883	29,0611	7,77942	7,73708	ABCDEG	1,36693	16,5915	1,42637	7,38222	BDEG
1,34999	25,1139	2,64808	8,89094	ABCDFG	1,38671	15,3846	0,0	9,38541	BDFG
1,23428	31,5325	10,9923	7,01463	ABCEFG	1,38671	15,3846	0,0	9,74388	BEFG
1,27593	29,2224	7,98909	7,68994	ABDEFG	1,23971	24,3547	10,601	5,11287	CDEF
1,27917	29,0424	7,75512	7,74255	ACDEFG	1,22615	25,1816	11,5782	4,87115	CDEG
1,28094	28,944	7,62725	7,7713	BCDEFG	1,31304	19,8799	5,3126	6,42096	CDG
1,23338	35,0034	11,0573	8,0	ABCDEF	1,33723	18,4039	3,56828	6,85242	CEFG

Пошаговый подход выявил условие взаимодействия всех факторов, приведенных на рис. 1. Таким образом, авторами статьи для дальнейшего прогноза из трех моделей выбрана первая.

Краткосрочное прогнозирование себестоимости теплоснабжения. Тарифы на централизованное теплоснабжение с 1 июля 2016 года утверждены Постановлением № 1101 от 9 июня 2016 года Национальной комиссии, осуществляющей государственное

регулирование в сферах энергетики и коммунальных услуг (рис. 4).

После проведения авторами статьи процесса разработки и составления прогнозов, т.е. научно обоснованных гипотез о вероятном будущем состоянии экономической системы и экономических объектов с использованием модели (1), были получены следующие результаты доверительных интервалов, приведенных в табл. 4.

N п/п	Название коммунальной услуги	Единица измерения	Тариф, грн. за единицу измерения (с НДС)
1	Централизованное отопление для жильцов жилых домов с домовыми или квартирными приборами учета тепловой энергии	1 Гкал	1416.96
2	Централизованное отопление для жильцов жилых домов без домовых и квартирных приборов учета тепловой энергии	1 кв. м в месяц на протяжении отопительного периода	32.97

Рис. 4 – Тарифы за теплоснабжение, июнь, 2016 год, Украина

Таблица 4 – 95,0 % Доверительные интервалы для оценок коэффициентов

Parameter	Estimate	Standard Error	Lower Limit	Upper Limit
CONSTANT	343,434	265,07	898,233	211,366
x1	3,51972	2,64461	2,01553	9,05497
x2	3,49261	2,6458	2,04513	9,03034
x3	3,4523	2,65567	2,10608	9,01069
x4	2,80546	2,78516	3,02397	8,63488
x5	5,17132	3,04146	1,19454	11,5372
x6	3,4899	2,64791	2,05224	9,03205
x7	3,43705	2,63083	2,06935	8,94345

Используя зависимость (1) и данные рис. 5 получим точечный прогноз, соответствующий себестоимости теплоснабжения:

$$Y = 343,434 + 3,51972 * X_1 + 3,49261 * X_2 + 3,4523 * X_3 + 2,80546 * X_4 + 5,17132 * X_5 + 3,4899 * X_6 + 3,43705 * X_7 = 343,434 + 3,51972 * 32 + 3,49261 * 0,03 + 3,4523 * 8,8 + 2,80546 * 3,2 + 5,17132 * 4,4 + 3,4899 * 8,8 + 3,43705 * 4,4 = 564,11 \text{ грн/Гкал}$$

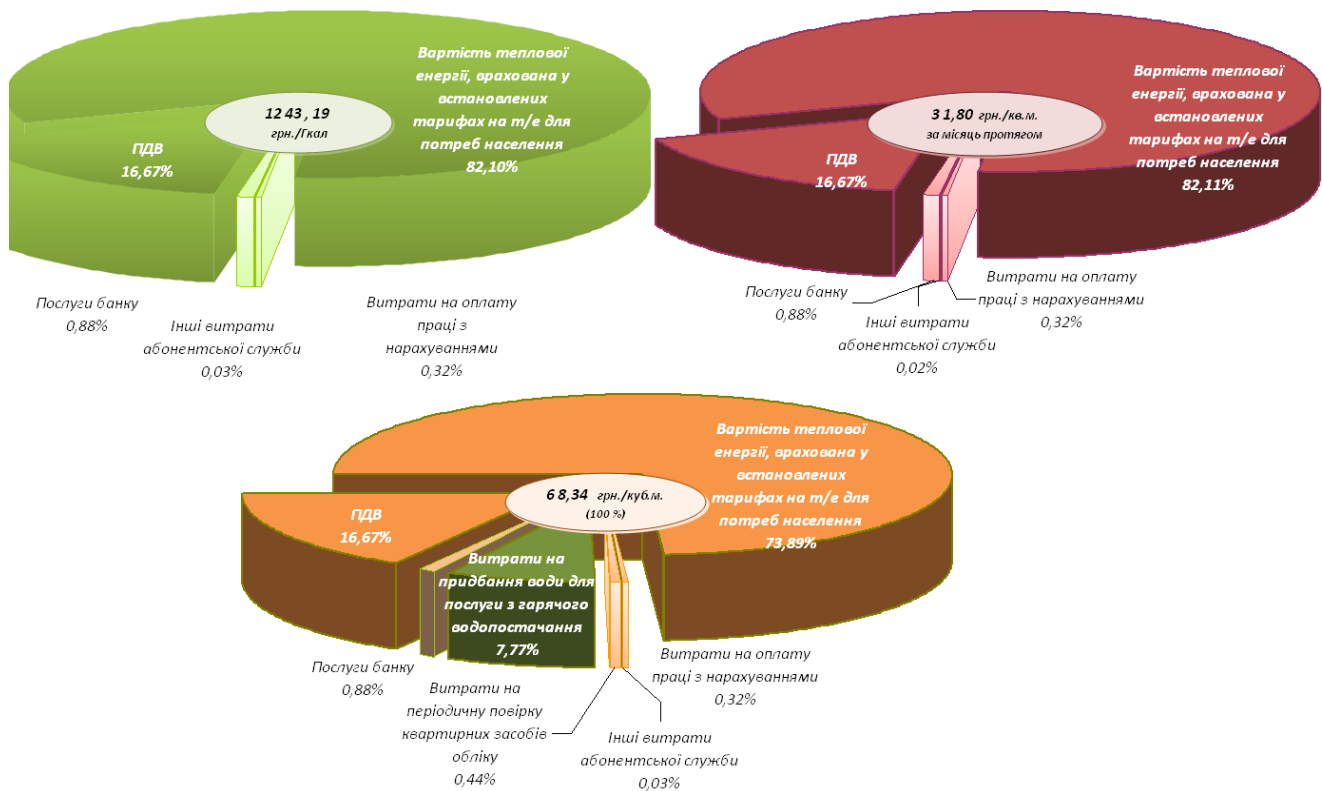


Рис. 5 – Структура тарифов для населення г. Харькова за теплоснабження

Для сравнения на рис. 6 приведены тарифы за теплоснабжение в странах Европы, США и Корея. Заметно, что полученные расчеты себестоимости теплоснабжения почти в половину меньше тарифов, указанных на рис. 6. В связи с вышеприведенными расчетами возникают вопросы (Что делать дальше, чтобы избежать перерасхода теплоносителя на отопление дома и стабилизировать расходы в тепловой сети? Как дальше модернизировать систему отопления многоэтажного дома? ...), ответы на которые выходят за рамки данной работы.

	Средневзвешенный тариф на тепловую энергию	
	евро/Гдж	Грн/Гкал
Исландия	3,14	363,5
Украина		1042,9
Венгрия	9,3	1076,6
Болгария	10,7	1238,7
Польша	10,73	1242,1
Южная Корея	12,2	1412,3
США	13,85	1603,3
Австрия	13,96	1616,1
Румыния	14,54	1683,2

Рис. 6 – Тарифы за теплоснабжение, июнь, 2016 год, страны Европы, США, Корея

Выводы. В работе была рассмотрена и реализована методология построения эконометрических моделей различной формы, предназначенных для анализа и прогноза себестоимости теплоснабжения. Особенностью предложенной методологии эконометрического моделирования является пошаговая процедура построения эконометрических зависимостей и отбор лучших моделей на основании учета среднеквадратической ошибки регрессии.

В начале статьи приводится изучение централизованной и нормированной оценки наименьших квадратов коэффициентов линейной эконометрической модели (3) при выполнении стандартных предположений о модели.

Далее в статье приводится построение двух производственных моделей (4) и (5), в которых была решена проблема мультиколлинеарности проблема спецификации эконометрических моделей имеющимся статистическим данным. Однако несмотря на доказанную значимость обеих моделей последняя была получена с набором незначимых коэффициентов и отбракована, для дальнейшего анализа она не представляла особого интереса.

В заключение была проведена апробация первой модели, которая показала, что уравнение регрессии применимо для прогнозирования возможных ожидаемых значений результативного признака. На основании модели авторы статьи предлагают новые тарифы на теплоснабжение для физических лиц Харьковской области. Проведен сравнительный ана-

лиз тарифов в сопоставлении с тарифами в Европе, США и Корею.

Единственным недостатком такой модели можно считать следующее: нельзя подставлять значения факторного признака, значительно отличающиеся от входящих в базисную информацию, по которой вычислено уравнение регрессии. Авторы рекомендуют при определении значений факторов не выходить за пределы трети размаха вариации, как за минимальное, так и за максимальное значение признака-фактора, имевшееся в исходной информации.

Список литературы:

1. Fitch Affirms Ukrainian City of Kharkov at 'B-' [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fitchratings.com/site/pr/1021461>
2. Горожанкин, С. А. Тепловая схема источника теплоснабжения с теплонасосной установкой на шахтной воде [Текст] / С. А. Горожанкин, Д. В. Выборнов, С. И. Монах // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (56). – С. 15–20.
3. Chen, H. Systemic Risk and the Interconnectedness Between Banks and Insurers: An Econometric Analysis. [Текст] / H. Chen J. D. Cummins, K. S. Viswanathan, M. A. Weiss // Journal of Risk and Insurance. – 2013. – Vol. 81, №. 3. – P. 623–652. doi: [10.1111/j.1539-6975.2012.01503.x](https://doi.org/10.1111/j.1539-6975.2012.01503.x)
4. Wells, K. B. Treatment Research at the Crossroads: The Scientific Interface of Clinical Trials and Effectiveness Research [Text] / K. B. Wells // American Journal of Psychiatry. – 1999. – № 156 (1). – P. 5–10. doi: [10.1176/ajp.156.1.5](https://doi.org/10.1176/ajp.156.1.5)
5. Уварова, І. С. Модель впливу міжнародних міграційних процесів на економіку України [Текст] / І. С. Уварова // Бізнес Інформ. – 2015. – № 2. – С. 119–124.
6. Ермолаев, Е. Е. Выбор варианта организации теплоснабжения жилых зданий в городском округе Самара [Текст] / Е. Е. Ермолаев, Е. А. Складорова, Н. А. Ушанова // Вестник ГУУ. – 2017. – № 2. – С. 66–70.
7. Nakamura, E. Five Facts about Prices: A Reevaluation of Menu Cost Models* [Text] / E. Nakamura, J. Steinsson // Quarterly Journal of Economics. – 2008. – № 123 (4). – P. 1415–1464. doi: [10.1162/qjec.2008.123.4.1415](https://doi.org/10.1162/qjec.2008.123.4.1415)
8. Schneps-Shneppe, M. A. (2016). How to build an intelligent city. Part 1. The project "Smart Cities and Communities" in the EU

- Horizon 2020 [Text] / M. A. Schneps-Shneppe // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Vol. 1. № 1. – С. 12–20.
9. Huggins, D. J. Concepts in Toxicology: Development of Online Instructional Modules [Text] / M. Schwenk, D. M. Templeton, J. H. Duffus // Chemistry International. – 2015. – № 37 (1). – P. 12–14. doi: [10.1515/ci-2015-0104](https://doi.org/10.1515/ci-2015-0104)
 10. Калимуллина, Д. Д. Независимая система теплоснабжения потребителей [Текст] / Д. Д. Калимуллина, Р. Р. Зайнуллин // Инновационная наука. – 2016. – № 5-2 (17). – С. 123–125.

References

1. Fitch Affirms Ukrainian City of Kharkov at 'B-'. Available at: <https://www.fitchratings.com/site/pr/1021461>
2. Gorozhankin, S. A., Vybornov, D. V., Monah, S. I. (2013) Thermal scheme of a heat supply source with a heat pump plant on mine water. Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta, 2 (56), 15–20.
3. Chen, H., Cummins, J. D., Viswanathan, K. S., Weiss, M. A. (2013). Systemic Risk and the Interconnectedness Between Banks and Insurers: An Econometric Analysis. Journal of Risk and Insurance, 81 (3), 623–652. doi: [10.1111/j.1539-6975.2012.01503.x](https://doi.org/10.1111/j.1539-6975.2012.01503.x)
4. Wells, K. B. (1999). Treatment Research at the Crossroads: The Scientific Interface of Clinical Trials and Effectiveness Research. American Journal of Psychiatry, 156 (1), 5–10. doi: [10.1176/ajp.156.1.5](https://doi.org/10.1176/ajp.156.1.5)
5. Uvarova, I. S. (2015). Model the impact of international migration on the economy of Ukraine. Business Info, 2, 119–124.
6. Ermolaev, E. Y., Skljjarova, E. A., Ushanova, N. A. (2017). Choice of a variant of the organization of heat supply of residential buildings in the urban district of Samara. Vestnik GUU, 2, 66–70.
7. Nakamura, E., Steinsson, J. (2008). Five Facts about Prices: A Reevaluation of Menu Cost Models*. Quarterly Journal of Economics, 123 (4), 1415–1464. doi: [10.1162/qjec.2008.123.4.1415](https://doi.org/10.1162/qjec.2008.123.4.1415)
8. Schneps-Shneppe, M. A. (2016). How to build an intelligent city. Part 1. The project "Smart Cities and Communities" in the EU Horizon 2020 Program. International Journal of Open Information Technologies, 1 (1), 12–20.
9. Huggins, D. J., Schwenk, M., Templeton, D. M., Duffus, J. H. (2015). Concepts in Toxicology: Development of Online Instructional Modules. Chemistry International, 37 (1), 12–14. doi: [10.1515/ci-2015-0104](https://doi.org/10.1515/ci-2015-0104)
10. Kalimullina, D. D., Zajnullin, R. R. (2016). Independent system of consumers' heat supply. Innovative science, 5-2 (17), 123–125.

Поступила (received) 27.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Новые подходы к расчету себестоимости централизованного теплоснабжения/ Е. А. Ковалева, Е. Ю. Мисюра // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С. 40–48.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Нові підходи до розрахунку собівартості централізованого теплопостачання/ К. О. Ковальова, Є. Ю. Мисюра // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С. 40–48.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

New approaches to calculating the cost of district heating/ K. Kovaleva, J. Misura //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 40–48. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковальова Катерина Олександрівна – Кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, Кафедра вищої математики та економіко-математичних методів, пр. Науки, 9-А, м Харків, Україна, 61166; e-mail: Kateryna.Kovalova@m.hneu.edu.ua.

Мисюра Євгенія Юрївна – Кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, Кафедра вищої математики та економіко-математичних методів, пр. Науки, 9-А, м Харків, Україна, 61166; e-mail: misuraeu@mail.ru.

Ковалева Екатерина Александровна – Кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, Кафедра высшей математики и экономико-математических методов, пр. Науки, 9-А, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: Kateryna.Kovalova@m.hneu.edu.ua

Мисюра Евгения Юрьевна – Кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, Кафедра вищої математики і економіко-математических методів, пр. Науки, 9-А, г. Харків, Україна, 61166; e-mail: misuraeu@mail.ru.

Kovalova Katerina – Lecturer, Candidate of technical science, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, The department of Mathematics High society and economic-mathematical methods, Lenin Avenue, 9av, Kharkov, Ukraine, 61166; e-mail: Kateryna.Kovalova@m.hneu.edu.ua.

Misura Jane – Lecturer, Candidate of technical science, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, The department of Mathematics High society and economic-mathematical methods, Lenin Avenue, 9av, Kharkov, Ukraine, 61166; e-mail: misuraeu@mail.ru.

УДК 621.311.42: 519.23

О. С. МІЛЮТИНА, С. А. ЛЕВЧЕНКО

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ГРАФІКІВ НАВАНТАЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЇ ПІДСТАНЦІ

Приведено обґрунтування та основні аналітичні залежності для статистичного аналізу електричного навантаження трансформаторної підстанції. Розглянуто можливість застосування нормального закону розподілення вірогідностей для визначення прогнозованих комерційних втрат електричної енергії в трансформаторах. Приведено приклад статистичного аналізу електричного навантаження трансформаторної підстанції 110/35/10 кВ. Перевірено гіпотезу про нормальний закон розподілення генеральної сукупності за критерієм Пірсона. Статистичний підхід дозволяє автоматизувати визначення втрат електричної потужності та енергії у часі та оптимізувати режим роботи трансформаторної підстанції.

Ключові слова: трансформаторна підстанція, графік навантаження, статистичний аналіз, нормальний закон розподілення, втрати електричної потужності.

Приведено обоснование и основные аналитические зависимости для статистического анализа электрической нагрузки трансформаторной подстанции. Рассмотрена возможность применения нормального закона распределения вероятностей для определения прогнозируемых коммерческих потерь электрической энергии в трансформаторах. Приведён пример статистического анализа электрической нагрузки трансформаторной подстанции 110/35/10 кВ. Проверено гипотезу о нормальном законе распределения по критерию Пирсона. Статистический подход позволяет автоматизировать определение потерь электрической мощности и энергии во времени и оптимизировать режим работы трансформаторной подстанции.

Ключевые слова: трансформаторная подстанция, график нагрузки, статистический анализ, нормальный закон распределения, потери электрической мощности.

When working on the transformer substation is important to determine active power losses in transformers and power caused by their mode of operation. It is not considered random character of the transformer substation and its projected work. The study is an attempt to discover the law of distribution, which is subject to the said substation work in the presence of load demand. The object of research is the justification of application of statistical analysis to identify the projected losses at the substation. The statistical method allows to describe the over all impact of random factors and the invariability employment transformer substation. According to the central limit theorem amount sufficiently large number of weakly dependent random variables that have roughly the same scale (all values have finite mathematical expectation and variance, none of the cases does not dominate) has distribution close to normal, which is characterized by two integral indicators: expectation $M(X)$ and dispersiyeyu $D(X) = \sigma^2$, where σ – standard deviation.

There is an example of statistic analysis of electrical load transformer substations 110/35/10 kV. Checked hypothesis of normal law on apportionment Pirsons Criteria. Calculations showed that both side LV (10 kV) and MV side (35 kV), the output of the normal distribution load depends on the level of significance α . Statistic approach allows us to avtomatiz determination of the loss of time electrical-power mode and to optimize work of transformer substations.

Keywords: transformer substation, load graph, statistical analysis, normal distribution law, loss of electric power.

Вступ. Графіки навантажень трансформаторів являють собою випадковий, що тече в часі, процес, який формується в результаті спільної дії низки випадкових факторів: загрузки підприємства, замовленнями, наявністю сировини для виробництва продукції, режимом роботи, погодними, кліматичними умовами та ін. За прийнятою практикою, потужність трансформаторів на підстанції вибирається за їхнім навантаженням з урахуванням категорії споживачів за надійністю електропостачання.

При роботі трансформаторів на підстанції важливим є визначення втрат активної потужності в трансформаторах, обумовлених режимом їх роботи.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Для розрахунку втрат активної потужності в трансформаторах використовуються методики [1–4], які дозволяють отримати можливі втрати як активної потужності, так і електричної енергії. В даних джереле-

лах не розглядається випадковий характер роботи трансформаторної підстанції та її прогнозована робота.

В роботах [5, 6] розглядаються втрати електричної потужності і електроенергії в електричних мережах енергосистем.

Інтерес представляє статистичний аналіз роботи повітряних відцентрових компресорів [7], де показано, що навантаження на компресорну станцію може бути описане нормальним законом розподілу.

Мета та задачі дослідження. Нижче приведено аналіз графіків навантаження двотрансформаторної підстанції 110/35/10 кВ потужністю 2х25 МВА, яка живить промислових та сільськогосподарських споживачів.

Метою дослідження є спроба виявити закон розподілення, якому підлягає робота зазначеної підстанції при наявності її графіка навантаження.

© О. С. Мілютіна, С. А. Левченко. 2017

Задачею дослідження є обґрунтування застосування статистичного аналізу для виявлення прогнозованих втрат електроенергії на підстанції.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Визначити півгодинні значення активної потужності добового графіку навантаження на сторонах 10 і 35 кВ.

2. Розрахувати звідні характеристики вибірки значень потужностей.

3. Перевірити гіпотезу про закон розподілення генеральної сукупності за критерієм згідності χ^2 .

Статистичний аналіз роботи підстанції. Статистичний метод дає змогу охарактеризувати сумарний вплив всіх випадкових чинників і їх мінливості на роботу трансформаторної підстанції.

Згідно центральної граничної теоремі сума досить великої кількості слабо залежних випадкових величин, що мають приблизно однакові масштаби (всі величини мають кінцеві математичні очікування та дисперсії; жоден зі случав не домінує), має розподіл, близький до нормального [8, 9], який характеризується двома інтегральними показниками: математичним очікуванням $M(X)$ і дисперсією $D(X) = \sigma^2$, де σ – середнє квадратичне відхилення.

Навантаження підстанції на стороні НН (10 кВ)

Середньозважений добовий графік навантаження на стороні НН (10 кВ) зображено на рис. 1.

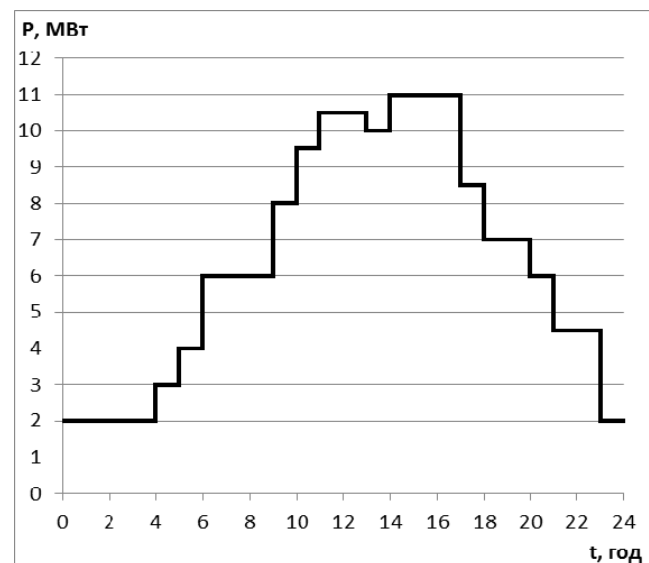


Рис. 1 – Графік навантаження на стороні НН (10 кВ)

Розподілення потужності P кожні півгодини ($\Sigma n_i = 48$) задаємо у вигляді послідовності варіант x_i і відповідних їм частот n_i (табл. 1).

Таблиця 1 – Варіанти та частоти розподілення потужності P (сторона НН)

Варіанта, x_i	2	3	4	4,5	6	7	8	8,5	9,5	10	10,5	11
Частота, n_i	10	2	2	4	8	4	2	2	2	2	4	6

Так як початкові варіанти не є рівновіддаленими, то інтервал, у якому укладені всі варіанти вибірки, поділено на шість рівних, довжини $h=1,5$, часткових інтервалів. Середини часткових інтервалів x_i^* утворюють послідовність рівновіддалених варіант. Як частоти кожної середини інтервалу прийнято суму частот варіант, які потрапили у відповідний частковий інтервал (табл. 2). У цьому випадку зручно знаходити вибіркової середньої та дисперсію методом множень за формулами:

$$\bar{x}^* = M_1^* h + C, \quad D_B = \left[M_2^* - (M_1^*)^2 \right] h^2, \quad (1)$$

де h – крок (різниця між двома сусідніми варіантами, $h=1,5$); C – помилковий нуль (варіанта, яка розташована приблизно всередині варіаційного ряду); $M_1^* = (\sum n_i u_i) / n$ – умовний момент першого порядку; $M_2^* = (\sum n_i u_i^2) / n$ – умовний момент другого порядку; $u_i = (x_i - C) / h$ – умовна варіанта.

Таблиця 2 – Рівновіддалені варіанти та частоти розподілення потужності P (сторона НН)

i	x_i^*	n_i	u_i	$n_i \cdot u_i$	$n_i \cdot u_i^2$
1	2,75	12	-2	-24	48
2	4,25	6	-1	-6	6
3	5,75	8	0	0	0
4	7,25	6	1	6	6
5	8,75	4	2	8	16
6	10,25	12	3	36	108
$\Sigma =$	-	48	-	24	184

При обчисленні вибіркової дисперсії для зменшення помилки, викликані у групуванням, зроблено поправку Шеппарда, а саме, з обчисленої дисперсії віднято $1/12$ квадрата довжини часткового інтервалу h .

Таким чином, з урахуванням поправки Шеппарда дисперсію обчислено за формулою

$$D_B' = D_B - (1/12)h^2. \quad (2)$$

Розрахунки вибіркової середньої, дисперсії та середньоквадратичного відхилення потужності P на стороні НН (10 кВ) наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Вибіркові середня та дисперсія потужності P (сторона НН)

n	h	C	$M1^*$	$M2^*$	\bar{x}_g^*	D_B	D_B'	σ
48	1,5	5,75	0,42	3,83	6,38	8,23	8,05	2,84

Для виключення промахів було застосовано правило 3σ [10], згідно якому випадкова величина виключається, якщо абсолютна величина її відхилення від математичного очікування (вибіркової середньої) переважає потроєне середньоквадратичне відхилення, тобто $x_i^* - \bar{x}_g^* > 3\sigma$.

Перевіримо гіпотезу про нормальне розподілення генеральної сукупності за критерієм Пірсона (критерій χ^2).

Для цього нормується випадкова величина X , тобто переходять до величини $Z = (X - \bar{x}^*) / \sigma$ і обчислюють кінці інтервалів (z_i, z_{i+1}) :

$$z_i = (x_i - \bar{x}^*) / \sigma, z_{i+1} = (x_{i+1} - \bar{x}^*) / \sigma, \quad (3)$$

причому найменше значення Z , тобто z_1 , вважають рівним $-\infty$, а найбільше, тобто z_6 вважають рівним ∞ (табл.4).

Обчислено теоретичні вірогідності p_i попадання X в інтервали (x_i, x_{i+1}) за рівністю $(\Phi(z) - \text{функція Лапласа})$

$$p_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i) \quad (4)$$

і знайдено теоретичні частоти $n_i' = np_i$ (табл. 5).

Як критерій перевірки нульової гіпотези приймається випадкова величина

$$\chi^2 = \sum (n_i - n_i')^2 / n_i' \quad (5)$$

Ясно, що чим менше різняться емпіричні та теоретичні частоти, тим менше величина критерію (5), і, отже, він до певної міри характеризує близькість емпіричного і теоретичного розподілів.

Для того щоб величина критерію приблизно мала розподіл χ^2 , теоретичні частоти $n_i' = np_i$ не повинні бути дуже малими. Для всіх інтервалів повинно бути виконуватись наступне співвідношення: $n_i' > 5$.

По таблиці критичних точок розподілу χ^2 , за рівнем значущості α і числа ступенів свободи $k = s - 1 - r$, де s – число часткових інтервалів вибірки, r – число параметрів розподілення ($s=6, r=2$) знайдено критичну точку $\chi_{кр}(\alpha; k)$.

$$\chi_{кр}(0,01;3) = 11,3 > 10,773$$

$$\chi_{кр}(0,025;3) = 9,4 < 10,773$$

Якщо $\chi_{набл}^2 < \chi_{кр}^2$ - немає підстав відкинути нульову гіпотезу. Якщо $\chi_{кр}^2 > \chi_{набл}^2$ - нульову гіпотезу відкидають.

Таким чином, висновок про нормальний закон розподілу навантаження на стороні НН (10 кВ) даної підстанції залежить від рівня значущості α .

Навантаження підстанції на стороні СН (35 кВ)

Середньозважений добовий графік навантаження на стороні СН (35 кВ) зображено на рис. 2.

Розподілення потужності P кожні півгодини ($\Sigma n_i = 48$) задаємо у вигляді послідовності варіант x_i і відповідних їм частот n_i (табл. 6).

Наступні розрахунки йдуть тією ж послідовністю, як і для сторони НН. Рівновіддалені варіанти та частоти розподілення потужності P (сторона СН) (табл. 7); вибіркові середня та дисперсія потужності P (сторона СН) (табл. 8); границі інтервалів (сторона СН) (табл. 9); теоретичні вірогідності p_i та теоретичні частоти n_i' (сторона СН) (табл. 10).

Таблиця 4 – Границі інтервалів (сторона НН)

i	Границі інтервалу		$x_i^* - \bar{x}_g^*$	$x_{i+1}^* - \bar{x}_g^*$	Границі інтервалу	
	x_i^*	x_{i+1}^*			$z_i = (x_i^* - \bar{x}_g^*) / \sigma$	$z_{i+1} = (x_{i+1}^* - \bar{x}_g^*) / \sigma$
1	2	3,5	—	-2,875	$-\infty$	-1,014
2	3,5	5	-2,875	-1,375	-1,014	-0,485
3	5	6,5	-1,375	0,125	-0,485	0,044
4	6,5	8	0,125	1,625	0,044	0,573
5	8	9,5	1,625	3,125	0,573	1,102
6	9,5	11	3,125	—	1,102	∞

Таблиця 5 – Теоретичні вірогідності p_i та теоретичні частоти n_i' (сторона НН)

i	$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$	$p_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$	$n_i' = np_i$	$(n_i - n_i')^2 / n_i'$
1	-0,5	-0,345	0,155	7,460	2,763
2	-0,345	-0,186	0,159	7,609	0,340
3	-0,186	0	0,204	9,775	0,322
4	0	0,217	0,199	9,555	1,322
5	0,217	0,365	0,148	7,107	1,358
6	0,365	0,5	0,135	6,495	4,666
$\Sigma =$			1	48	$\chi^2 = 10,773$

Таблиця 6 – Варіанти та частоти розподілення потужності P (сторона СН)

Варіанта, x_i	6	7	9	9,5	11,5	13,5	15	16	16,5	17	17,5	18
Частота, n_i	10	2	2	4	6	4	4	2	4	2	2	6

Таблиця 7 – Рівновіддалені варіанти та частоти розподілення потужності P (сторона СН)

i	x_i^*	n_i	u_i	$n_i \cdot u_i$	$n_i \cdot u_i^2$
1	7	12	-2	-24	48
2	9	6	-1	-6	6
3	11	6	0	0	0
4	13	4	1	4	4
5	15	8	2	16	32
6	17	12	3	36	108
$\Sigma=$		48		26	198

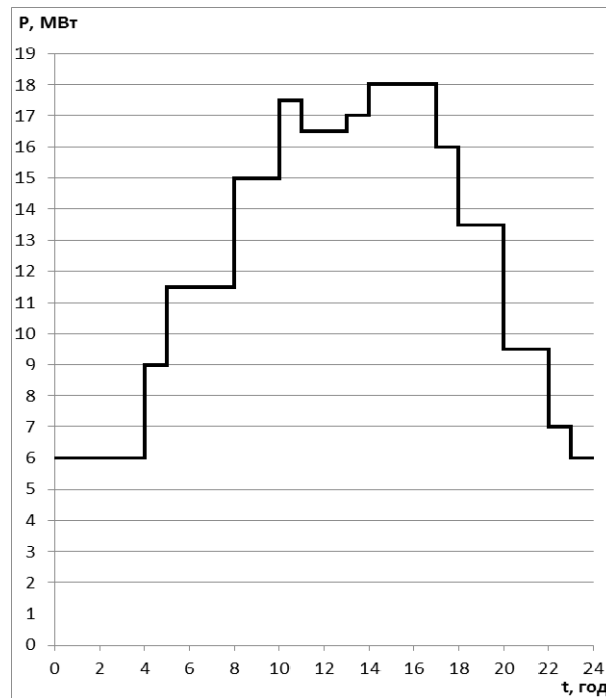


Рис. 2 – Графік навантаження на стороні СН (35 кВ)

Таблиця 8 – Вибіркові середня та дисперсія потужності P (сторона СН)

n	h	C	M1*	M2*	\bar{x}_g^*	D_B	D_B'	σ
48	2	11	0,54	4,13	12,08	15,33	14,99	3,87

Таблиця 9 – Границі інтервалів (сторона СН)

i	Границі інтервалу		$x_i^* - \bar{x}_g^*$	$x_{i+1}^* - \bar{x}_g^*$	Границі інтервалу	
	x_i^*	x_{i+1}^*			$z_i = (x_i^* - \bar{x}_g^*)/\sigma$	$z_{i+1} = (x_{i+1}^* - \bar{x}_g^*)/\sigma$
1	6	8	—	-4,083	$-\infty$	-1,055
2	8	10	-4,083	-2,083	-1,055	-0,538
3	10	12	-2,083	-0,083	-0,538	-0,022
4	12	14	-0,083	1,9167	-0,022	0,495
5	14	16	1,9167	3,9167	0,495	1,012
6	16	18	3,9167	—	1,012	∞

Таблиця 10 – Теоретичні вірогідності p_i та теоретичні частоти n_i' (сторона СН)

i	$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$	$p_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$	$n_i' = np_i$	$(n_i - n_i')^2 / n_i'$
1	-0,5	-0,354	0,146	6,999079	3,573
2	-0,354	-0,205	0,149	7,174125	0,192
3	-0,205	-0,009	0,196	9,414706	1,239
4	-0,009	0,190	0,198	9,517615	3,199
5	0,190	0,344	0,154	7,411973	0,047
6	0,344	0,5	0,156	7,482501	2,727
$\Sigma=$			1	48	10,977

$$\chi_{кр} (0,01;3) = 11,3 > 10,977$$

$$\chi_{кр} (0,025;3) = 9,4 < 10,977$$

Таким чином, як і на стороні НН (10 кВ), висновок про нормальний закон розподілу навантаження на стороні СН (35 кВ) залежить від рівня значущості α .

Висновки

1. Запропоновано застосування методів математичної статистики для аналізу навантаження трансформаторів підстанцій.

2. Показано, що навантаження на трансформаторну підстанцію може бути як нормально розподіленим, так і близьким до нормального закону розподілення.

3. Для більш детального дослідження роботи підстанції необхідно збільшити число добових спостережень ($\sum n_i > 48$).

4. Застосування середнього навантаження трансформаторів замість статистичного може привести до суттєвих помилок при визначенні прогнозованих комерційних втрат електричної енергії в трансформаторах.

5. Запропонований підхід дозволяє автоматизувати визначення втрат електричної енергії та оптимізувати режим її роботи.

Список літератури:

1. Овчаренко, А. С. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Проектирование и расчет [Текст] / А. С. Овчаренко, М. Л. Рабинович, В. И. Мозырский, Д. И. Розинский. – К.: Техніка, 1985. – 279 с.
2. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций [Текст]: учебник / Б. Н. Неклепаев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 602 с.
3. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций [Текст]: учебник / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
4. Липкин, Б. Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок [Текст]: учебник / Б. Ю. Липкин. – М.: Высшая школа, 1990. – 366 с.
5. Воротицкий, В. Э. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем [Текст] / В. Э. Воротицкий, Ю. С. Железко, В. Н. Казанцев и др.; под ред. В. Н. Казанцева. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.

6. Левчук, А. П. Аппроксимация графика нагрузки распределительной сети в соответствии с нормальным законом распределения [Текст] / А. П. Левчук // Проблемы общей энергетики. – 2002. – № 7. – С. 57–59.
7. Юрко, И. В. Статистический анализ эксплуатационной нагрузки на центробежный компрессор [Текст] / И. В. Юрко // Вестник Сумского государственного университета. Серия: «Технические науки». – 2012. – № 2. – С. 72–78.
8. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: учеб. пос. / В. Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.
9. Кремер, Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / Н. Ш. Кремер. – М.: Высшая школа, 2004. – 573 с.
10. Венцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения [Текст] / Е. С. Венцель. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.

Bibliography (transliterated):

1. Ovcharenko, A. S., Rabinovich, M. L., Mozyrskiy, V. I., Rozinskiy, D. I. (1985). Spravochnik po elertrosnabzheniyu promyshlennykh predpriyatiy: proektirovanie i raschet. Kyiv: Technika, 279.
2. Neklepaev, B. N. (1989). Elektricheskaya chast elektrostantsiy. Moscow: Energoatomizdat, 602.
3. Rozhkova, L. D., Kozulin, V. S. (1987). Elektrooborudovanie stantsiy I podstantsiy: uchebnik dlya tekhnikumov. Moscow: Energoatomizdat, 648.
4. Lipkin, B. U. (1990). Elertrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatiy i ustanovok: uchebnik dlya uchashchichsya elektrotechn. Moscow: Vysshaja shkola, 366.
5. Vorotnizkiy, V. E., Zhelezko, Y. S., Kazanzev, V. N. et al. (1983). Poteri elektroenergii v elektricheskikh setyakh energosistem. Moscow: Energoatomizdat, 368.
6. Levchuk, A. P. (2002). Aproksimatsiya grafika nagruzki raspredelitelnoy seti v sootvetstvii s normalnym zakonom raspredeleniya. Problemy zagalnoyi energetyky, 7, 57–59.
7. Yurko, I. V. (2012). Statisticheskyy analiz expluatatsionnoy nagruzki na tsentrobezhnyy compressor. Vestnik Sumskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: «Tehnichskie nauki», 2, 72–78.
8. Gmurman, V. E. (2003). Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika. Moscow: Vysshaja shkola, 479.
9. Kremer, N. Sh. (2004). Teoriya veroyatnostey I matematicheskaya statistika. Moscow: Vysshaja shkola, 573.
10. Ventzel, E. S. (2000). Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya. Moscow: Vysshaja shkola, 480.

Надійшла (received) 21.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Статистичний аналіз графіків навантаження трансформаторної підстанції/ О. С. Мільотіна, С. А. Левченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 48–53. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Статистический анализ графиков нагрузки трансформаторной подстанции/ О. С. Мильотина, С. А. Левченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 48–53. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Statistical analysis of load graph of transformer substation/ O. Milyutina, S. Levchenko // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P. 48–53. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мільотіна Ольга Сергіївна – магістрант, Запорізька державна інженерна академія, кафедра «Електротехніка та енергоефективність»; пр. Соборний, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006; e-mail: milola555@gmail.com.

Мильотина Ольга Сергеевна – магістрант, Запорожская государственная инженерная академия, кафедра «Електротехніка и энергоэффективность»; пр. Соборный, 226, г. Запорожье, Украина, 69006; e-mail: milola555@gmail.com.

Milyutina Olga – magistrant, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Sobornyy, 226, Zaporizhzhya, Ukraine, 69006; tel.: 095 6496514; e-mail: milola555@gmail.com.

Левченко Сергій Андрійович – кандидат технічних наук, Запорізька державна інженерна академія, доцент кафедри «Електротехніка та енергоефективність»; пр. Соборний, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006; mail: levchenko_s@rambler.ru.

Левченко Сергей Андреевич – кандидат технических наук, Запорожская государственная инженерная академия, доцент кафедры «Электротехника и энергоэффективность»; пр. Соборный, 226, г. Запорожье, Украина, 69006; e-mail: levchenko_s@rambler.ru.

Levchenko Sergiy – candidate of technical sciences, associate professor, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Sobornyy, 226, Zaporizhzhya, Ukraine, 69006; e-mail: levchenko_s@rambler.ru.

УДК 621.396.4

Н. В. МОСКАЛЕЦ

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЫБОРОЧНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МАТРИЦЫ

Проводится оценка теоретической предельной разрешающей способности некоторых методов определения направления прихода сигнала, реализованных на основе выборочной корреляционной матрицы. Представлена сравнительная характеристика методов с оценкой достоинств, недостатков и присущих им ограничений. Расчет разрешающей способности методов проведен на основе различных значений параметров сигнально-помеховой обстановки. Полученные результаты имитационного моделирования разрешающей способности методов определения направления прихода сигналов могут быть использованы при выборе эффективного метода в задачах пространственно-временного доступа в соответствии с заданными параметрами сигнально-помеховой обстановки при определенных ограничениях.

Ключевые слова: направление прихода сигнала, корреляционная матрица, пространственно-временной доступ, сверхразрешение, антенная решетка

Проводиться оцінка теоретичної граничної роздільної здатності деяких методів визначення напрямку приходу сигналу, що реалізуються на основі вибіркової кореляційної матриці. Представлена порівняльна характеристика методів з оцінкою переваг, недоліків і властивих їм обмежень. Розрахунок роздільної здатності методів проведено на основі різних значень параметрів сигнально-завадової обстановки. Отримані результати імітаційного моделювання роздільної здатності методів визначення напрямку приходу сигналів можуть бути використані при виборі ефективного методу в задачах просторово-часового доступу відповідно до заданих параметрів сигнально-завадової обстановки при певних обмеженнях.

Ключові слова: напрям приходу сигналу, кореляційна матриця, просторово-часовий доступ, зверхроздільна здатність, антенна решітка

Six methods are considered in the analysis of the methods of angular superresolution of the signals: non-adaptive beamforming (Bartlett), Capon (MVDL), thermal noise (TNA), Borgiotti-Lagunas (B-L), maximal entropy (MEM) and multiple signal classification (MUSIC). The comparative characteristic of the methods with assessing their advantages disadvantages and limitations is given. Theoretical resolution of these methods is assessed in the article. Numerical evaluation of resolution ability of the methods of direction arrival of the signal are obtained based on the simulation of various scenarios of signal-to-noise ratio, taking into account the use of correlated and uncorrelated signals, a different number of antenna elements and the values of the signal / interference + noise ratio. These estimations show the ultimate theoretical accuracy of the methods and the potential for their use in problems of space-time access with set limits. The simulation results confirmed the statistical consistency of these methods of estimation of arrival direction angles of correlated and uncorrelated signals from subscriber stations for the space-time sampling in the output of the linear equidistant antenna array.

The present analysis and research results make it possible to select the most effective method for determining the arrival of signals in accordance with the given parameters of signal-to-noise ratio under restrictions.

Keywords: direction of arrival signal, correlation matrix, space-time access, superresolution, antenna array

Введение. В настоящее время в мире и в Украине существует дефицит использования частотного, временного и кодового ресурсов и остро ощущается необходимость в использовании дополнительных физических ресурсов, реализующих повышение эффективности использования радиочастотного ресурса, повышение пропускной способности каналов связи и увеличения продуктивности работы системы мобильной связи в целом [1–3]. В данном аспекте, перспективным является использование методов пространственно-временного доступа (ПВД) в системах мобильной связи [4].

Основной проблематикой в задачах ПВД с использованием адаптивных антенных решеток (АР) является задача определения направления прихода сигналов от мобильных абонентских станций (АС). Данная задача решается на основе различных методов: пеленгации с использованием равносигнальной зоны, оценок характеристик направленности АР, с релейским разрешением,

со сверхразрешением (СР) и др., обладающих различной степенью эффективности [5, 6].

Проблема определения направления прихода электромагнитной волны имеет как самостоятельное значение (пеленгование источников радиоизлучений), так и является составным компонентом более общих задач радиосвязи, радиолокации, навигации и др. [7]. Методы оценки направления прихода сигналов (DOA – Direction of arrival estimation) лежат в основе многих задач телекоммуникаций. Анализ данных методов с точки зрения их эффективности и реализуемости является в достаточной степени актуальной задачей при решении задач ПВД в системах мобильной связи.

Цель и задачи исследования. В рамках исследуемой проблематики, автором данной работы проводится оценка теоретической предельной разрешающей способности некоторых методов определения

© Н. В. Москалец. 2017

направления прихода сигнала, реализованных на основе выборочной корреляционной матрицы.

Для решения поставленной цели необходимо выполнение следующих задач:

- аналитическое представление алгоритмов с указанием возможных ограничений;
- разработка сценариев моделирования с учетом различных параметров сигнально-помеховой обстановки;
- численное моделирование разрешающей способности исследуемых алгоритмов на основе различных сценариев сигнально-помеховой обстановки.

Анализ литературных данных. При реализации методов корреляционных методов в пространственной области удается определять положение спектральных составляющих (направлений прихода), анализируемых (принимаемых) сигналов от источников радиоизлучения (мобильных станций). В работах Джонсона, Кейпона и др. [8, 9], на основе методов нелинейного спектрального анализа были разработаны алгоритмы определения направления прихода сигналов с использова-

нием выборочной корреляционной матрицы, разнесенных на сколь угодно малое расстояние.

Имеется большое число таких алгоритмов к числу которых относятся [5]:

1) методы, основанные на определении положений локальных максимумов псевдоспектра $D(\theta)$ на сканирование по пространству: Кейпона, “теплового шума”, Борджоти-Лагунаса;

2) методы, основанные на разложении пространственной корреляционной матрицы R по собственным векторам V_k и k – собственным значениям – метод MUSIC, EV (eigenvector);

3) методы, основанные на разделении сигнального и шумового пространств. К числу таких относятся методы ROOT-MUSIC и ESPRIT, ориентированные на использование линейных эквивалентных AP.

Материалы и методы исследования. В табл. 1 представлена обобщенная сравнительная характеристика наиболее популярных корреляционных методов оценки направления прихода сигналов.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика корреляционных методов оценки направления прихода сигналов

№	Метод оценки направления прихода сигналов	Достоинства	Ограничения и недостатки метода
1	2	3	4
1	<p>Классический метод формирования луча (метод Бартлетта или метод задержек – расширение спектрального анализа по Фурье), [10]:</p> $D_F(\theta) = \frac{\vec{a}(\theta)^H R_{xx} \vec{a}(\theta)}{\vec{a}^H(\theta) \vec{a}(\theta)},$ <p>$\vec{v}(\theta)$ – вектор отклика AP, т.е. фактически столбцы весовых коэффициентов для всех углов прихода сигналов.</p>	Простая реализация	<p>Метод основан на сканировании лучом AP в пространстве и определении максимума уровня излучения.</p> <p>Низкая разрешающая способность, определяемая шириной основного луча AP и уровней боковых лепестков.</p> <p>Разрешающая способность зависит от ширины основного луча AP и связана с ограничением релейского разрешения.</p> <p>Недостаток может быть смягчен увеличением количества элементов AP.</p> <p>Увеличение соотношения сигнал/шум или увеличение времени наблюдения не изменяют разрешения.</p>
2	<p>Алгоритмы линейного предсказания (алгоритм авторегрессионной модели или метод максимума энтропии (ММЭ)), [11]:</p> $D_{ММЭ}(\theta) = R_{11}^{-1} \left \vec{a}(\theta)^H R_1^{-1} \right ^2.$ <p>Применимость к анализу временных рядов (временного спектра). Ограничение использования к оценке пространственного спектра линейная эквидистантная решетка с равномерным амплитудным распределением.</p>	Возможность применения в AP с нерегулярной структурой размещения АЭ.	<p>Сложность корректной оценки необходимого порядка авторегрессионной модели – длины фильтра (длины вектора R_{11}^{-1}).</p> <p>При малой длине фильтра спектр получается сглаженным, но с плохим разрешением, а сверхбольшая длина фильтра предсказания, при хорошем разрешении, приводит к сильно флуктуирующему спектру – высоким уровнем боковых лепестков случайного характера.</p>
3	<p>Метод Кейпона (Minimum variance method (MVDL) – метод минимального отклонения или наименьшей вариации (дисперсии)), [9]:</p> $D_c(\theta) = 1 / \left(\vec{a}(\theta)^H R^{-1} \vec{a}(\theta) \right)$	<p>Применим к AP любой конфигурации (одно-, двух-, трехмерным, регулярным и нерегулярным AP)</p> <p>Повышение разрешающей способности в сравнении с методом Фурье.</p>	<p>Необходимость в большом количестве обучающих выборок (вдвое больше, чем число элементов решетки), что увеличивает объем вычислительных операций. Слабая эффективность метода при малых объемах выборки и исходных данных. Невозможность пеленгации сигналов сильно коррелированных источников. Количество элементов AP не накладывает ограничений на разрешающую способность. Разрешающая способность растет неограниченно при увеличении соотношения сигнал/шум и объема выборки.</p>

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
4	<p>Алгоритм теплового шума (Thermal Noise Algorithm (TNA)), [12]:</p> $D_{TNA}(\theta) = 1/(\bar{a}(\theta)^H R^{-2} \bar{a}(\theta)).$ <p>При использовании высоких степеней обратной корреляционной матрицы получаем алгоритм высокого разрешения:</p> $D(\theta) = 1/(\bar{a}(\theta)^H R^{-k} \bar{a}(\theta)), k > 2$	<p>При идеальных условиях (без учета технических характеристик и погрешностей аппаратуры) возрастает разрешающая способность по сравнению с методом Кейпона.</p>	<p>С ростом степени k реальная разрешающая способность остается неизменной, но существенно возрастает вычислительная сложность.</p>
5	<p>Метод Борджотти-Лагунаса, [13]:</p> $D_{БЛ}(\theta) = \frac{D_C}{D_{TNA}} = \frac{\bar{a}(\theta)^H R^{-1} \bar{a}(\theta)}{\bar{a}(\theta)^H R^{-2} \bar{a}(\theta)}.$	<p>Относится к группе алгоритмов на основе оценки параметров теплового шума</p>	<p>Нормировка отношения сигнал/шум на выходе АР мощностью теплового шума</p>
6	<p>Метод MUSIC (Multiple signal classification – метод многосигнальной классификации), [14]:</p> $D_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{\bar{a}(\theta)^H \left(\sum_{k=M+1}^R Q_k \cdot Q_k^H \right) \bar{a}(\theta)},$ <p>где Q_k – собственные векторы корреляционной матрицы R ; M -число источников излучения.</p>	<p>Большая разрешающая способность в сравнении с методом Кейпона. Метод эффективен, когда соотношение сигнал/шум и количество элементов АР стремятся к бесконечности. Применим к АР любой конфигурации.</p>	<p>Метод MUSIC является предельным случаем Кейпона при стремящемся к бесконечности отношении сигнал/шум. Необходимость предварительной оценки размерности сигнального и шумового подпространств. Критичен к неопределенностям параметров математической модели и к величине соотношения сигнал/шум, когда источники близкорасположены. Большая вычислительная сложность метода, определяемая вычислением сингулярного разложения ковариационной матрицы выходов элементов АР. Метод не дает результатов для коррелированных источников сигналов. Root-MUSIC позволяет осуществлять пеленгацию когерентных сигналов.</p>

На основе анализа табл. 1 представляет интерес получения оценок разрешающей способности представленных корреляционных методов в зависимости от числа приходящих сигналов с различных направлений, значения отношения сигнал/(помеха+шум) (SNR), корреляции сигналов и их количества, числа элементов антенной решетки.

Исследование корреляционных методов оценки направления прихода сигналов. Проведем исследование корреляционных методов оценки направления прихода различного числа сигналов для 4-х, 8-ми, 10-ти и 50-ти элементной эквидистантной линейной антенной решетки на основе имитационного моделирования в пакете математического моделирования MatLab13.x. В основе анализа корреляционных методов рассматривались методы: неадаптивного формирования луча (НФЛ), Кейпона, теплового шума, Борджотти-Лагунаса, максимальной энтропии (ММЭ) и многосигнальной классификации (MUSIC).

Получение оценок разрешающей способности данных методов по предложенной методике основывается на моделировании 5-ти сценариев сигнально-помеховой обстановки при вариации различных параметров. С целью получения адекватных количественных и качественных оценок теоретической предельной точности методов использовались значения параметров близкие к границе устойчивости методов, представленные в табл. 2.

Целью задачи оценки теоретической предельной точности корреляционных методов сигналов является

определение угловых координат источников излучения при наблюдении M -выборки данных с выходов антенных элементов эквидистантной линейной АР и сравнительный анализ методов по критерию разрешающей способности.

В рамках данного исследования используем ряд допущений:

- известно число оцениваемых сигналов (это позволяет выбрать число обучающих выборок равным оптимальному и тем самым избежать дополнительных потерь).

- число оцениваемых сигналов не превышает числа антенных элементов (в противном случае получаем вырожденные оценки);

- сигналы являются неизвестными детерминированными функциями (что является характерным для систем связи);

- набор из N любых направляющих векторов является линейно независимым (решетчатое множество АР является однозначным, только в случае если любое множество однозначных направляющих векторов N , формирующих это решетчатое множество в многообразной области образует линейно независимое множество, при $N \leq M$, где M количество АЭ) [10];

- в полосе обработки в качестве шума используется гауссовый белый шум, некоррелированный во всех пространственных каналах с одинаковой мощностью (дополнительная оценка параметров шума существенно усложняет задачу оценивания направления прихода сигналов).

В случае непринятия в расчет используемых допущений, аналитическая модель оценки вектора АР значительно усложняется в связи с увеличением количества параметров определяющих

априорную информацию о наблюдаемых процессах АР. При этом существенно возрастает вычислительная сложность, что делает модель данных практически нереализуемой.

Таблица 2 – Исходные данные для реализации сценариев моделирования методов оценки направления прихода сигналов

Параметр	Значение							
Сценарий моделирования 1								
Количество анализируемых сигналов	4							
Количество антенных элементов АР	4							
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0;20							
Фаза сигнала,	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	π				
Углы прихода сигналов, β	-20°	-10°	0°	30°				
Сценарий моделирования 2								
Количество анализируемых сигналов	4							
Количество антенных элементов АР	4							
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0;20							
Фаза сигнала,	$\pi/4$							
Углы прихода сигналов, β	-20°	-10°	0°	30°				
Сценарий моделирования 3								
Количество анализируемых сигналов	4							
Количество антенных элементов АР	50							
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0;20							
Фаза сигнала,	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	π				
Углы прихода сигналов, β	-20°	-10°	0°	30°				
Сценарий моделирования 4								
Количество анализируемых сигналов	4							
Количество антенных элементов АР	4	10	50	100				
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0							
Фаза сигнала,	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	π				
Углы прихода сигналов, β	-20°	-10°	0°	30°				
Сценарий моделирования 5								
Количество анализируемых сигналов	8							
Количество антенных элементов АР	10;50							
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0							
Фаза сигнала,	$\pi/8$	$\pi/4$	$3\pi/8$	$\pi/2$	$5\pi/8$	$3\pi/4$	$7\pi/8$	π
Углы прихода сигналов, β	-15°	-35°	-55°	-80°	15°	35°	55°	80°

Результаты моделирования оценок разрешающей способности корреляционных методов.

Сценарий 1. Рассматриваются некоррелированные сигналы от 4-х точечных источников излучения с углами прихода: $-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 30^\circ$ и фазой: $\pi/4, \pi/3, \pi/2$ и π (табл. 2). Количество элементов

АР – 10, расстояние между АЭ – $d = \lambda/2$. Соотношение сигнал/шум: 0; 20 дБ. Из анализа графиков рис. 1, а следует что неадаптивный метод формирования луча (по Фурье) не дает возможности пространственного разделения сигналов, как можно видеть 3 из 4-х сигналов находятся в одном элементе разрешения.

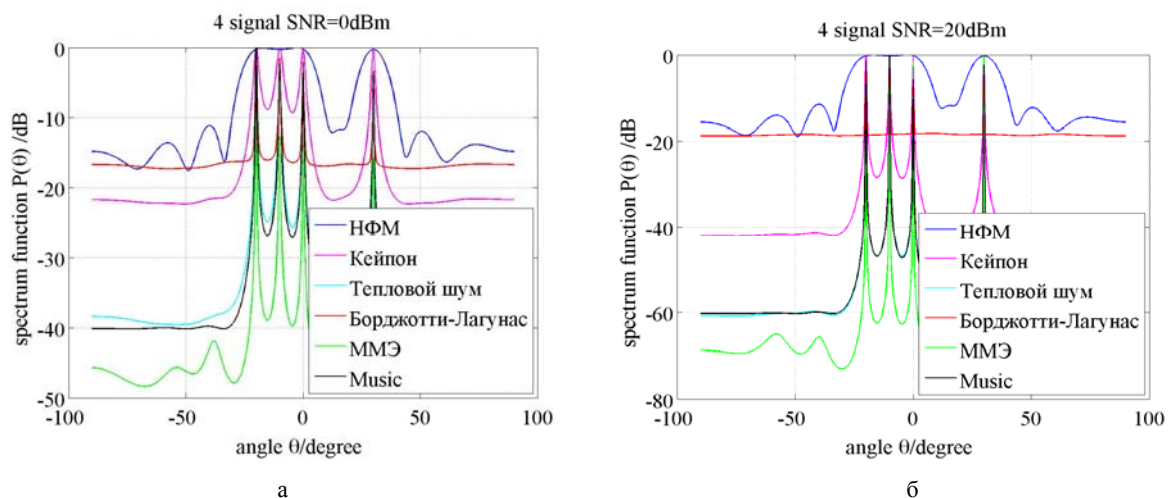


Рис. 1 – Графики зависимости мощности излучения от угла прихода некоррелированных сигналов корреляционных методов: а – SNR= 0 дБ; б – SNR= 20 дБ

Остальные методы обладают более высокими характеристиками разрешения сигналов и позволяют оценивать углы прихода данных сигналов с различной точностью. Как можно видеть наиболее высокоточным методом является метод ММЭ, вместе с тем в спектре присутствуют ложные пики. Из рассматриваемого набора методов, только методы MUSIC и ММЭ обеспечивают получение максимума мощностей прихода сигналов с рассматриваемых направлений. С увеличением SNR до 20 дБ (рис. 1, б) значительно повышается разрешающая способность методов за ис-

ключением методов Борджотти-Лагунаса и классического НФМ.

2. **Сценарий 2.** Данный сценарий предусматривает прием 4-х коррелированных сигналов с фазой $\pi/4$. Как видно из полученных результатов представленных на рис. 2, а, б практически все методы не справляются с задачей оценки пространственного разделения источников излучения при соотношении SNR 0 дБ. С увеличением соотношения SNR до 20 дБ наилучший результат обеспечивает метод ММЭ.

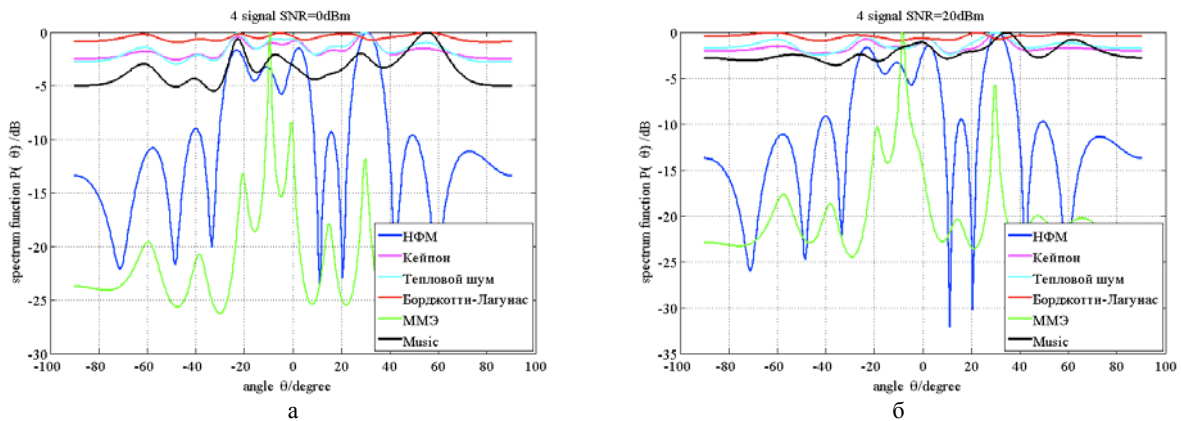


Рис. 2 – Графики зависимости мощности излучения от угла прихода коррелированных сигналов корреляционных методов: а – $SNR = 0$ дБ; б – $SNR = 20$ дБ

Сценарий 3. Рассмотрим вариант использования АР с количеством элементов 50 (рис. 3, а). Как можно видеть из анализа полученных зависимостей метод ММЭ при оценке пространственного излучения источников дает ложные пики, что в целом ухудшает

его характеристики независимо от соотношения SNR (рис. 3, б). Наибольшей точностью характеризуются методы MUSIC и Кейпона. Уменьшение и увеличение соотношения SNR заметно не сказывается на разрешающей способности методов.

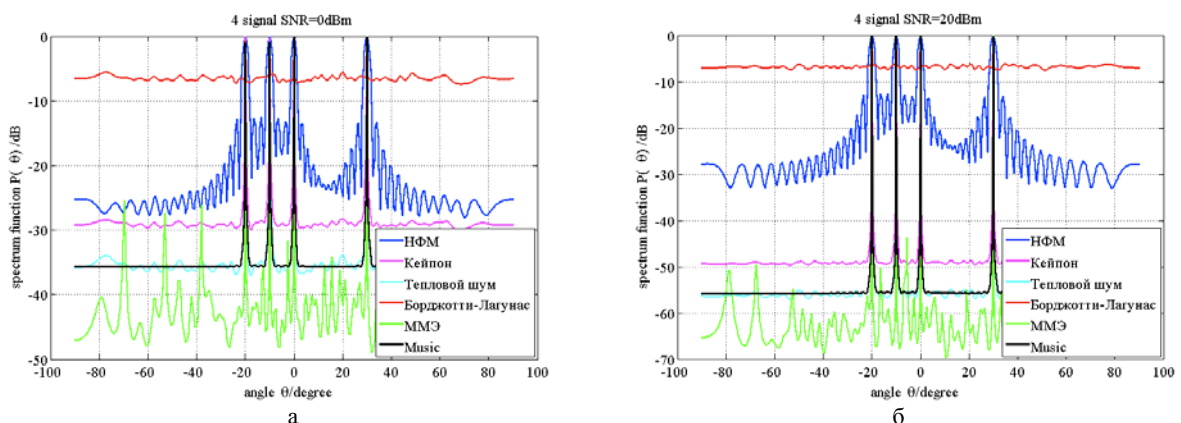


Рис. 3 – Графики зависимости мощности излучения от угла прихода некоррелированных сигналов корреляционных методов использования с количеством элементов АР $N = 50$: а – $SNR = 0$ дБ; б – $SNR = 20$ дБ

Сценарий 4. Проанализируем разрешающую способность корреляционных методов при использовании АР с количеством АЭ: 4;10;50;100 при $SNR = 0$ дБ (рис. 4, а–е). Характер зависимостей пока-

зывает, что разрешающая способность оценки направления прихода сигналов для каждого из рассматриваемых методов существенно может быть увеличена при увеличении количества АЭ.

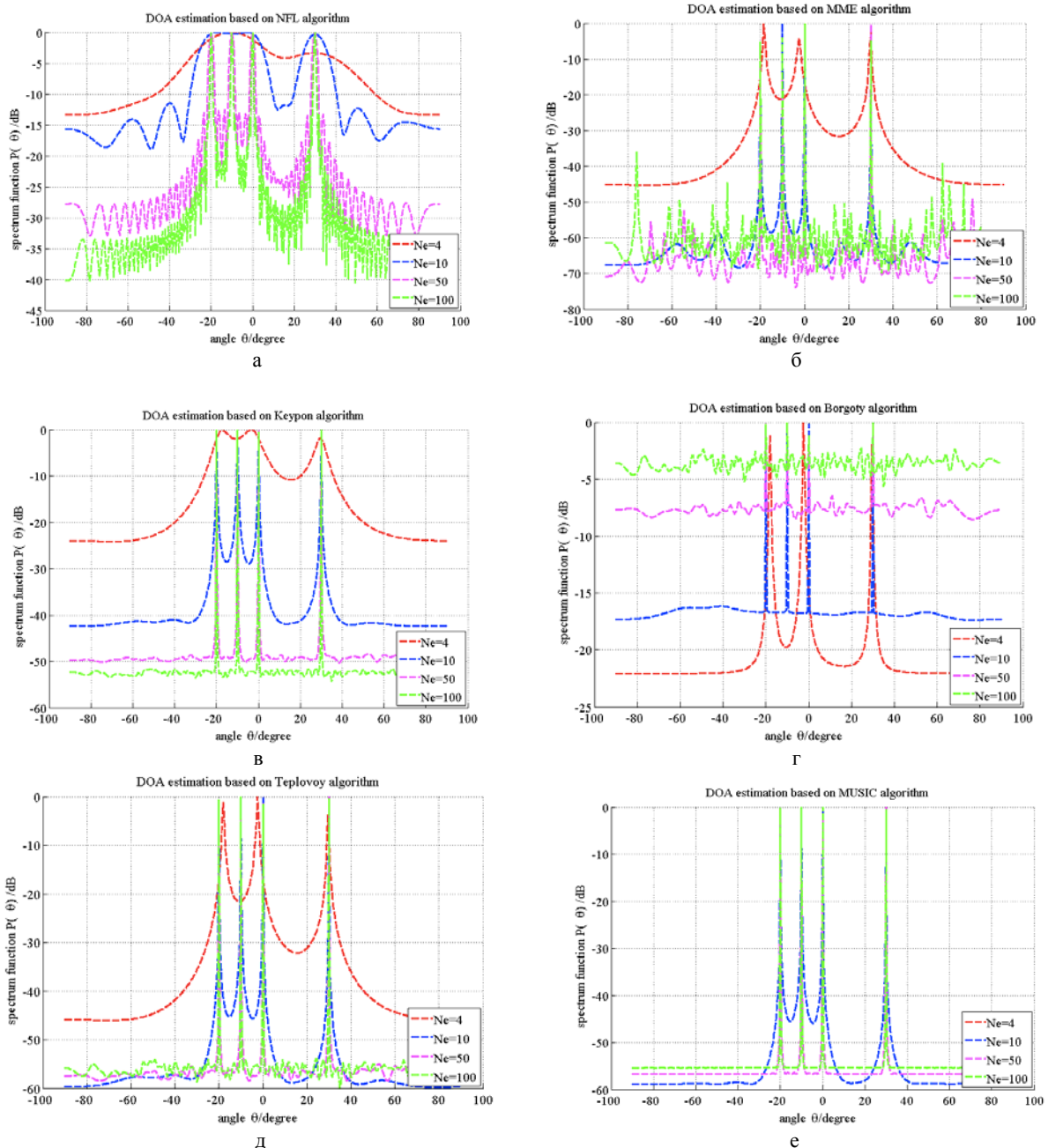


Рис. 4 – Графики зависимости мощности излучения от угла прихода некоорелированных сигналов корреляционных методов с количеством элементов АР а–е: $N = 4; 10; 50; 100$ и $\text{SNR} = 0$ дБ

5. Сценарий 5. На рис. 5, а–в представлены результаты оценок направления прихода 8-ми сигналов с различными фазами и углами прихода при использовании АР с 10-ю и 50-ю АЭ (табл. 2). Как можно видеть из характера зависимостей представленных на рис. 5, а, б, ключевым параметром влияющим на разрешающую способность является значение соотношения числа оцениваемых сигналов и числа АЭ.

Из анализа зависимостей на рис. 5, а можно видеть, что при количестве антенных элементов равным 10 корреляционная матрица вырождается и ни один из методов не обеспечивает пространственное разделение сигналов, поскольку количество сигналов превышает сумму среднего количества антенных элемен-

тов и ранга корреляционной матрицы ($N > \frac{N + \text{rank}\{R_{xx}\}}{2}$) [12].

Несколько улучшить результат пространственного оценивания прихода сигналов получается путем увеличения числа АЭ до 50 и как можно видеть из рис. 5, б стабильно высокий результат при значениях $\text{SNR} = 0$ дБ дает метод MUSIC.

Стоит отметить, что полученные результаты оценок пространственного разрешения рассматриваемых методов являются потенциально достижимыми в рамках указанных допущений методики анализа.

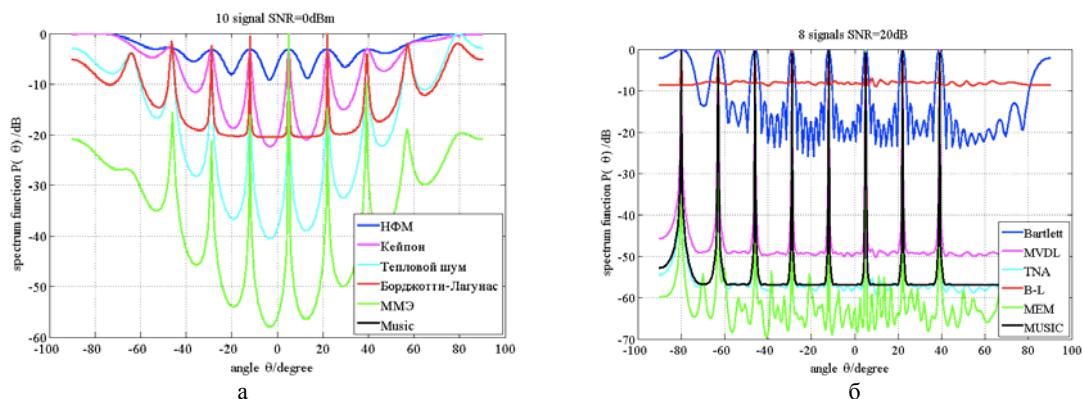


Рис. 5 – Графики зависимости мощности излучения от угла прихода некоррелированных сигналов корреляционных методов при SNR=0 дБ использования с количеством элементов АР: а – $N = 10$; б – $N = 50$

Выводы. Анализ полученных результатов проведенного имитационного моделирования по оценке пространственного разрешения углов прихода сигналов от 4-х источников излучения показал:

1. Классический неадаптивный метод формирования луча является самым простым в реализации на практике, однако имеет существенный недостаток, связанный с ограничением релейского разрешения [9]. Как показывает анализ зависимостей на рис. 4, а данный недостаток может быть смягчен только увеличением количества АЭ. Улучшение соотношения сигнал/шум или увеличение времени наблюдения не изменяют разрешения (рис. 1, а, б).

2. Оценка пространственного разрешения источников по методу Кэйпона превосходит классический метод формирования луча, поскольку он использует каждую доступную степень свободы для концентрации полученной энергии вдоль направления интересующего пеленга. Существующая при этом минимизация мощности может быть интерпретирована как ограничение некоторой способностью подавления шума для более сфокусированного формирования нуля в направлениях присутствия других источников сигнала. При этом уменьшается спектральное рассеивание с близко расположенных источников, хотя разрешающая способность формирования ДН антенны по Кэйпону зависит от соотношения сигнал-шум (рис. 1, а, б) и от апертуры АС (рис. 4, в).

3. Среди непараметрических методов непрерывного анализа: “теплого шума”, Борджотти-Лагунаса метод Кейпона обладает самой низкой разрешающей способностью (рис. 1, а). Вместе с тем, при увеличении числа АЭ, что увеличивает конечную длину выборки, на фоне случайных амплитудно-фазовых ошибок в каналах приема методы Борджотти-Лагунаса и “теплого шума” могут терять свое преимущество над алгоритмом Кейпона (рис. 3, б).

4. Метод многосигнальной классификации MUSIC является предельным случаем метода Кейпона при соотношении сигнал/шум стремящемся к бесконечности, что согласуется с более высокой разрешающей способностью MUSIC по сравнению с алгоритмом Кейпона. Анализируя приведенные графики рис. 1, а, б, приходим к выводу, что метод MUSIC способен обеспечить разрешение независимо от соотношения сигнал-шум, приходящих сигналов при до-

статочном угловом разнесении источников. Вместе с тем из анализа работ [6, 9, 11] известно, что метод MUSIC критичен к неопределенностям параметров математической модели, а также к величине соотношения сигнал/шум в случае, когда источники имеют близкие по значению пеленги. Как видно из графиков, представленных на рис. 2, а, б метод MUSIC предполагает некоррелированность сигналов источников между собой, что в реальных условиях многолучевого излучения далеко не всегда выполнимо. Если достаточно велико значение отношение сигнал-шум и время сбора данных, а модель сигнала достаточно точная, метод MUSIC дает статистически состоятельные оценки, превосходящие оценки других методов рассмотренных в работе (рис. 1, а, б).

5. Результаты имитационного моделирования подтверждают статистическую состоятельность рассматриваемых методов оценивания углов прихода сигналов от абонентских станций. Оценка осуществлялась на основе пространственно-временной выборки на выходе 8-ми элементной линейной эквидистантной антенной решетки, с учетом взаимной корреляции сигналов.

6. В идеальных условиях данные корреляционных методы позволяют получать сколь угодно точные значения направления прихода сигналов. Вместе с тем предполагается, что для успешного решения задачи сверхразрешения требуется более высокое качество приема (отношение сигнал/шум). При этом будут точно известны геометрические и электродинамические параметры АР, точные координаты установки антенных элементов (АЭ) с учетом выполнения условия $d < \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{\max}}$, где d – расстояние между соседними АЭ, параметры самих разрешаемых сигналов.

7. На основании проведенного исследования, становится понятным, что глобально оптимального метода на основе пространственно-временной выборки не существует. Привлекательность тех или иных методов в большей степени зависит от наличия и объема априорной информации об исследуемых процессах, от способа оценки результатов векторов отклика АР и способа её использования применительно к действующей сигнально-помеховой обстановке, конфигурации АР и её геометрических параметров и др.

Кроме того, существуют определенные отрицательные исходы решений – возникновение ложных отметок об обнаружении несуществующих источников излучений, смещения в оценках направления прихода сигналов.

Проведенный сравнительный анализ показал, что проблема использования корреляционных методов в задачах пространственно-временного доступа остается актуальной для исследований, поскольку остаются недостаточно изученными вопросы, связанные с получением объективных оценок предельной точности углов прихода сигналов в зависимости от ряда отдельных параметров действующей сигнально-помеховой обстановки.

Результаты моделирования методов с получением численных оценок разрешающей способности показали, что разрешающая способность данных методов позволяет их использование в задачах пространственно-временного доступа при строго ограниченных условиях.

Список литературы:

1. Mobile and wireless communications Enablers for the 2020 Information Society. EU FP7 ICT-317669-METIS [Electronic resource]. – Available at: https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_project_presentation_public.pdf
2. Hardouin, E. 5G: an operator's perspective [Text] / E. Hardouin // Orange Labs. LTE World Summit, 2013. – P. 10.
3. Авдєєнко, К. Л. Ключові принципи спільного доступу до радіочастотного ресурсу на ліцензійній основі (LSA) [Текст] / К. Л. Авдєєнко, І. О. Гепко, В. Ф. Корсак // Зв'язок. – 2016. – № 6. – С. 49–53.
4. Поповский, В. В. Эффективное использование всего физического пространства сигналов в мобильных телекоммуникационных системах [Текст]: тезисы док. / В. В. Поповский, Ю. А. Василенко // Межрегиональный форум МСЭ. Национальная комиссия, осуществляющая государственное регулирование в сфере связи и информатизации (НКРСИ), 2012. – С. 42–45.
5. Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation [Text] / ed.: T. E. Tuncer B. Friedlander. – Academic Press, 2009. – 456 p. doi: [10.1016/c2009-0-19135-3](https://doi.org/10.1016/c2009-0-19135-3)
6. Chandran, S. Advances in Direction-of-Arrival Estimation [Text] / S. Chandran. – Artech House, 2006. – 496 p.
7. New Directions in Wireless Communications Research [Text] / ed.: V. Tarokh. – Springer US, 2009. – 483. doi: [10.1007/978-1-4419-0673-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0673-1)
8. Johnson, R. L. Comparison of Superresolution Algorithms for Radio Direction Finding [Text] / R. L. Johnson, G. E. Miner // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1986. – Vol. AES-22, № 4. – P. 432–442. doi: [10.1109/taes.1986.310779](https://doi.org/10.1109/taes.1986.310779)
9. Capon, J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis [Text] / J. Capon // Proceedings of the IEEE. – 1969. – Vol. 57, № 8. – P. 1408–1418. doi: [10.1109/proc.1969.7278](https://doi.org/10.1109/proc.1969.7278)
10. Monzingo, R. A. Adaptive antenna arrays: Introduction to the theory [Text] / R. A. Monzingo, T. W. Miller. – Moscow: Radio and Communications, 1986. – 448 p.
11. Nickel, U. Angular superresolution with phased array radar: a review of algorithms and operational constraints [Text] / U. Nickel // IEE Proceedings F Communications, Radar and Signal Processing. – 1987. – Vol. 134, № (1). – P. 53–59. doi: [10.1049/ip-f-1.1987.0010](https://doi.org/10.1049/ip-f-1.1987.0010)
12. Gabriel, W. F. (1980). Spectral analysis and adaptive array super-resolution techniques [Text] / W. F. Gabriel // Proceedings of the IEEE. – Vol. 68, № 6. – P. 654–666. doi: [10.1109/proc.1980.11719](https://doi.org/10.1109/proc.1980.11719)
13. Borgiotti, G. Superresolution of uncorrelated interference sources by using adaptive array techniques [Text] / G. Borgiotti, L. Kaplan // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1979. – Vol. 27 № 6. – P. 842–845. doi: [10.1109/tap.1979.1142176](https://doi.org/10.1109/tap.1979.1142176)
14. Lavate, T. B. Performance Analysis of MUSIC and ESPRIT DOA Estimation Algorithms for Adaptive Array Smart Antenna in Mobile Communication [Text] / T. B. Lavate, V. K. Kokate, A. M. Sapkal // 2010 Second International Conference on Computer and Network Technology, 2010. – P. 308–311. doi: [10.1109/iccnt.2010.45](https://doi.org/10.1109/iccnt.2010.45)

Bibliography (transliterated):

1. Mobile and wireless communications Enablers for the 2020 Information Society. EU FP7 ICT-317669-METIS. Available at: https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_project_presentation_public.pdf
2. Hardouin, E. (2013). 5G: an operator's perspective. Orange Labs. LTE World Summit, 10.
3. Avdeenko, K. L., Gepko, I. O., Korsak, V. F. (2016). Klyuchovi printsiipi spilnogo dostupu do radiochastotnogo resursu na litsenziyniy osnovi (LSA). Zv'yazok, 6, 49–53.
4. Popovskij, V. V., Vasilenko, Ju. A. (2012). Jeffektivnoe ispol'zovanie vsego fizicheskogo prostranstva signalov v mobil'nyh telekommunikacionnyh sistemah. Mezhtseional'nyj forum MSJe. Nacional'naja komissija, osushhestvlyajushhaja gosudarstvennoe regulirovanie v sfere svyazi i informatizacii (NKRSI), 42–45.
5. Tuncer T. E., Friedlander B. (ed.) (2009). Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation, Academic Press, 456. doi: [10.1016/c2009-0-19135-3](https://doi.org/10.1016/c2009-0-19135-3)
6. Chandran, S. (2006). Advances in Direction-of-Arrival Estimation. Artech House, 496.
7. Tarokh, V. (ed.) (2009). New Directions in Wireless Communications Research. Springer US, 483. doi: [10.1007/978-1-4419-0673-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0673-1)
8. Johnson, R. L., Miner, G. E. (1986). Comparison of Superresolution Algorithms for Radio Direction Finding. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-22 (4), 432–442. doi: [10.1109/taes.1986.310779](https://doi.org/10.1109/taes.1986.310779)
9. Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. Proceedings of the IEEE, 57 (8), 1408–1418. doi: [10.1109/proc.1969.7278](https://doi.org/10.1109/proc.1969.7278)
10. Monzingo, R. A., Miller, T. W. (1986). Adaptive antenna arrays: Introduction to the theory. Moscow: Radio and Communications, 448.
11. Nickel, U. (1987). Angular superresolution with phased array radar: a review of algorithms and operational constraints. IEE Proceedings F Communications, Radar and Signal Processing, 134 (1), 53–59. doi: [10.1049/ip-f-1.1987.0010](https://doi.org/10.1049/ip-f-1.1987.0010)
12. Gabriel, W. F. (1980). Spectral analysis and adaptive array super-resolution techniques. Proceedings of the IEEE, 68 (6), 654–666. doi: [10.1109/proc.1980.11719](https://doi.org/10.1109/proc.1980.11719)
13. Borgiotti, G., Kaplan, L. (1979). Superresolution of uncorrelated interference sources by using adaptive array techniques. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 27 (6), 842–845. doi: [10.1109/tap.1979.1142176](https://doi.org/10.1109/tap.1979.1142176)
14. Lavate, T. B., Kokate, V. K., Sapkal, A. M. (2010). Performance Analysis of MUSIC and ESPRIT DOA Estimation Algorithms for Adaptive Array Smart Antenna in Mobile Communication. 2010 Second International Conference on Computer and Network Technology, 308–311. doi: [10.1109/iccnt.2010.45](https://doi.org/10.1109/iccnt.2010.45)

Поступила (received) 06.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Порівняльна оцінка методів визначення напрямку приходу сигналів на основі вибіркової кореляційної матриці / М. В. Москалець // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 16(1238). – С.53–61. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Сравнительная оценка методов определения направления прихода сигналов на основе выборочной корреляционной матрицы/ Н. В. Москалец // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.53–61. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Comparative methods of direction of arrival estimation based on a sample correlation matrix/ M. Moskalets // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P. 53–61. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Москалец Микола Вадимович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166; е-пошта: moskalets1@yandex.ua.

Москалец Николай Вадимович – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры инфокоммуникационной инженерии, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: moskalets1@yandex.ua.

Moskalets Mykola – PhD, Kharkov National University of Radioelectronics, associate professor of the department of infocommunication engineering, ave. Nauky, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166.

УДК 004.942:62-272.6

**О. Л. СТАНОВСЬКИЙ, ВАЛІД ШЕР ХУССАІН, О. Ю. ЛЕБЕДЕВА, Т. П. СТАНОВСЬКА,
А. В. ТОРОПЕНКО, П. С. ШВЕЦЬ**

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПОЛІМАТЕРІАЛЬНИХ ОБ’ЄКТІВ В САПР ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДА ВІРТУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ

Полімеріальні об’єкти створюються для отримання синергетичного ефекту від поєднання різних властивостей матеріалів. Це породжує багатопільові задачі оптимізації щодо вибору цих матеріалів та автоматизованого проектування структури та параметрів самих об’єктів. Звичайні методи розв’язання таких задач, – чисельні, аналітичні, – не підходять для складних об’єктів із нелінійними властивостями. Запропоновано метод віртуальних моделей в САПР полімеріальних об’єктів.

Ключові слова: полімеріальні об’єкти, САПР, оптимізація структури та параметрів, метод віртуальної моделі.

Полимеріальні об’єкти створюються для отримання синергетичного ефекту від поєднання різних властивостей матеріалів. Це породжує багатопільові задачі оптимізації щодо вибору цих матеріалів та автоматизованого проектування структури та параметрів самих об’єктів. Звичайні методи розв’язання таких задач, – чисельні, аналітичні, – не підходять для складних об’єктів із нелінійними властивостями. Запропоновано метод віртуальних моделей в САПР полімеріальних об’єктів.

Ключевые слова: полимеріальні об’єкти, САПР, оптимізація структури та параметрів, метод віртуальної моделі.

Polymaterial objects are created to achieve a synergetic effect from combination of various properties of materials. This creates a multipurpose optimization problem for choosing these materials and computer-aided design of the structure and parameters of the objects. Conventional methods of solving such problems, – numerical, analytical, – not suitable for complex objects with nonlinear properties. The proposed method of virtual models in CAD palmately objects. The aim of this work is to improve the quality of the automated designing of objects of transport, engineering, instrumentation, chemical and food industries, which consist of substantially different properties of the elements, by creating a method of optimizing the structure and parameters of such polymaterial parts and assemblies. To achieve this goal in the work was proposed and solved the following tasks: existing methods of optimization of structure and parameters of multilayer objects in the CAD system is analyzed; method of virtual models for use in optimization of structure and parameters of multilayer objects in the CAD system is improved; testing of the proposed method in the design of rubber products with positive technical and economic effect is performed.

Keywords: polymaterial objects, CAD systems, structure and parameters optimization, the virtual model method.

Вступ. В сучасній промисловості широко використовуються деталі та вузли, які або складені із різних за властивостями матеріалів, або, навіть із матеріалів, що нелінійно змінюють свої властивості в просторі або часі (анізотропні та такі, що регулюються) [1, 2]. Зрозуміло, що до проектування таких елементів, особливо автоматизованого, пред’являються значно суворіші умови з точки зору використання сучасних методів та адекватності оптимізаційних моделей. Адже досягнення синергетичного ефекту від використання в одній деталі багатьох різних за властивостями матеріалів потребує нових підходів до розв’язання задач оптимізації в САПР, безумовно, оптимізації багатопільової, багатовимірної та багатоекстремальної.

В той же час деякі існуючі методи такої оптимізації не отримали достатнього розвитку, що суттєво звужує можливості виробництва та негативно впливає

на конкурентоспроможність його продукції. Зокрема, в статті йдеться про вдосконалення методу віртуальної моделі для оптимізації полімеріальних виробів.

Аналітичний огляд. Існує клас деталей та вузлів машин, приладів, апаратів, тощо, в яких полімеріальність створюється навмисне при проектуванні або отримується мимовільно – як продукт оптимізації за зовсім іншими цільовими функціями виробу в цілому. До першого типу можна віднести електромеханічні фільтри та гумометалеві амортизатори, в яких на етапі проектування закладається максимальна спроможність поглинати ударні хвилі певних частот [3–5], а до другого – «штучний» механічний фільтр, який виникає поза спеціальними розрахунками та діє в транспортному засобі між дорогою та тілом людини [6–8].

© О. Л. Становський, Валід Шер Хуссаїн, О. Ю. Лебедева, Т. П. Становська, А. В. Торопенко, П. С. Швець. 2017

Оскільки усі розрахункові задачі в САПР, як правило, обернені, – в них по заданих наслідках розраховують причини їхнього виникнення, – вони відрізняються некоректністю: прийнятного рішення може не бути взагалі, або таких рішень може бути кілька [9]. Ще одним недоліком методів оптимізації полі матеріальних об'єктів є те, що такі задачі не можна розв'язувати аналітичним або чисельним методами, оскільки вони, як правило, мають велику комп'ютерну складність. В той же час існують сучасні методи розв'язання подібних задач, в яких проєктувальники вдаються до створення проміжних моделей об'єкта проєктування із нездійсненними властивостями, – віртуальних об'єктів [10]. Віртуальність моделей таких об'єктів може торкатися конфігурації моделюємого об'єкта, нездійсненної в реальному житті [11], виконання об'єкта або його окремих частин із неіснуючих матеріалів [12], одночасного прикладання до об'єкта зовнішніх сил, які мають різне значення [10], тощо.

Але, на жаль, для багатошарових об'єктів методи віртуального моделювання не існують і потребують додаткової розробки.

Мета роботи. Метою роботи є підвищення якості автоматизованого проєктування об'єктів транспорту, машинобудування, приладобудування, хімічної та харчової промисловості, які складаються із суттєво різних за властивостями елементів, за рахунок створення методу оптимізації структури та параметрів таких поліматеріальних деталей та вузлів.

Для досягнення цієї мети в роботі були висунуті та розв'язані такі задачі:

- критично проаналізовані існуючі методи розв'язання задач оптимізації структури та параметрів багатошарових об'єктів в САПР;

- удосконалено метод віртуальної моделі для використання в задачах оптимізації структури та параметрів багатошарових об'єктів в САПР;

- виконані випробування запропонованого методу при проєктуванні гумометалевих виробів з позитивним техніко-економічним ефектом.

Аналітичний метод розв'язання задач оптимізації поліматеріальних об'єктів. Розглянемо відносно просту задачу. Хай деякому впливу треба розповсюдитися від точки $(0; 0)$ (рис. 1) до точки із координатами $(x_A; L)$, долаючи при цьому шлях між цими точками крізь дві зони (I та II) двома відрізками прямих ОХ та ХА.

Точка Х завжди розташована на границі між зонами I та II, ширина яких, відповідно, l_I та l_{II} :

$$l_I + l_{II} = L, \quad (1)$$

Якщо властивості (наприклад, швидкість) перенесення впливу однакові ($v_I = v_{II} = v$) для обох зон, найшвидшим шляхом між О і А буде відрізок ОА, а час його подолання, відповідно:

$$\tau = \frac{l_{OA}}{v}. \quad (2)$$

Якщо швидкості v_I та v_{II} нерівні, «прямий» шлях ОА, з точки зору мінімуму часу, стає неоптимальним, і задача оптимізації зводиться до пошуку такої точки «перелому» шляху $X(l_I; x)$ при якій

$$\tau_I + \tau_{II} = \tau_{\min}. \quad (3)$$

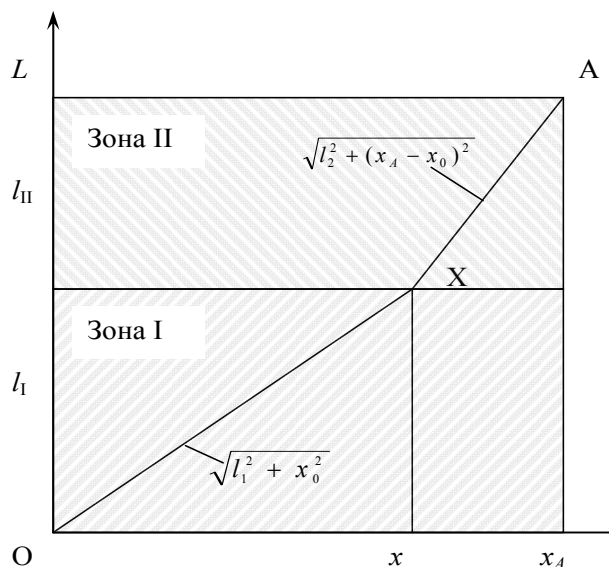


Рис. 1 – Схема до розрахунку оптимального за часом шляху подолання двох зон із різними протяжністю та властивостями

Оскільки l_I – задане число, пошук зводиться до розрахунку $x_{\min} \rightarrow \tau_{\min}(x)$. Тепер сформулюємо задачу оптимізації. В загальному вигляді вона формулюється так:

$$x \in X: f(x) = \min_{x \in X} f(x). \quad (4)$$

Для одновимірному випадку вираз (4) виглядає таким чином:

$$x \in \{0; x_A\}: f(x^*) = \min_{x \in \{0; x_A\}} f(x). \quad (5)$$

Для побудови $f(x)$ згадаємо, що метою оптимізації в задачі (5) в нашому випадку є мінімізація часу перенесення впливу від О до А, а також, що цей час є сумою часу перенесення від точки О до точки Х і від точки Х до точки А із відповідними швидкостями:

$$\tau_I = \frac{l_I}{v_I}; \quad (6)$$

$$\tau_{II} = \frac{l_{II}}{v_{II}}; \quad (7)$$

$$\tau = \tau_I + \tau_{II}. \quad (8)$$

Таким чином, цільовою функцією оптимізації є час τ , а єдиним оптимізуємым аргументом – координата x точки Х. Інші характеристики ($l_I, l_{II}, v_I, v_{II}, x_A$) є в конкретному розрахунку сталими і можуть варіюватися в процесі зміни проєктованих параметрів у дво-матеріальному об'єкті.

З рис. 1 та виразів (6)–(8) отримуємо:

$$\tau_I = \frac{\sqrt{l_I^2 + x^2}}{v_I}; \quad (9)$$

$$\tau_{II} = \frac{\sqrt{l_{II}^2 + (x_A + x)^2}}{v_{II}}; \quad (10)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{l_I^2 + x^2}}{v_I} + \frac{\sqrt{l_{II}^2 + (x_A + x)^2}}{v_{II}}. \quad (11)$$

Для розв'язання конкретної задачі оптимізації, побудованої із (5) та (11):

$$x \in \{0; x_A\};$$

$$f(x^*) = \min_{x \in \{0; x_A\}} \frac{\sqrt{l_I^2 + x^2}}{v_I} + \frac{\sqrt{l_{II}^2 + (x_A + x)^2}}{v_{II}}, \quad (12)$$

призначимо сталі: $l_I = 1$ м, $l_{II} = 2$ м, $v_I = 1$ м/с, $v_{II} = 0,5$ м/с, $x_A = 10$ м.

Тоді вираз (12) перетворюється на:

$$x \in \{0; x_A\};$$

$$f(x^*) = \min_{x \in \{0; x_A\}} (\sqrt{1 + x^2} + \sqrt{64 + 16(10 - x)^2}) \quad (13)$$

Оптимізацію виразу, який в (13) стоїть під знаком \min , можна виконати двома способами.

Перший спосіб – аналітичний. Для цього візьмемо похідну:

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = \frac{x}{v_I \sqrt{l_I^2 + x^2}} + \frac{x_A - x}{v_{II} \sqrt{l_{II}^2 + (x_A - x)^2}} \quad (14)$$

та прирівняємо її до 0:

$$\frac{x^*}{v_I \sqrt{l_I^2 + x^{*2}}} + \frac{x_A - x^*}{v_{II} \sqrt{l_{II}^2 + (x_A - x^*)^2}} = 0. \quad (15)$$

Розв'язуючи рівняння (15) отримуємо значення $x^* = 9,12$ м, а відповідний йому мінімальний час $\tau_{\min}(x^*) = 17,928$ с.

На жаль, обчислювальний шлях лише до одного результату (а в САПР такі результати перебирають тисячами) в найпростішому випадку (дві зони, які складаються з ізотропних матеріалів) виявляється настільки великим, що його не можна рекомендувати до практичного використання.

Чисельний метод розв'язання задач оптимізації поліматеріальних об'єктів. Skorистаємося формулою (11) і будемо варіювати шукане значення x^* по дискретних значеннях $x = 0, 1, 3, 5, 7, 9$. Результати занесемо до табл. 1 (1 варіант)

Як бачимо, оптимальне τ зменшується монотонно, і його найменше значення співпадає із $x = 10$, тобто точка X опиняється на межі допуску на своє існування. Це протирічить фізичному сенсу початкової задачі.

Змінимо сталі задачі на $l_I = 1$ м, $l_{II} = 2$ м, $v_I = v_{II} = 1$ м/с, $x_A = 10$ м. В цьому наборі властивості зон співпадають, а отже оптимальним шляхом між точками O та A є відрізок OA . Вираз (11) перетворюється на:

$$\tau = (\sqrt{1 + x^2} + \sqrt{4 + (10 - x)^2}), \quad (16)$$

а розрахунки за ним представлені в таблиці 1 (2 варіант). Як бачимо, в цьому прикладі $x = 3$ м (оскільки товщина зон різна).

Таблиця 1 – Результати наближеного розрахунку поліматеріального об'єкта

x , м	τ , с 1 варіант	τ , с 2 варіант
0	40,8	11,00
1	38,3	10,61
3	30,0	10,44
5	27,0	10,47
7	21,0	10,67
9	18,05	11,28
10	18,04	12,04

Повертаємося до першого варіанту і виказуємо припущення, що мінімізує час значення x^* знаходиться між $x = 9$ м та $x = 10$ м. Будуємо табл. 2, в якій знаходимо цей оптимум: $x^* = 9,5$ м; $\tau_{\min}(x^*) = 17,798$ с.

Таблиця 2 – Результати уточнюючого розрахунку поліматеріального об'єкта

x , м	τ , с 1 варіант
9	18,5
9,1	17,928
9,5	17,798
10	18,04

Як бачимо, результат приблизно знайдено, але й цей, чисельний шлях виявляється досить складним навіть для найпростішого двохшарового варіанту. Більш точний результат розв'язання задачі (12) може бути знайдений, наприклад, методом підбору, що навіть для зовсім простої двовимірної задачі є математично складним випробуванням.

Метод віртуальної моделі оптимізації поліматеріальних об'єктів. В попередніх прикладах розмірність задачі оптимізації дорівнювала двом. Перейдемо тепер до об'єктів із необмеженою розмірністю. Нехай об'єкт проектування Ω має тепер наступні атрибути:

\mathbf{x} – вектор розмірних параметрів (конфігурація);
 $\boldsymbol{\lambda}$ – вектор характеристик матеріалів, з яких складається об'єкт;

\mathbf{q} – вектор зовнішніх впливів на об'єкт.

Якщо розглядати комплекс цих множин $\{\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{q}\}$ як *параметрів-причин*, то *параметрами-наслідками* або *реакціями* може вважатися деякий вектор чисел \mathbf{r} , відповідний в деякому сенсі початковому об'єкту Ω :

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{q}). \quad (17)$$

Задача (17) пряма: по трьом векторам-причинам знайти вектор-реакцію. До неї існують три обернені задачі.

1. За відомими реакцією \mathbf{r} , характеристикам $\boldsymbol{\lambda}$ і дії \mathbf{q} знайти конфігурацію \mathbf{x} :

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{r}, \lambda, \mathbf{q}). \quad (18)$$

2. За відомими реакцією \mathbf{r} , конфігурації \mathbf{x} і дії \mathbf{q} знайти характеристики λ :

$$\lambda = \lambda(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{q}). \quad (19)$$

3. За відомими реакцією \mathbf{r} , характеристикам λ і конфігурації \mathbf{x} знайти вплив \mathbf{q} :

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}(\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{r}). \quad (20)$$

У проектуванні вирішуються перша і друга об'єрнені задачі (18) і (19), в управлінні – третя (20).

Рішення цих задач неаналітичними методами, наприклад, методом перебору передбачає заміну однієї оберненої задачі (18), (19) або (20) деякою множиною прямих (17). При цьому, як сказано вище, розв'язуючий алгоритм різко ускладнюється, настільки ж різко зростає його часова складність. Зокрема, для проектування за допомогою зміни зовнішнього впливу $\Delta\mathbf{q}$ на об'єкт Ω вирішальний алгоритм підбору виглядає наступним чином [12]:

1 – вибрати деяке початкове рішення $\Delta\mathbf{q} = \Delta\mathbf{q}_{\text{поч}}$;

2 – вирішуючи пряму задачу (17), розрахувати $\mathbf{r}_{\text{поч}}(\Delta\mathbf{q}_{\text{поч}})$;

3 – визначити допустимість відхилення $\mathbf{r}_{\text{поч}}$ від області допустимих значень $\mathbf{r} \in \mathbf{R}$;

4 – якщо відхилення допустимо, зупинитися, якщо ні, – повернутися до п. 1, змінити $\Delta\mathbf{q}_{\text{поч}}$ і повторювати пп. 2 – 4 до зупинки.

Таким чином, рішення методом перебору припускає деякий «рух» в області визначення можливих зовнішніх впливів на об'єкт $\mathbf{q} \in \mathbf{Q}$. У переважній більшості випадків проектування таких «рух» неможливий із-за особливостей параметра, вздовж якого необхідно рухатися. Наприклад, не завжди можливо вільно варіювати характеристики матеріалу, з якого планується виробити об'єкт, адже матеріалу з такими характеристиками може просто не існувати! Для розв'язання цієї проблеми створюється *віртуальна* модель об'єкта проектування. Віртуальна в тому сенсі що в ній, допускаються різні, неможливі в реальному світі стани окремих елементів: наприклад, елемент *одночасно* виконаний зі сталі та алюмінію (рис. 2, а); на елемент *одночасно* в одній точці діють різні за величиною сили (рис. 2, б); елемент одночасно має різні значення одного й того ж розміру (рис. 2, в) [12].

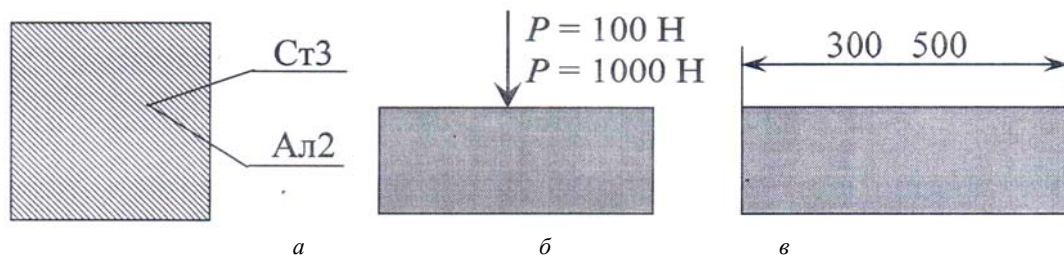


Рис. 2 – Варіанти віртуальних об'єктів в механіці: а – елемент одночасно виконаний зі сталі та алюмінію; б – на елемент одночасно в одній точці діють різні за величиною сили; в – елемент одночасно має різні значення одного й того ж розміру

Віртуальний об'єкт припускає рух в напрямку підбору квазіоптимальних рішень вздовж будь-якого параметра, незалежно від його доцільності і реальної можливості. Такий рух створює квазіоптимальну модель, для якої в реальному світі не існує відповідного до цієї моделі об'єкта.

Нехай для пошуку оптимальної конструкції деякого об'єкта необхідно «рухатися» уздовж параметра P_1 його моделі, але розв'язуючий алгоритм такий рух обмежує, наприклад, високою часовою складністю комп'ютерних обчислень (заборона А). Нехай рухом уздовж параметра P_2 моделі також можна оптимізувати управління об'єктом (назвемо цей процес квазіоптимізацією), але такий рух забороняє фізична основа об'єкта (заборона Б).

У разі «звичайної» моделі в цих умовах доведеться рухатися, змінюючи P_1 , – адже така, що суперечить здоровому глузду, заборона Б нездоланна! Інша річ – якщо модель віртуальна, – в ній немає ніяких заборон! Тоді, рухаючись в напрямку P_2 всередині віртуальної моделі, знайдемо спочатку квазіоптимальний (віртуальний) керуючий вплив $\Delta\mathbf{q}_{\text{кво}}$.

Далі має бути фінішний перехід від квазіоптимального впливу $\Delta\mathbf{q}_{\text{кво}}$ до оптимального $\Delta\mathbf{q}_{\text{опт}}$. Завдання вирішено і заборона А обійдена. Результат – значне зниження часової складності пошуку оптимального

керуючого впливу. Таким чином, запропонований метод складається з двох етапів: квазіоптимізації і фінішного переходу.

Наведемо конкретний приклад. Розглянемо проектування матеріального об'єкта у вигляді багатошарової пластини (рис. 3).

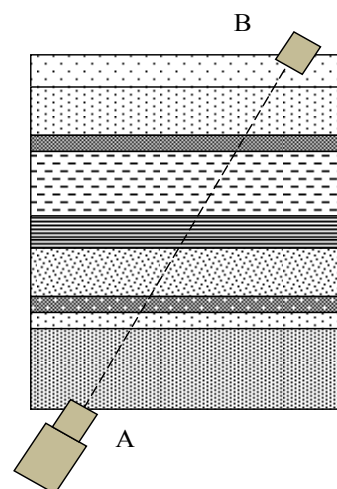


Рис. 3 – Багатошарова пластинка із різними властивостями окремих шарів: А – джерело коливань; Б – приймач коливань

Необхідно спроектувати товщину та матеріал окремих пластин так, щоб пластина працювала в якості фільтра, який на шляху від джерела широкого спектра коливань А до приймача Б подавляє деякий заданий спектр частот.

Для розрахунку параметрів розповсюдження коливань крізь цей об'єкт розглянемо віртуальну модель цього об'єкта, в якій джерело А випромінює коливання тільки однієї частоти, причому *одночасно різної*. Далі для кожного окремого шару обчислюємо таку частоту, яка найбільш відповідає умовам задачі. Фінішний перехід полягає у відтворенні фізично припустимого стану (частота єдина), що досягається відповідним перерахуванням товщин шарів об'єкта.

Практичні випробування результатів дослідження. В ПАТ «Одеський завод гумових технічних виробів» було проведено випробування САПР процесу виготовлення поліматеріальних виробів «POLIMOV». В якості об'єкта автоматизованого проектування використовували технологічний процес лиття під тиском гумової суміші при виробництві гумометалевих амортизаторів типу АКСС-10М та КРМ (рис. 4, а, б).



а



б

Рис. 4 – Гумометалеві двоматеріальні вироби типу «Силовий композиційний елемент» (гумометалеві амортизатори): а – типу АКСС; б – типу КРМ.

В результаті випробувань встановлено, що використання процесу виготовлення поліматеріальних виробів, спроектованого за допомогою САПР «POLIMOV», дозволило знизити відсоток браку в

партії гумометалевих амортизаторів АКСС-10М та КРМ на 39,14 % при забезпеченні заданих властивостей деталі.

Обговорення результатів дослідження. Результати дослідження підтверджують практичну можливість використання методу віртуальної моделі при оптимізації поліматеріальних об'єктів в сапр. Метод може бути застосований при проектуванні конструкцій та технологічних процесів виготовлення досить складних за будовою та досить відповідальних за призначенням композиційних поліматеріальних деталей.

Висновки. В результаті аналізу існуючих методів розв'язання задач проектування структури та параметрів багат шарових об'єктів в сапр встановлено, що обчислювальна складність виникаючих при цьому задач оптимізації не завжди дозволяє застосовувати для цього «звичайні» аналітичні та чисельні методи.

Наведені приклади постановки та розв'язання таких задач для поліматеріальних об'єктів за допомогою методу віртуальної моделі. Метод дозволяє уникнути складних обчислень в напрямку підбору реальних параметрів і замінити їх на створення «неможливих» віртуальних характеристик об'єктів із подальшим перерахуванням їх до реального результату проектування. Розроблені методи та моделі дозволили запропонувати нові підсистеми та створити загальну САПР «POLIMOV» (*polimaterialy object*), призначену для автоматизованого проектування поліматеріальних виробів будь-яких видів та складів матеріалів, які входять до композиції та технології їхнього виготовлення.

Список літератури

1. Становская, Т. П. Подвеска транспортного средства как нелинейный фильтр [Текст] / Т. П. Становская, О. С. Савельева, А. В. Опарин // Материалы XII семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – 2005. – С. 63–64.
2. Становський, О. Л. Автоматизоване проектування технології виготовлення гумометалевих виробів [Текст] / О. Л. Становський, Е. Ю. Лебедева, О. М. Абу Шена, А. Н. Красножон // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 5/1 (77). – С. 23–28. doi: [10.15587/1729-4061.2015.51213](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51213)
3. Лосев, А. К. Теория и расчет электромеханических фильтров [Текст] / А. К. Лосев. – М.: Связь, 1965. – 262 с.
4. Павлов, А. Н. Высокодобротный электромеханический фильтр низкочастотных сигналов [Текст] / А. Н. Павлов // Измерительная техника. – 2003. – № 10. – С. 39–40.
5. Shvets, P. The computer-aided design of rubber-metal products [J] / P. Shvets, O. Lebedeva, V. Bondarenko // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi. – 2015. – № 3. – P. 36–40. doi: [10.15276/opu.3.47.2015.10](https://doi.org/10.15276/opu.3.47.2015.10)
6. Балан, С. А. Моделирование передаточных частотных характеристик элементов автотранспортных средств [Текст] / С. А. Балан, Т. П. Становская, А. В. Опарин // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – № 3. – С. 71–73.
7. Балан, С. А. Метод виртуального объекта в управлении тормозными системами с внутренней виброзащитой [Текст] / С. А. Балан, Т. П. Становская, А. В. Опарин // Труды Одесского политехнического университета. – 2000. – № 2. – С. 29–32.
8. Сидоренко, И. И. Активная виброзащитная система с механической обратной связью по величине передаваемой нагрузки [Текст] / И. И. Сидоренко // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – № 2. – С. 51–54.
9. Гончарова, О. Е. Нечувствительный к асимметрии численный метод оптимизации конструкций [Текст] / О. Е. Гончарова, В. Г. Максимов, А. Л. Становский // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – № 2. – С. 41–44.

10. *Балан, С. А.* Метод виртуального объекта в проектировании [Текст] / С. А. Балан, Т. П. Становская, О. Е. Гончарова // Труды Одесского политехнического университета. – 2000. – № 1. – С. 32–35.
11. *Становский, А. Л.* Метод виртуальной модели в метрологическом обеспечении автоматизированного проектирования и управления [Текст] / А. Л. Становский, Л. В. Бовнегра, А. В. Шмараев, Ю. В. Шихирева // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015 – № 2/9 (74). – С. 30–35. doi: [10.15587/1729-4061.2015.40003](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.40003)
12. *Балан, С. А.* Применение метода виртуального объекта в машиностроении [Текст]: тр. VII семинара / С. А. Балан, Т. П. Становская, О. Е. Гончарова // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – 2000. – С. 12–16.
13. *Хемди, А. Таха* Введение в исследование операций. Operations Research: An Introduction [Текст] / А. Таха Хемди. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.
1. Stanovskaya, T. P., Saveleva, O. S., Oparin, A. V. (2005). Podveska transportnogo sredstva kak nelineyniy filtr. Materialy XII seminaru «Modelirovanie v prikladnykh nauchnykh issledovaniyakh», 63–64.
2. Stanovskiy, O. L., Liebedieva, O. Iu., Mokhammed Ali, A. Sh. O., Krasnozhan, O. M., Shvets, P. S. (2015). A computer-aided design technology for manufacturing rubber and metal products. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (1 (77)), 23–28. doi: [10.15587/1729-4061.2015.51213](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51213)
3. Losev, A. K. (1965). Teoriya i raschet elektromekhanicheskikh filtrov. Moscow: Svyaz, 262.
4. Pavlov, A. N. (2003). Vysokodobrotnyy elektromekhanicheskiy filtr nizkochastotnykh signalov. Izmeritel'naya tekhnika, 10, 39–40.
5. Shvets, P., Lebedeva, O., Bondarenko, V. (2015). The computer-aided design of rubber-metal products. Odes'kiy Politechnichnyi Universytet. Pratsi, 3, 36–40. doi: [10.15276/opu.3.47.2015.10](https://doi.org/10.15276/opu.3.47.2015.10)
6. Balan, S. A., Stanovskaya, T. P., Oparin, A. V. (1999). Modelirovanie peredatochnykh chastotnykh harakteristik elementov avtotransportnykh sredstv / Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta, 3, 71–73.
7. Balan, S. A., Stanovskaya, T. P., Oparin, A. V. (2000). Metod virtualnogo ob'ekta v upravlenii tormoznyimi sistemami s vnutrenney vibrozashchitoy. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta, 2, 29–32.
8. Sidorenko, I. I. (1999). Aktivnaya vibrozashchitnaya sistema s mekhanicheskoy obratnoy svyazyu po velichine peredavaemoy nagruzki. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta, 2, 51–54.
9. Goncharova, O. E., Maksimov, V. G., Stanovskiy, A. L. (1999). Nechuvstvitelnyy k asimmetrii chislennyiy metod optimizatsii konstruktivnykh. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta, 2, 41–44.
10. Balan, S. A., Stanovskaya, T. P., Goncharova, O. E. (2000). Metod virtualnogo ob'ekta v proektirovani. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta, 1, 32–35.
11. Stanovskiy, A. L., Bovnegra, L. V., Shmaraev, A. V., Shihireva, Yu. V. (2015). The virtual model method in the metrological provision of automated design and control. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (9 (74)), 30–35. doi: [10.15587/1729-4061.2015.40003](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.40003)
12. Balan, S. A., Stanovskaya, T. P., Goncharova, O. E. (2000). Primenenie metoda virtualnogo ob'ekta v mashinostroyeni. Modelirovanie v prikladnykh nauchnykh issledovaniyakh, 12–16.
13. Hemdi A. Taha. (2007). Vvedenie v issledovanie operatsiy. Operations Research: An Introduction, Moscow: Vilyams, 912.

Поступила (received) 25.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделювання та оптимізація поліматеріальних об'єктів в САПР за допомогою метода віртуальної моделі/ О. Л. Становський, Валід Шер Хуссаян, О. Ю. Лебедева, Т. П. Становська, А. В. Торопенко, П. С. Швець // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 61–67.– Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.

Моделирование и оптимизация полиматериальных объектов в САПР с помощью метода виртуальной модели/ А. Л. Становский, Валід Шер Хуссаян, Е. Ю. Лебедева, Т. П. Становская, А. В. Торопенко, П. С. Швець // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С.61–67. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.

Modeling and optimization polimaterialnyh objects in CAD method using a virtual model/ O. Stanovskiy, Walid Sher Hussain, O. Lebedeva, T. Stanovskaya, A. Toropenko, P. Shvets //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 61–67. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Становський Олександр Леонідович – доктор технічних наук, професор, Одеський національний політехнічний університет, завідувач кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, пр. Шевченка, 1, м Одеса, Україна, 65044; e-mail: ostanovskiy@gmail.com.

Хуссаян Валід Шер – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, пр. Шевченка, 1, м Одеса, Україна, 65044; e-mail: walidsher@hotmail.com.

Лебедева Олена Юрївна – Одеський завод гумових технічних виробів, інженер-технолог, Миколаївська дорога, 124, м Одеса, Україна, 65013; e-mail: ozrti@rambler.ru.

Становська Тетяна Павлівна – кандидат технічних наук, доцент, Одеська національна академія харчових технологій, доцент кафедри інформаційних технологій та кібербезпеки; вул. Канатна, 112, м Одеса, Україна, 65000; e-mail: ostanovskiy@gmail.com.

Торопенко Алла Володимирівна – кандидат технічних наук, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, пр. Шевченка, 1, м Одеса, Україна, 65044; e-mail: alla.androsyk@gmail.com.

Швець Павло Степанович – кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, пр. Шевченка, 1, м Одеса, Україна.

на, 65044; e-mail: sps.090584@gmail.com.

Становский Александр Леонидович – доктор технических наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет, заведующий кафедрой нефтегазового и химического машиностроения, пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: ostanovskyi@gmail.com

Хуссаин Валид Шер – Одесский национальный политехнический университет, аспирант кафедры нефтегазового и химического машиностроения, пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: walidsher@hotmail.com.

Лебедева Елена Юрьевна – Одесский завод резиновых технических изделий, инженер-технолог, Николаевская дорога, 124, г. Одесса, Украина, 65013; e-mail: ozrti@rambler.ru.

Становская Татьяна Павловна – кандидат технических наук, доцент, Одесская национальная академия пищевых технологий, доцент кафедры информационных технологий и кибербезопасности; ул. Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65000; e-mail: ostanovskyi@gmail.com.

Торопенко Алла Владимировна – кандидат технических наук, Одесский национальный политехнический университет, доцент кафедры нефтегазового и химического машиностроения, пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: alla.androsyuk@gmail.com.

Швец Павел Степанович – кандидат технических наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет, доцент кафедры электроснабжения и энергетического менеджмента, пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: sps.090584@gmail.com.

Stanovskyi Oleksandr – PhD, professor, Odessa National Polytechnic University, Head of the Department of oil and gas and chemical engineering, Shevchenko Avenue, 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: ostanovskyi@gmail.com.

Hussain Valid Sher – Odessa National Polytechnic University, Postgraduate of the Department of oil and gas and chemical engineering, Shevchenko Avenue, 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: walidsher@hotmail.com.

Lebedeva Olena – Odessa factory of rubber technical products, engineer, Nikolaev road, 124, Odessa, Ukraine, 65013; e-mail: ozrti@rambler.ru.

Stanovska Tetyana – PhD, Associate Professor, Odessa National Academy of Food Technologies, assistant professor of the Department of information technology and cybersecurity; Kanatna Street., 112, Odessa, Ukraine, 65000; e-mail: ostanovskyi@gmail.com.

Toropenko Alla – PhD, Odessa National Polytechnic University, assistant professor of the Department of oil and gas and chemical engineering, Shevchenko Avenue, 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: alla.androsyuk@gmail.com.

Shvets Pavlo – PhD, Associate Professor, Odessa National Polytechnic University, assistant professor of the Department of electrical and energy management, Shevchenko Avenue, 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: sps.090584@gmail.com.

**ТЕХНОЛОГІЇ ТА
ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЦТВА**

УДК 625.141.1:656.212.5

*Л. В. ТРИКОЗ, І. В. БАГІЯНЦ***ЗМІНЕННЯ ПЕРЕРОБНОЇ СПРОМОЖНОСТІ СОРТУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ЧЕРЕЗ НАДІЙНІСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРХНЬОЇ БУДОВИ КОЛІЇ**

Розглянуто сортувальний комплекс як складну технологічну систему, що охоплює широкий перелік складових для виконання запланованих операцій. Проаналізовано метод визначення переробної спроможності сортувальної гірки та витяжних колій з метою встановлення залежності ефективної експлуатації сортувальних пристроїв від надійності використання технічного оснащення. Запропоновано розглянути та врахувати вимушені відмови пристроїв сигналізації, централізації та блокування, що використовуються для регулювання і забезпечення безперервної добової роботи залізничного транспорту.

Ключові слова: сортувальні пристрої, переробна спроможність, технічне оснащення, відмови, верхня будова колії.

Рассмотрен сортировочный комплекс как сложная технологическая система, охватывающая широкий перечень составляющих для выполнения запланированных операций. Проанализирован метод определения перерабатывающей способности сортировочной горки и вытяжных путей с целью установления зависимости эффективной эксплуатации сортировочных устройств от надежности использования технического оснащения. Предложено рассмотреть и учесть вынужденные отказы устройств сигнализации, централизации и блокировки, используемых для регулирования и обеспечения непрерывной суточной работы железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: сортировочные устройства, перерабатывающая способность, техническое оснащение, отказы, верхнее строение пути.

The article deals with the classification complex as a complicated technological system comprising a wide range of components for fulfilling scheduled operations. The method to define the capacity of a hump and lead tracks so that to establish dependencies of effective operation of the sorting equipment on reliable use of technical equipment has been analyzed. The authors have proposed to consider and take into account failures in the signaling and interlocking devices intended for regulation and fulfillment of non-stop daily rail transport operation.

On the base of calculations the graphic dependency of the number of wagons, which can be processed by a sorting hump and a lead track per a certain period, on failures in sorting equipment is presented. It has been demonstrated that increased failure rates for technical equipment decreases estimated capacity values irrespective of the set average hump technological interval which considers a time for entering, pushing, shunting, making-up, and backing. The reasons for sorting equipment failures have been elucidated.

Keywords: classification yard equipment, capacity, technique, failures, permanent way.

Вступ. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту [1] передбачає скорочення витрат на перевезення при більш доцільному використанні транспортної інфраструктури. Для досягнення поставленої мети в умовах реструктуризації Укрзалізниці необхідно розробити технологічно-економічний підхід до управління вантажними перевезеннями.

У зв'язку з цим проблема оцінки переробної спроможності сортувальних пристроїв безумовно актуальна, а її рішення є основою для визначення якісних параметрів перевізної роботи.

Практика роботи залізниць показує, що на процес організації руху вантажних і пасажирських поїздів великий вплив має стан технічних пристроїв. Виникаючи в процесі їх експлуатації відмови призводять до зниження переробної спроможності сортувальних пристроїв і як наслідок пропускну і провізної здатності станцій і напрямків. Крім того, вони завдають втрати як для Укрзалізниці так й для вантажовласників та вагоновласників, пов'язані з пропуском поїздів і вагонопотоків.

Об'єкт дослідження. Для виконання сортувальної роботи на сортувальних, вантажних та дільничних станціях розташовують сортувальні гірки великої, середньої або малої потужності з відповідним обладнанням, сортувальні парки, витяжні колії.

Сортувальний пристрій проектується як складна технологічна система, що включає не тільки колійний розвиток зі штучним підвищенням ділянки залізничної колії для сортування вагонів з використанням сили тяжіння на ухилі для сортувальних гірок

та витяжних колій. Ця технологічна система охоплює маневрові локомотиви, технічне оснащення, ремонтну базу, службово-технічні, а також службово-побутові будівлі і приміщення з необхідними комунікаціями, пристрої освітлення, автомобільні дороги, перехідні мости, тунелі і доріжки, проїзди для електро- і автокарів [2].

Елементи колійного розвитку сортувальних пристроїв (колії насуву, гіркова горловина, сортувальні колії, з'єднувальні обхідні колії, витяжні колії) проектується з урахуванням їх періодичного часткового закриття для виконання капітальних, середніх і інших планових ремонтів колії.

При проектуванні нових або реконструкції існуючих сортувальних пристроїв виконується аналіз ймовірної максимальної кількості вагонів, яка може бути перероблена пристроєм за визначений період, тобто потрібна переробна спроможність, з урахуванням призначення станції, особливостей її розташування на мережі залізниць та в промисловому районі. Потрібна переробна спроможність основного сортувального пристрою встановлюється на основі прогнозованих середньодобових обсягів переробки, визначених економічними дослідженнями на розрахункові терміни експлуатації.

Таким чином, об'єктом дослідження є процес розформування вантажних поїздів на залізничних сортувальних пристроях та наступне їх формування згідно плану формування. Предметом дослідження є забезпечення переробної спроможності сортувальних пристроїв при оптимізованому технічному оснащенні.

© Л. В. Трикоз, І. В. Багіянец. 2017

Мета та задачі дослідження. Мета дослідження зведення до мінімуму відмов пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ), що використовуються для регулювання і забезпечення безперервної добової роботи залізничного транспорту та дотримання норм переробної спроможності сортувальних пристроїв при додержанні правил безпеки при маневрових переміщеннях.

Для досягнення поставленої мети запропоновано:

- представити залежність між кількістю вагонів, яка може бути перероблена сортувальним пристроєм за визначений період й відмовами технічного оснащення сортувального пристрою;
- висвітлити причини виникнення відмов технічного оснащення сортувальних пристроїв;
- показати можливість зведення до мінімуму негативного впливу причин виникнення відмов технічного оснащення сортувальних пристроїв;
- запропонувати рішення, що дозволить звести до мінімуму причини відмов пристроїв СЦБ шляхом виключення впливу їх на переробну спроможність сортувальних пристроїв.

Аналіз літературних даних. Питанням покращання переробної спроможності сортувальних пристроїв приділяється достатньо уваги в багатьох публікаціях, пропонуються наступні раціональні рішення:

- визначення втрат часу в середньому за добу, на усунення несправності пристроїв, які пов'язані з переробкою вагонів [1];
- шляхом подовження витяжних колій для можливості витягування на них всього складу, що дозволяє зменшити гірковий технологічний інтервал і збільшити переробну спроможність гірки [3];
- запропоновано використовувати показники максимальна, мінімальна та технічна швидкість розпуску, проведено дослідження шляхів збільшення переробної спроможності сортувальної гірки за рахунок перерозподілу маневрової роботи між гірковою і вихідною горловинами сортувального парку. Отримано залежності, що дозволяють визначити момент перенесення маневрової роботи в іншій маневровий район сортувального парку, а також обсяги переробки вагонів, при яких необхідно збільшувати технічне оснащення станції [4];

– удосконалено методику розрахунку переробної спроможності сортувальних гірок враховуючи взаємозв'язки впливу швидкості розпуску складу на умови розділення відцепів та кількість вагонів, що потребують повторного сортування через не розділення їх на розділових стрілках [5];

– вивчаючи проблему оптимізації та моделювання сортувальних станцій протягом декількох років у Китаї пропонували: за рахунок поліпшення конструкції візка вантажного вагона та збільшення навантаження з 20,5 до 25 тон на вісь вантажного поїзда і подовження його довжини, розробки моделі для знаходження оптимальної послідовності вагонів насуву на гірку, працювали над проблемою переміщення вагонів в поїзді, запропонували і розробили інтегровану диспетчерську модель для оптимальної роботи на сортувальних станціях, застосовуючи евристичний підхід, працювали над моделлю і алгоритмом динамічно-

го розподілу вагонного потоку в умовах невизначеності [6–9];

– застосування методу YARDSIM для оцінки сортувальних гірок в Північній Америці – це візуальний інструмент для моделювання, хоча він не може автоматично вирішити проблему, але він може бути використаний для "що-якщо" аналізу, нова Computer Aided Диспетчерська система (CAD III) знаходиться в стадії розробки в США, і буде включати в себе автоматизоване планування руху вагонів використовуючи цільову функцію на основі оптимізації [10,11];

– представлено моделювання потужності сортувальної станції шляхом застосування теорії масового обслуговування для оптимізації операцій, виявлено існування додаткової можливості для більш ефективного використання персоналу та потужностей сортувальних комплексів. Зменшення часу знаходження та оброблення вагонів, можливо завдяки модернізації операцій при використанні пристрою зчитування штрих-коду і RFID (Radio Frequency Identification) технології. Ці вдосконалення можуть привести до зниження експлуатаційних витрат [12].

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок, що в попередніх роботах недостатньо уваги приділяється аналізу параметрів, що викликають неконтрольовані відмови технічного оснащення сортувальних пристроїв та унеможливають виконання сортувальної та маневрової роботи у запланований час в робочу зміну робітниками залізничної станції та постає загроза не забезпечення переробної спроможності сортувальних пристроїв й показників оперативного планування роботи. Тому, у роботі запропоноване рішення що дозволить звести до мінімуму причини відмов пристроїв СЦБ та виключення впливу їх на переробну спроможність сортувальних пристроїв.

Визначення переробної спроможності сортувальних гірок та витяжних колій. Для сортувальних, вантажних та дільничних станцій порядок розрахунку добової переробної спроможності сортувальної гірки згідно з [13] визначається за формулою

$$N_z = \frac{\alpha_{ep} (1440 - \sum T_{nocm})}{t_z \mu_{новт} (1 + \rho_g)} m_c + N_{nocm}, \quad (1)$$

де α_{ep} – коефіцієнт, що враховує можливі перерви при використанні гірки через ворожі пересування; $\sum T_{nocm}$ – тривалість виконання постійних операцій, які не пов'язані з переробкою основного вагонопотоку, хв; t_z – середня тривалість гіркового технологічного інтервалу (з урахуванням часу на заїзд, насув, розпуск, формування, осаджування), хв; $\mu_{новт}$ – коефіцієнт, що враховує повторне сортування частини вагонів через недостатність у періоди згущеного надходження поїздів числа та довжини сортувальних колій; m_c – середня кількість вагонів в складі; N_{nocm} – кількість місцевих вагонів з колій ремонту, кутових, вагонного депо та ін., які розпускаються за час $\sum T_{nocm}$; ρ_g – коефіцієнт, що враховує відмови техні-

чних пристроїв. Відомо з [14], що ρ_e для немеханізованих гірок приймається 0,03. Для інших гірок в залежності від кількості вагонів у складі, типу сповільнювачів та тривалості гірочного технологічного інтервалу.

Переробна спроможність витяжної колії визначається залежно від тривалості її зайняття протягом доби передбаченими операціями, тому переробну спроможність зручно визначати за допомогою коефіцієнта використання переробної спроможності:

$$N_{\text{вир}} = \frac{n_{p,\phi}}{K}, \quad (2)$$

де $n_{p,\phi}$ – фактичне число составів за добу, які розформовують або формують на витяжній колії;

K – коефіцієнт використання переробної спроможності витяжної колії.

$$K = \frac{\mu_{\text{повт}}^c T_{\phi}}{1440\alpha_c - \sum T_{\text{пост}}^o}, \quad (3)$$

де $\mu_{\text{повт}}^c$ – коефіцієнт повторного сортування; $\sum T_{\text{пост}}^o$ – час зайняття витяжної колії протягом доби виконанням постійних операцій, які не залежать від обсягу переробки (технічним обслуговуванням колії, зміною локомотивних бригад з екіпуванням маневрового локомотива, обробкою заданого числа збірних поїздів), хв; α_c – коефіцієнт, що враховує можливі перерви у використанні витяжної колії через ворожі пересування; T_{ϕ} – сумарний час зайняття витяжної колії усіма операціями з составом протягом доби, хв;

Сумарний час зайняття витяжної колії

$$T_{\phi} = \left[\sum n_p t_p + \sum n_{\phi} t_{\phi} + \sum n_{\phi} (t_{\text{пер}}^e + t_{\text{нов}}) + \sum n_{\text{ман}} t_{\text{ман}} \right] \times (1 + \rho_e), \quad (4)$$

де n_p – число составів за добу, що розформовують на витяжній колії; t_p – тривалість розформування состава, хв; n_{ϕ} – число составів за добу, що формують на витяжній колії; t_{ϕ} – тривалість формування состава, хв; $t_{\text{пер}}^e$ – час, який витрачають на підтягування вагонів і переставлення сформованого состава на відповідну колію, хв; $t_{\text{нов}}$ – час на повернення маневрового локомотива на витяжну колію; $n_{\text{ман}}$ – число маневрових на інших пересувань по витяжній колії; $t_{\text{ман}}$ – час зайняття витяжної колії маневровими (поїзними) переміщеннями, хв; ρ_e – коефіцієнт, що враховує відмови технічних пристроїв.

В результаті підстановки виразів (3) та (4) у (2) підсумкова формула, запропонована авторами [13], отримуємо

$$N_{\text{вир}} = \frac{n_{p,\phi} (1440\alpha_c - \sum T_{\text{пост}}^o)}{\mu_{\text{повт}}^c \left(\left[\sum n_p t_p + \sum n_{\phi} t_{\phi} + \sum n_{\phi} (t_{\text{пер}}^e + t_{\text{нов}}) + \sum t_{\text{ман}} n_{\text{ман}} \right] \times (1 + \rho_e) \right)}, \quad (6)$$

Аналіз виразів (1) та (6) показує, що на переробну спроможність сортувальної гірки та витяжної колії впливають відмови технічних пристроїв станції. Станція розглядається як складна динамічна система, надійність якої визначається надійністю її елементів. Виходячи з функціональної ознаки кожного технічного пристрою системи виділяються такі її елементи: колія, стрілочні переводи, локомотиви, вагони, пристрої зв'язку та СЦБ: електрична централізація стрілок та сигналів, механізація гальмування вагонів за допомогою сповільнювачів, гіркова автоматична централізація стрілок підгіркового парку, автоматизація гальмування; пристрої електропостачання на електрифікованих лініях.

Відмови пристроїв електричної централізації викликають: зупинки - при відмові одного з стрілочних переводів будь-якої ізолюваної ділянки пересування неможливе та одночасне використання решти стрілочних переводів цієї ізолюваної ділянки для інших пересувань до з'ясування причин; зниження швидкості транспортного потоку; перерви в русі поїздів, маневрових переміщеннях, розпуску вагонів з гірки.

Таким чином, відмови пристроїв СЦБ призводять до виникнення вимушених зупинок та не дозволяють повністю використовувати добовий період часу, що обмежує переробну спроможність сортувальних пристроїв.

Час усунення відмови стрілочного переводу визначається від моменту виникнення відмови до моменту поновлення стрілки, переводу вручну або використання електричної централізації (ЕЦ)

$$t_{\phi} = t_{\text{пр}} + t_{\text{вик}}, \quad (7)$$

де $t_{\text{пр}}$ – тривалість перерв у маневрових переміщеннях, розпуску вагонів з гірки із-за відмов пристроїв; $t_{\text{вик}}$ – період часу від моменту виключення стрілки з електричної централізації до повного усунення відмови. Якщо стрілочний перевід не був виключений з ЕЦ, то $t_{\text{вик}} = 0$, якщо стрілка залишається на ручному обслуговуванні то $t_{\text{вик}}$ додається у розрахунок.

Результати досліджень переробної спроможності сортувальних пристроїв. Для наочного представлення залежностей добової переробної спроможності сортувальної гірки та витяжної колії від коефіцієнта, що враховує відмови технічних пристроїв, за формулами (1) та (6) було виконано розрахунок при різних його значеннях (рис. 1, 2). Звертає на себе увагу той факт, що збільшення значення коефіцієнту, що враховує відмови технічних пристроїв, зменшує значення переробної спроможності незалежно від величини встановленої середньої тривалості гіркового технологічного інтервалу (з урахуванням часу на заїзд, насув, розпуск, формування, осаджування), як показано на рис. 1. Вочевидь, це пов'язано з тим, що тривалість перерв у маневрових переміщеннях та розпуску вагонів з гірки із-за відмов пристроїв додають додатковий час у цикл операцій по виконанню розформування – формування составів. Найбільше значення цього коефіцієнту подане у [14] становить 0,12. При

розрахунках та виконанні графічного аналізу за формулами (1) та (6) на рис. 1 та 2 було використано збільшення значення до 0,2 та 0,3 відповідно з ціллю глибшого вивчення цього питання.

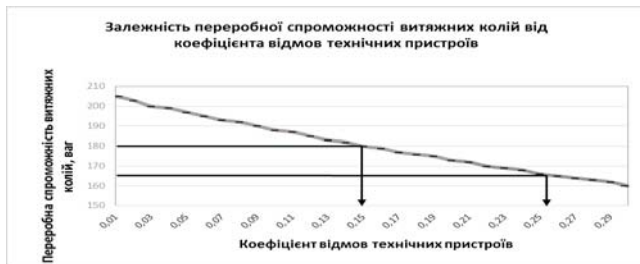


Рис. 1 – Залежність переробної спроможності сортувальних гірок від значення коефіцієнта відмов технічних пристроїв.

Подані дані з [14, 15] значення коефіцієнту, що враховує відмови технічних пристроїв ρ_e для витяжних колій є незмінною величиною - 0,01 та 0,03 відповідно, незалежно від значення переробної спроможності. Досвід показує, що відмови технічних пристроїв СЦБ виникають раптово та їх кількість за певний проміжок часу неможливо передбачити, але при більшій кількості виконаних рейсів та напіврейсів через витяжні колії й більшій кількості вагонів перероблених сортувальними пристроями, ймовірність виникнення відмов пристроїв сигналізації, централізації та блокування збільшується. Це дозволяє зробити висновок про змінність значення коефіцієнту, що враховує відмови технічних пристроїв як показано на рис. 2.

Використання незмінних коефіцієнтів ρ_e , які пропонуються в [14, 15] дають завищені значення переробної спроможності витяжних колій. Реальні значення становлять від 165 до 180 вагонів на добу, що відповідає інтервалу зміни коефіцієнта відмов технічних засобів від 0,15 до 0,25. Ці значення коефіцієнта є більш обґрунтовані, так як враховують не тільки відмову пристроїв гальмування, але й загальний стан верхньої будови колії, величину опору ізоляції, стабільну роботу засобів автоблокування.

Таблиця 1 – Економія експлуатаційних витрат, тис. грн.

Показник	N_p				
	21	22	23	24	25
E_{np}^I	838,85	878,80	918,75	958,70	998,64
E_{np}^{II}	699,13	732,43	765,72	799,01	832,31

Збільшення тривалості гіркового технологічного інтервалу пов'язане з простоем вагонів викликає зниження економії на 17 % по відношенню до 21 поїзда, та на 16,65 % по відношенню до 25 поїздів, що можуть бути розформовані за добу через ті ж самі сортувальні пристрої згідно річних підрахунків.

Вивчення цього питання дозволяє зробити певні прогнози. Для підвищення переробної спроможності сортувальних пристроїв важливе значення має підвищення надійності роботи пристроїв СЦБ, щоб не мати втрат часу в процесі розформування - формування та покращити якісні показники роботи станцій. Способи

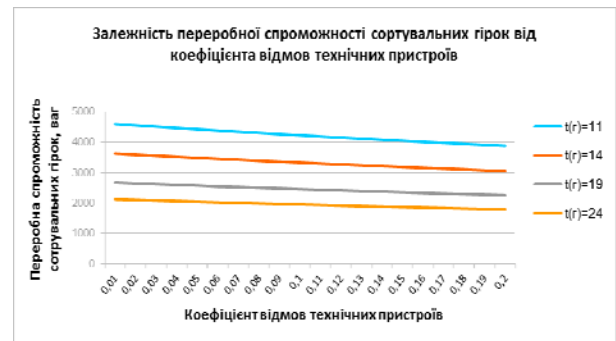


Рис. 2 – Залежність переробної спроможності сортувальних гірок від значення коефіцієнта відмов технічних пристроїв.

Для оцінки впливу відмов технічних пристроїв на собівартість вантажної роботи використаємо формулу із [3], де економія експлуатаційних витрат, пов'язаних з простоем вагонів, визначається

$$E_{np} = 0,365 * t_c * N_p * m_c * e_{ez}, \quad (8)$$

де t_c – середньозважена тривалість гіркового технологічного інтервалу год.; N_p – кількість поїздів, які надходять у розформування протягом доби; m_c – кількість вагонів в складі поїзда; e_{ez} – витрати на 1 вагоно-годину вагона вантажного парку, грн.

Розрахунки економії експлуатаційних витрат пов'язаних з простоем вагонів наведено в таблиці 1 за двома варіантами на прикладі інтервалу від 21 до 25 поїздів, що надходять у переробку до сортувальної станції, де перший варіант відображає експлуатаційні витрати при роботі технічних пристроїв без відмов, а другий варіант зі збільшеним технологічним інтервалом через відмову загального стану верхньої будови колії, опору ізоляції, не стабільну роботу засобів автоблокування та більшого значення коефіцієнту, що враховує відмови технічних пристроїв ρ_e .

підвищення надійності можна розглядати як заходи, спрямовані на збільшення безвідмовності й на підвищення відновлюваності. Запропоновано для виконання сортувальної роботи на сортувальних, вантажних та дільничних станціях підтримувати стан усіх елементи верхньої будови колії, серед яких є і щебеневий баластний шар і залізобетонні шпали у задовільному стані. Для оздоровлення верхньої будови колії ведеться очищення та підрізка баласту, очищення рейок, рейкових скріплень від забруднювачів, при необхідності заміна водовідводів на блок-ділянках, капітальний ремонт колії з метою заміни верхньої будови з

рейками, що пропустили нормативний тоннаж. Виконання подібних заходів хоча й підвищує ізоляцію рейкових кіл, але практично не впливає на покращення роботи автоблокування при неминучому зниженні пропускної здатності перегонів та станцій, викликаючи затримки поїздів і збільшуючи простої та зменшуючи оборот вагонів. Роботи з очищення щебеню вручну малопродуктивні та дорого коштують. Крім того, деяка кількість забруднювачів у ньому залишається або в процесі очищення потрапляє знову. Після звичайної промивки ступінь забруднення відпрацьованого баластного матеріалу знижується не менше ніж в 2 рази. Це зможе покращити показники, але враховуючи великі витрати коштів на заміну баласту при необхідності припинити рух на час проведення робіт і обмежити швидкість руху на час стабілізації баластної призми ефект втрачається через повторне забруднення. Цей метод дає поліпшення на деяких ділянках лише на обмежений час. Планова заміна щебеню відбувається кожні 10 років його експлуатації, при цьому замінюється від 50000 до 70000 м³ баластного щебеню при його вартості від 70 до 150 грн за 1 м³. У той же час вартість очищення 1 км становить для ЩОМ-6У 97 тис. грн, а для RM-80–110 тис. грн (у цінах станом на 13.10.2016 р.). Отже, зважаючи на велику собівартість робіт із заміни або очищення колійного щебеню, актуальною є розробка методів попередження його забруднення. У процесі експлуатації верхньої будови колії баластний шар та шпали поступово забруднюються [16, 17]. При цьому знижується здатність баластного шару відводити воду, яка потрапляє на верхню будову колії. Забруднення баласту та залізобетонних шпал різноманітними речовинами призводить до зниження питомого електричного опору баластного шару. Зниження значення питомого електроопору призводить до формування рейковим колом інформації типу «несправжня зайнятість», тобто до визначення ізолюваної рейкової лінії як зайнятої при фактичній вільності. Зниження цього опору призводить до відповідного збільшення блукаючих струмів та струмів витоку, які викликають корозію арматури та руйнування конструкцій. Забезпеченням надійної роботи рейкових кіл почали займатися ще у 60-ті роки, коли залізниці почали масово переходити з дерев'яних шпал на залізобетонні. У минулі роки, як і тепер, для забезпечення безвідмовної роботи рейкових кіл в період різкого зниження питомого опору баласту застосовується метод збільшення напруги джерел живлення. Але надмірне збільшення напруги джерел живлення може призвести до порушення шунтового і контрольного режимів роботи рейкових кіл. Якщо збільшенням напруги живлення відновити нормальну роботу систем СЦБ не вдасться, то таку ділянку вимикають, що накладає негативний відбиток на поїзний та маневровий роботі. На залізницях України електричний опір баласту і шпал рейкових кіл визначають вимірниками опору баласту, що дозволяє вимірювати питомий опір ізоляції без відключення діючих приладів рейкового кола. За значенням цих вимірів знаходять ділянки рейкового кола зі зниженим опором ізоляції.

Для підвищення зазначеного опору необхідно змінити електрофізичні властивості сипких матеріалів баластного шару та бетону шляхом нанесення на них покриттів з достатньо високим питомим електричним опором [16]. Як один із шляхів вирішення цієї проблеми може бути запропоновано покриття для обробки чистого щебеню перед його укладанням у колію під час ремонтів та компонентна добавка у склад бетону залізобетонних шпал для продовження термінів експлуатації баластного шару, попередження адгезійного забруднення та запобігання випадків несправжньої зайнятості рейкових кіл.

Висновки. Як виходить з одержаного вище, відмови пристроїв СЦБ на станціях не входять до значення коефіцієнту, що враховує відмови технічних пристроїв. Це дозволяє зробити висновок про можливість вдосконалення значення коефіцієнту, що враховує відмови технічних пристроїв, шляхом доопрацювання через параметри, які мають вплив на його значення й на показники переробної спроможності сортувальних пристроїв та перевірку змінності значення коефіцієнту, що враховує відмови технічних пристроїв, при маневрових переміщеннях через витяжні колії. Таким чином, забезпечення безперервної добової роботи залізничного транспорту та дотримання норм переробної спроможності сортувальних пристроїв при додержанні правил безпеки при маневрових переміщеннях можливо забезпечити шляхом підвищення надійності роботи пристроїв СЦБ, у тому числі за рахунок підвищення опору ізоляції рейкових кіл. Практично постійна наявність тонких мономолекулярних плівок води на поверхні частинок щебеню сприяє налипання забруднювачів. Тому для зменшення швидкості забруднення щебеневого баласту нами запропоновано метод обробки частинок щебеню гідрофобними речовинами з наступним відсипанням у баластну призму. Таке покриття підвищує електричний опір баластної призми та гідрофобність поверхонь частинок щебеню, що призводить до зменшення адгезії забруднювачів до нього. Для обробки частинок щебеню нами були використані бітум, силікон та спиртовий розчин каніфолі [18]. Результати дослідів показали, що найнижчу електричну провідність має щебінь, оброблений каніфольним покриттям. У порівнянні з необробленим щебенем електрична провідність зменшилась у 7,7 рази. Найкращу гідрофобізуючу дію має покриття на основі силікону, про що свідчить значення крайового кута змочування.

Список літератури:

1. Про схвалення Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1555-2009-p>
2. Галузеві будівельні норми України. Споруди транспорту. Сортувальні пристрої залізниць. Норми проектування ГБН В.2.3-37472062-1:2012 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=66056
3. Журавель, В. В. Дослідження впливу реконструкції витяжних колій на ефективність функціонування сортувальної станції [Текст] / В. В. Журавель, А. І. Маслюк, І. Л. Журавель // Збірник наукових праць ДНУЗТ. Транспортні системи та технології перевезень. – 2013. – № 5. – С. 23–27.

4. *Болвановська, Т. В.* Розрахунок переробної спроможності сортувальних комплексів [Текст] / *Т. В. Болвановська* // Збірник наукових праць ДНУЗТ. Транспортні системи та технології перевезень. – 2014. – № 8. – С. 27–34.
 5. *Козаченко, Д. М.* Дослідження впливу швидкості розпуску составів на переробну спроможність сортувальних гірок [Текст] / *Д. М. Козаченко, І. Ю. Левицький, Т. В. Болвановська* // Вісник ДНУЗТ. – 2014. – № 41. – С. 61–63.
 6. *Anderson, E. P.* Overcoming capacity constraints on Chinese railways [Electronic resource] / *E. P. Anderson*. – Available at: <http://siteresources.worldbank.org/INTTRANSPORT/Resources/336291-1119275973157/td-rw7.pdf>
 7. *Dahlhaus, E.* The train marshalling problem [Text] / *E. Dahlhaus, P. Horak, M. Miller, J. F. Ryan* // *Discrete Applied Mathematics*. – 2000. – № 103 (1-3). – P. 41–54. doi: [10.1016/S0166-218X\(99\)00219-X](https://doi.org/10.1016/S0166-218X(99)00219-X)
 8. *He, S.* An integrated dispatching model for rail yards operations [Text] / *S. He, R. Song, S. S. Chaudhry* // *Computers & Operations Research*. – 2003. – № 30. – P. 939–966. doi: [10.1016/S0305-0548\(02\)00064-3](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00064-3)
 9. *Jing, Y., Wang, C., Li, Z., Xue, F.*, Model and algorithm of dynamic wagon-flow allocation on uncertainty conditions [Text] / *Y. Jing, C. Wang, Z. Li, F. Xue* // 2009 Second International Symposium on Computational Intelligence and Design. – 2009. doi: [10.1109/iscid.2009.145](https://doi.org/10.1109/iscid.2009.145)
 10. *Lin, E.* Simulation and analysis of railroad hump yards in North America [Text] / *E. Lin, C. Cheng* // Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC). – 2011. doi: [10.1109/wsc.2011.6148064](https://doi.org/10.1109/wsc.2011.6148064)
 11. *Dalal, M. L.* Simulation modelling at Union Pacific Railroad [Text] / *M. L. Dalal, L. P. Jensen* // Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference (Cat. No.01CH37304). – 2001. doi: [10.1109/wsc.2001.977413](https://doi.org/10.1109/wsc.2001.977413)
 12. *Stanić M.* Model for the optimization of technology and capacity in marshalling station [Text] / *M. Stanić, G. Stojić, I. Tanackov, D. Aleksić* // 20th International scientific conference “TRANSPORT 2011”. – 2011. – № 3. – P. I-36–I-45. Available at: http://www.mtc-aj.com/conf_2011/dok_511.pdf
 13. *Берестов І.В.* Залізничні станції та вузли [Текст]: навч. пос. / *І. В. Берестов, Г. В. Шаповал, М. Ю. Куценко, М. В. Баздыр, М. М. Божко, Н. І. Дробаха, І. О. Забіяка, Л. П. Мусій, В. О. Сафонов*. – Харків, 2012. – 464 с.
 14. *Акулиничев В. М.* Железнодорожные станции и узлы [Текст]: учеб. для вузов / *В.М. Акулиничев, Н.В. Правдин, В.Я. Болотный, И.Е. Савченко*. – Москва: Транспорт, 1992. – 480 с.
 15. *Негрей, В. Я.* Пропускная и перерабатывающая способность сооружений и устройств железнодорожного транспорта [Текст]: учеб.-метод. пос. / *В. Я. Негрей, В. А. Подкопаев, Е. А. Филатов, В. С. Могил, К. Р. Байков*. – Гомель: БелГУТ, 2013. – 183 с.
 16. *Trykoz, L. V.* Investigation into Electrical Conductivity of the Multicomponent System of Trackbed [Text] / *L. V. Trykoz, I. V. Bagiyanc, V. Yu. Savchuk, O. M. Pustovoitova, S. M. Kamchatnaya, O. S. Saiapin* // *International Journal of Engineering Research in Africa*. – 2016. – Vol. 25, – P 52–57. doi: [10.4028/www.scientific.net/jera.25.52](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/jera.25.52)
 17. Impact of the type of a contaminant on electric resistance of treated track ballast [Text] / *L. Trykoz, I. Bagiyanc* // *Technika Transportu Szynowego*. – 2016. – № 23. – P. 38–40.
 18. *Трикоз, Л.В.* Розробка методу підвищення надійності баластної призми шляхом збільшення терміну її служби / *Л. В. Трикоз, С. В. Романович, І. В. Багіянц* // Залізничний транспорт України. – 2016. – № 5/6. – С. 16–22.
- Bibliography (transliterated):**
1. Pro shvalennya strategiyi rozvitu zaliznichnogo transportu na period do 2020 roku. Available at: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1555-2009-p>
 2. Galuzevi budivelni normi Ukrayini. Sporudi transportu. Sortovalni pristroyi zaliznits. Normi proektuvannya GBN V.2.3-37472062-1:2012. Available at: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=66056
 3. *Zhuravel, V. V., Maslyuk, A. I., Zhuravel, I. L.* (2013). Doslidzhennya vplyvu rekonstruktsiyi vityazhnih kolyi na efektyvni funktsionuvannya sortovalnoyi stantsiyi. Zbirnik naukovih prats DNUZT. Transportni sistemi ta tehnologiyi perevezenn, 5, 23–27.
 4. *Bolvanovska, T. V.* (2014). Rozrahunok pererobnoyi spromozhnosti sortovalnih kompleksiv. Zbirnik naukovih prats DNUZT. Transportni sistemi ta tehnologiyi perevezenn, 8, 27–34.
 5. *Kozachenko, D. M., Levitskiy, I. Yu., Bolvanovska, T. V.* (2012). Doslidzhennya vplyvu shvidkosti rozpusku sostaviv na pererobnu spromozhnist sortovalnih girok. Visnyk DNUZT, 41, 61–63.
 6. *Anderson, E. P.* (1993). Overcoming capacity constraints on Chinese railways. Available at: <http://siteresources.worldbank.org/INTTRANSPORT/Resources/336291-1119275973157/td-rw7.pdf>
 7. *Dahlhaus, E., Horak, P., Miller, M., Ryan, J. F.* (2000). The train marshalling problem. *Discrete Applied Mathematics*, 103 (1-3), 41–54. doi: [10.1016/S0166-218X\(99\)00219-X](https://doi.org/10.1016/S0166-218X(99)00219-X)
 8. *He, S., Song, R., Chaudhry, S. S.* (2003). An integrated dispatching model for rail yards operations. *Computers & Operations Research*, 30 (7), 939–966. doi: [10.1016/S0305-0548\(02\)00064-3](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00064-3)
 9. *Jing, Y., Wang, C., Li, Z., Xue, F.* (2009). Model and Algorithm of Dynamic Wagon-flow Allocation on Uncertainty Conditions. 2009 Second International Symposium on Computational Intelligence and Design. doi: [10.1109/iscid.2009.145](https://doi.org/10.1109/iscid.2009.145)
 10. *Lin, E., Cheng, C.* (2011). Simulation and analysis of railroad hump yards in North America. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC). doi: [10.1109/wsc.2011.6148064](https://doi.org/10.1109/wsc.2011.6148064)
 11. *Dalal, M. A., Jensen, L. P.* (2001). Simulation modeling at Union Pacific Railroad. Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference (Cat. No.01CH37304). doi: [10.1109/wsc.2001.977413](https://doi.org/10.1109/wsc.2001.977413)
 12. *Stanić, M., Stojić, G., Tanackov, I., Aleksić, D.* (2011). Model for the optimization of technology and capacity in marshalling station. 20th International scientific conference “TRANSPORT 2011”, 3, I-36–I-45. Available at: http://www.mtc-aj.com/conf_2011/dok_511.pdf
 13. *Berestov, I. V., Shapoval, H. V., Kutsenko, M. Iu., Bazdyr, M. V., Bozhko, M. M., Drobakha, N. I., Zabiakha, I. O., Musii, L. P., Safonov, V. O.* (2012). Zaliznychni stantsii ta vuzly. Kharkiv, 464.
 14. *Akulichev, V. M., Pravdin, N. V., Bolotnyy, V. Ya., Savchenko, I. E.* (1992). Zheleznodorozhnyie stantsii i uzlyi. Moscow: Transport, 480.
 15. *Negrey, V. Ya., Podkopaev, V. A., Filatov, E. A., Mogila, V. S., Baykov, K. R.* (2013). Propusknaya i pererabatyvayuschaya sposobnost sooruzheniy i ustroystv zheleznodorozhnogo transporta. Gomel: BelGUT, 183.
 16. *Trykoz, L. V., Bagiyanc, I. V., Savchuk, V. Y., Pustovoitova, O. M., Kamchatnaya, S. M., Saiapin, O. S.* (2016). Investigation into Electrical Conductivity of the Multicomponent System of Trackbed. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 25, 52–57. doi: [10.4028/www.scientific.net/jera.25.52](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/jera.25.52)
 17. *Trykoz, L., Bagiyanc, I.* (2016). Impact of the type of a contaminant on electric resistance of treated track ballast. *Technika Transportu Szynowego*. 23, 38–40.
 18. *Trykoz, L. V., Romanovych, Ie. V., Bahians, I. V.* (2016). Rozrobka metodu pidvyshchennia nadiinosti balastnoi pryzmy shliakhom zbilshennia terminu yii sluzhby. *Zaliznychny transport Ukrainy*, 5/6, 16–22.

Поступила (received) 26.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Змінення переробної спроможності сортувальних пристроїв через надійність характеристик верхньої будови колії/ Л. В. Трикоз, І. В. Багіянц // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.68–74. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-5459.

Изменение перерабатывающей способности сортировочных устройств от надежности характеристик верхнего строения пути/ Л. В. Трикоз, И. В. Багианц // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.68–74. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-5459.

Change the capacity classification yard equipment through reliability features of permanent way/ L. V. Trykoz, I. V. Bagiyanc // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P. 68–74. – Bibliogr.: 18. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Трикоз Людмила Вікторівна – доктор технічних наук, професор кафедри «Будівельні матеріали, конструкції та споруди», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, м. Харків, Україна, 61050.

Багианц Ірина Вікторівна – інженер, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, м. Харків, Україна, 61050.

Трикоз Людмила Викторовна – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные материалы, конструкции и устройства», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, г. Харьков, Украина, 61050.

Багианц Ирина Викторовна – инженер, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, г. Харьков, Украина, 61050.

Trykoz Liudmyla – Doctor of Technical Sciences, professor Department of Building Materials, Constructions and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport; sq. Feyerbach, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050.

Bagiyanc Irina – engineer, Ukrainian State University of Railway Transport, sq. Feyerbach, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050.

УДК 621.7.047.7

С. Л. НЕГРУБ, Є. Г. ВОЛОДЬКО

ОГЛЯД ДОСЯГНЕНЬ В ОБЛАСТІ ЕЛЕКТРОЛІТНО-ПЛАЗМОВОГО ПОЛІРУВАННЯ ВИРОБІВ З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

У даному огляді систематизовані відомості про сучасний метод фінішної обробки поверхні виробів із титанових сплавів – електролітно-плазмове полірування (ЕПП). Розглянуті дослідження технології, механізм формування поверхневого шару при обробці, система електроліт-плазма-метал та її особливості, основні уявлення про процес ЕПП та його механізми, проведений порівняльний аналіз наукових досягнень електролітно-плазмове полірування поверхні сталевих та титанових виробів (електроліти, режими, шорсткість поверхні), проаналізована практика електролітно-плазмове полірування.

Ключові слова: електроліт, плазма, розряд, полірування, технологічний процес, шорсткість поверхні, вольтамперна характеристика, парогозова оболонка.

В данном обзоре систематизированы сведения о современном методе финишной обработки поверхности изделий из титановых сплавов – электролитно-плазменном полировании (ЭПП). Рассмотрен ход исследований по данному вопросу, основные представления о процессе ЭПП и его механизме, механизм формирования поверхностного слоя при обработке, система электролит-плазма-металл и его особенности, проведен сравнительный анализ научных достижений электролитно-плазменного полирования поверхности стальных и титановых изделий (электролиты, режимы, шероховатость поверхности), проанализирована практика электролитно-плазменного полирования.

Ключевые слова: электролит, плазма, разряд, полирование, технологический процесс, шероховатость поверхности, вольтамперная характеристика, парогозовая оболочка.

In this review, systematic information on the current method of surface finishing products from titanium alloys – electrolytic-plasma polishing (EPP). Reviewed the research on the subject, basic representation of the process EPP and its mechanism, mechanism of surface layer formation during processing, electrolyte-plasma-metal system and its features, carried out comparative analysis of scientific achievements EPP surface of steel and titanium products (electrolytes, regimes, surface roughness), was analyzed practice of electrolytic-plasma polishing. It is shown that, due to lack of experimentally justified scattering ability of the electrolyte at EPP, caring out complex experimental studies of the effect of EPP on such operational characteristics of the surface as corrosion resistance, resistance to intergranular corrosion, coefficient of friction, adhesion strength of galvanic and vacuum-plasma coatings will significantly expand the scope of the application of EPP technologies, nomenclature of processed alloys and increase the reliability of parts and assemblies for various purposes.

Keywords: electrolyte, plasma, discharge, polishing process, the surface roughness, the current-voltage characteristics, vapor-gas shell.

Вступ. В умовах сучасного рівня розвитку машинобудування однією з основних проблем, що вирішуються на етапі виготовлення деталей різного призначення, є забезпечення стабільно високої якості оброблених поверхонь. Якість, надійність і довговічність виробів істотно залежать від ступеня досконалості застосовуваних при їх виробництві технологій фінішної обробки, що формують якість поверхні. З вітчизняного та закордонного досвіду відомо, що

трудомісткість фінішних операцій в об'ємі загальної трудомісткості виготовлення деталей може перевищувати 20 %. Складність і різноманіття форм оброблених поверхонь ускладнюють створення універсальних способів фінішної обробки. У вітчизняній і світовій практиці при виконанні обробно-зачистної обробки застосовується широкий арсенал методів механічної і фізико-технічної обробки: методи обробки лезовими інструментами, пов'язаними й вільними

© С. Л. Негруб, Є. Г. Володько. 2017

абразивами, методи поверхневого пластичного деформування, електрохімічні методи, в тому числі хімічне (ХП) і електрохімічне (ЕХП) полірування, а також комбіновані методи, зокрема, методи, засновані на поєднанні механічного впливу абразивного матеріалу з хімічним або електрохімічним впливом робочого розчину. Однак відомі методи фінішної обробки, що дозволяють забезпечити шорсткість поверхні в широкому діапазоні значень (від Ra 1,60 мкм до Ra 0,012 мкм), мають ряд таких суттєвих недоліків, як багатостадійність і велика трудомісткість обробки при підвищених вимогах до якості поверхні, ускладненість обробки виробів складної конфігурації при високих вимогах до точності, формування в процесі обробки дефектного поверхневого шару, негативного впливу на фізико-механічні властивості поверхні та інші.

Одним з перспективних методів фінішної обробки поверхні металевих виробів є електролітно-плазмове полірування (ЕПП), яке відрізняється від інших електрохімічних методів обробки стабільністю процесу, високою якістю, продуктивністю і низькою собівартістю обробки, можливістю повної автоматизації процесу і екологічною безпекою. В даний час ЕПП застосовується для фінішної обробки переважно зовнішніх поверхонь виробів різноманітного призначення, забезпечуючи зниження шорсткості рівня Ra 0,32–0,06 мкм, для видалення задирок і округлення гострих кромки, підготовки поверхні виробів під нанесення гальванічних і вакуумно-плазмових покриттів, видалення оксидних плівок, окалини невеликої товщини і дефектних вакуумно-плазмових покриттів, а також для очищення поверхні деталей від мінеральних і органічних забруднень.

Останнім часом питанням, пов'язаним із дослідженням і впровадженням у виробництво методу ЕПП, приділяється велика увага в Білорусі, Болгарії, Німеччині, Китаї, Нідерландах, Росії, Словаччині, США, Україні та інших країнах. Разом з тим, незважаючи на значний обсяг досліджень фізико-хімічних і технологічних аспектів процесу ЕПП, проведених вченими різних шкіл, і великої кількості наукових публікацій і патентів, широке впровадження методу в промислових масштабах для фінішної обробки виробів з титану й титанових сплавів стримується. Це відбувається через відсутність високоефективних технологій і технологічного обладнання, яке б вироблялось серійно. Крім цього ця ситуація пов'язана з недостатньою вивченістю фізико-хімічних процесів, що протікають на оброблюваній поверхні і в парогазовій оболонці (ПГО), механізмів та основних закономірностей електропровідності ПГО, знімання металу, згладжування шорсткості поверхні, формування топографії, впливу технологічних режимів ЕПП на точність, продуктивності обробки, якості, механічні властивості і експлуатаційні характеристики поверхні деталей [1].

Аналізу останніх досягнень у технології ЕПП, зокрема поліруванню поверхні виробів, виготовлених із титану та титанових сплавів присвячена дана робота.

Стан досліджень в області електролітно-плазмової обробки. В роботі [2] проведене дослідження електролітно-плазмового полірування з

вивченням впливу різних температур і концентрацій електроліту при електролітно-плазмовій обробці на склад, структуру і властивості нержавіючої сталі. В роботі [3] наводиться фізико-хімічна модель утворення й розвитку парової плівки в процесі електролітно-плазмового полірування, пояснюється механізм і суть процесу згладжування мікро-шорсткості металевої поверхні. Схематично розглянуті етапи, що перебігають під час обробки – від виникнення парової бульбашки до її схлопування і видалення мікро-виступів з поверхні деталі. В роботі [4] представлені підходи до управління технологічними процесами електролітно-плазмової обробки на основі пасивної ідентифікації властивостей поверхневого шару. Розглянуто методику статистичного спектрального аналізу струму електролізера, що дозволяє виявляти приховані закономірності зміни інформативних параметрів, корельовані з динамікою стану поверхні.

В області вивчення процесів електролітно-плазмового полірування досягнуті значні результати за технологією отримання поверхні високої якості: підібрані екологічно допустимі та ефективні електроліти та встановлені їх концентрації [5, 6], виявлені діапазони робочих напруг на електродах і температури електролітів [7, 8], запатентовані і випускаються установки різної потужності для проведення ЕПП [9–11]. Незважаючи на велику кількість переваг процесу ЕПП в порівнянні з традиційно застосовуваними в промисловості способами полірування, для широкого впровадження у виробництво необхідно підвищувати надійність систем ЕПП, наприклад, за рахунок зниження відсотку браку, покращувати економічні показники, наприклад, за рахунок зменшення енергоємності процесу.

Дослідження вказують на складність і не лінійність процесу ЕПП. У табл. 1 вказані провідні наукові центри, що мають великий досвід досліджень в області вивчення, діагностики та управління процесами ЕПП і спорідненими процесами.

Серед переваг ЕПП – відсутність сторонніх включень на поверхні металу, мінімальна шорсткість і електрохімічна однорідність поверхневого шару. Це забезпечує високу корозійну стійкість і декоративний блиск металовиробів. Процес електролітно-плазмового полірування застосовується для обробки: нержавіючих сталей типу 20Х13 [12]; низьковуглецевих сталей, наприклад, сталі 30ХГСА, використовуваної для виготовлення лопаток ГТД [13]; жароміцних сплавів, таких як ЕП-718 [14]; титанових сплавів ВТ6, ВТ14, ВТ3-1, ВТ22 [15].

Перспективні розробки способів електролітно-плазмового полірування для авіаційних конструкційних матеріалів, таких як нікелеві та титанові сплави представлені в роботах [14–17].

За допомогою ЕПП можна отримати дзеркальну поверхню з шорсткістю Ra аж до 0,04 мкм, проте не вище, ніж на 2-3 класи в порівнянні з шорсткістю до полірування [18]. Для сплавів ВТ3, ВТ3-1, ВТ6 - ЕПП дозволяє досягти шорсткість поверхні на рівні Ra 0,04–0,06 мкм [15].

Аналіз патентної бази показав велику кількість патентів по створенню та модифікації установок ЕПП,

а також електролітів для титану та титанових сплавів. патентів для обробки титану та титанових сплавів, Електроліти та режими, рекомендовані авторами наведені у табл. 2.

Таблиця 1 – Провідні наукові центри та напрямки проведених ними досліджень в області вивчення, діагностики та управління процесами електролітно-плазмової обробки (ЕПО) і спорідненими процесами механічної та фізико-технічної обробки

Науковий центр, місто	П.І.Б. дослідників	Напрями досліджень і досягнуті результати	Публікації
Вивчення фізико-хімічних і технологічних особливостей процесів ЕПП			
НАН Білорусі, Мінськ	Куликов І. С., Ващенко С. В. та ін.	Розроблено теоретичні основи процесів ЕПП, випускаються промислові установки	[5]
БНТУ, Мінськ	Синькевич Ю. В., Янковський І. М. та ін.	Досліджено фазовий склад і мікроструктура поверхні після ЕПП в різних електролітах, запропонована фізико-хімічна модель ЕПП, впроваджені у виробництво обладнання та технологія ЕПП	[19, 20]
ТГУ, Тольятті	Чиркунова Н. В., Воленко А. П., Бойченко О. В. та ін.	Досліджено нано- та мікророзмірні утворення на поверхні металів при ЕПП. Розроблено режими згладжування поверхні нержавіючих сталей	[18, 21]
БНТУ, Сморгонь	Кособуцький А. А. та ін.	Досліджено технологічні процеси ЕПП, випускаються промислові установки	[22, 23]
СПбГТУ, Санкт-Петербург	Ушомирська Л. А., Локтев Д. С., Новіков В. І. та ін.	Оптимізовано і впроваджені в промисловість процеси ЕПП сталевих виробів	[6,13,24]
УГАТУ, Уфа	Амирханова Н. А., Смислів А. М., Смислова М. К., Мінгажев А. Д., Бибін А.А. та ін.	Розроблено теоретичні основи електролітно-плазмових процесів полірування сталевих і титанових виробів, впроваджені в промисловість процеси ЕПП деталей енергомашин	[14, 15, 17, 25]
МАТІ, Москва	Людин В. Б., Сумін І. В., Епельфельд А. В., Крит Б. Л., Борисов А. М. та ін.	Розроблено системи управління і автоматизації технологічного обладнання для процесу мікродугового оксидування	[26, 27]
СПбГТУ, Санкт-Петербург	Новіков В. І. та ін.	Побудована оптимізаційна модель керуючих параметрів процесу ЕПП	[24]
Діагностика і керування процесом ЕПП та спорідненими електрохімічними процесами			
Київ	Черненко В. І., Сніжко Л. А., Папанова В. І. та ін.	Розроблено підхід до управління станом поверхні в ході плазмового електролітичного оксидування за рахунок регулювання частоти і скрізності імпульсів напруги.	[28]
КНАГТУ, Комсомольськ-на-Амурі	Сарілов М. Ю., Кабалдін Ю. Г.	Розробка адаптивної системи управління електроерозійним верстатом, побудована на основі принципів штучного інтелекту	[29, 30]
УГАТУ, Уфа	Горбатков С. А., Невьянцева Р. Р., Парфьонов Є. В. та ін.	Розроблено спектральні методи діагностики неспостережуваних параметрів процесів ЕПО, запропонований метод термінального управління технологічним процесом ЕПО	[8, 31–34]
УГАТУ, Уфа	Мукаєва В. Р.	Запропоновано метод оптимального управління ТП ЕПП. Досліджено імпедансні спектри процесу ЕПП. Розроблено способи непрямого вимірювання шорсткості в ході обробки.	[35]

Таблиця 2 – Електроліти та режими ЕПП титану та титанових сплавів

№	Марка матеріалу	Склад електроліту	Анод (+)	Катод (-)	Температура електроліту, °С	Робоча напруга, В	Джерело
1	Титанові сплави ВТ3-1, ВТ6	Водний розчин Na_2SiF_6 (водний розчин солі борфтористоводневої, гексафтортитанової або плавикової кислоти)	деталь	електроліт	50-65	20-500 [50-400] {18-520}	Патент RU 2355829C2 Патент RU 2357019C2
2	Титанові сплави ВТ-1, ВТ-5, ВТ6, ВТ14, ВТ3-1, ВТ22	Водний розчин солі борфтористоводневої, кремнійфтористої або плавикової кислоти (NH_4BF_4 ; Na_2SiF_6).	деталь	електроліт	50-65	15-540	Патент RU 235019C2
3	Титан, Титанові сплави	Водний розчин солі борфтористоводневої, кремнійфтористої, гексафтортитанової або плавикової кислоти	деталь	електроліт	60-90	I. 120-170 II. 210-350	Патент RU 2007 123 85 0 А Патент RU 2373306C2
		Водний розчин NH_4F 2–3 %					
		В електроліт додатково вводять ПАР 0,4–0,8 %					
		В електроліт додатково вводять TiF_4 0,3–0,8 %					
4	Титан, Титанові сплави	Водний розчин борфтористоводневої, кремнійфтористої, гексафтортитанової або плавикової кислоти	деталь	електроліт	60-90	I. 120-170 II. 210-350 III. 210-350	Патент RU 2007 123 85 0 А Патент RU 2 373 306 C2
		Водний розчин NH_4F 2–3 %					
		В електроліт додатково вводять ПАР 0,4–0,8 %					
		В електроліт додатково вводять TiF_4 0,3–0,8 %					
5	Титан, Титанові сплави	Водний розчин борфтористоводневої, кремнійфтористої, гексафтортитанової або плавикової кислоти	деталь	електроліт	60-90	I. 120-170 II. 210-350 III. 210-350 IV. 210-350	Патент RU 2007 123 85 0 А Патент RU 2 373 306 C2
		Водний розчин NH_4F 2–3 %					
		В електроліт додатково вводять ПАР 0,4–0,8 %					
		В електроліт додатково вводять TiF_4 0,3–0,8 %					
6	ВТ-1, ВТ3-1, ВТ6	Водний розчин борфтористоводневої, кремнійфтористої, гексафтортитанової або плавикової кислоти (NH_4BF_4 ; Na_2SiF_6)	деталь	електроліт	80-85	I. 150-180 II. 310-360	Патент RU 2 373 306 C2
7	ВТ-1, ВТ3-1, ВТ6	Водний розчин борфтористоводневої, кремнійфтористої, гексафтортитанової або плавикової кислоти (NH_4BF_4 ; Na_2SiF_6)	деталь	електроліт	60-90	I. 120-170 II. 210-350 III. 210-350 IV. 210-350	Патент RU 2 373 306 C2

Особливості фізико-хімічних процесів електролітно-плазмового полірування титану. У процесі кипіння гідратовані молекули беруть участь в обміні іонами з молекулами парової фази, що сприяє переносу окремих іонів розчину в оболонку (рис. 1, а).

Під парової плівкою в даному випадку розуміється суміш рідкого і пароподібного електроліту, іонів і електронів розчинених речовин в електроліті, аніонів металеві деталі, а також присутність бульбашок з газом. Газ, що міститься всередині бульбашок, швидше

за все, складається з суміші кисню й водню (O_2 , H_2 , N_2).

Паралельно йде процес відриву бульбашок від поверхні анода. Утворення електропровідності в анодній паровій оболонці пояснюється емісією аніонів розчину в оболонку і їх концентрацією навколо бульбашок газу (OH^- , F^- , O^{2-}). У парогазовій оболонці також присутні електрони, іони електроліту і анода (H^+ , Ti^{2+}).

При значних напругах поверхня бульбашки отримує значний негативний заряд, обумовлений підвищеною концентрацією аніонів, внаслідок чого

внутрішній вміст бульбашки іонізується під дією високої локальної напруженості поля між позитивно зарядженою поверхнею анода і негативно зарядженою

поверхнею бульбашки, і усередині бульбашки утворюється високотемпературна плазма, яка оплавляє верхній шар поверхні анода.

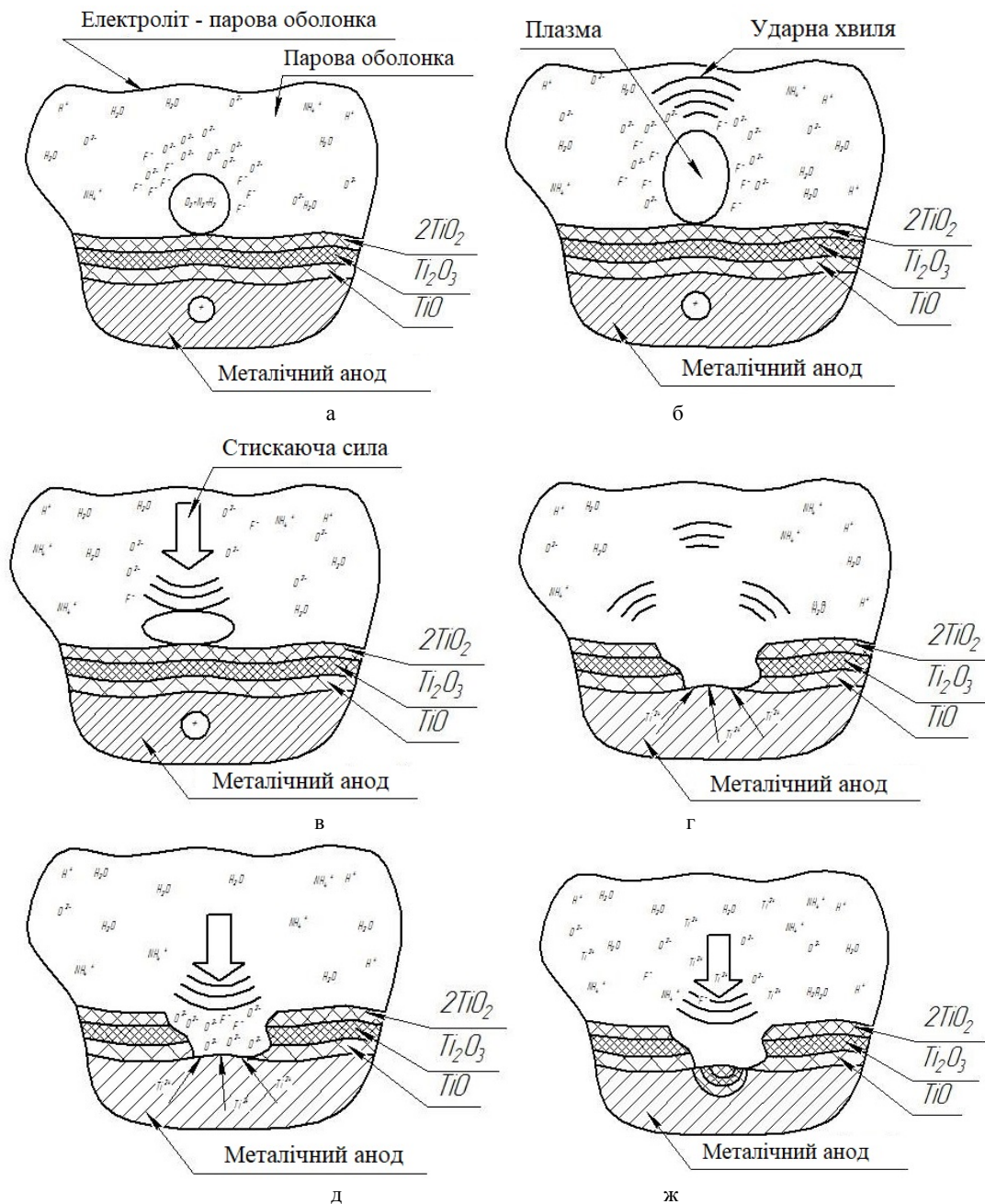


Рис. 1 – Схема процесів при ЕПП титану: а – перенос окремих іонів розчину в оболонку; б – бульбашка газу миттєво розширюється; в – залишкова енергія відбивається від межі «пар-електроліт» і з великим тиском стискає бульбашку газу, викликаючи її схлопування; г – схлопування бульбашки після моменту екранування ударної хвилі від межі «пар-електроліт»; д – у порожнечу потрапляють іони і аніони, які були присутні в паровій плівці; ж – взаємодія аніонів з поверхнею анода

Передбачається, що відбувається оплавлення оксидної плівки, внаслідок чого поверхня металу не піддається впливу високотемпературної плазми. Внаслідок високої температури, бульбашка газу миттєво розширюється (рис. 1, б). На розширення бульбашки також впливає електричне поле, яке поляризує простір усередині нього і подовжує його, надаючи йому форму еліпсоїда з великою напіввіссю, спрямованої по полю [6]. Зростаючи, бульбашка газу створює високу ударну хвилю, енергія якої частково розсіюється

в електроліті, а залишкова енергія відбивається від межі «пар-електроліт» і з великим тиском стискає бульбашку газу, викликаючи її схлопування (рис. 1, в).

Критерієм схлопування бульбашки буде умова, коли сили, що прагнуть стиснути бульбашку (ударна хвиля, тиск парів всередині парової плівки), подолують сили, що розширюють бульбашку (сила поверхневого натягу прагне відновити первинну сферичну форму бульбашки; великий тиск усередині бульбашки, пов'язаний з виникненням високотемпературної

плазми, а також розтягуюча сила під дією високого електричного поля). Схлопування бульбашки відбувається після моменту екранування ударної хвилі від межі «пар-електроліт» (рис. 1, г). При схлопуванні бульбашки відбувається процес, подібний до явища кавітації. У порожнечу потрапляють іони і аніони, які були присутні в паровій плівці, що переносяться на поверхню анода під дією електричного поля і ефектом ударної хвилі, яка встигла відбитися від кордону розділу електроліту і парової фази (рис. 1, д).

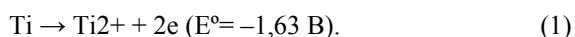
Емісія іонів з поверхні анода повинна відбуватися на вершинах мікро-збурення, в яких досягається найвища величина електричного поля. Взаємодія аніонів з поверхнею анода призводить до утворення оксидної плівки (рис. 1, ж).

Після схлопування бульбашки з газом і бомбардуванням анода аніонами, раніше оточуючими його поверхню, в утворену порожнину потрапляють крапельки електроліту, і відбувається їх контакт з поверхнею анода, що вносить свою часткову роль у формуванні оксидної плівки. Причиною розпилення електроліту може виявитися бомбардування його поверхні іонами титану. Час робочого циклу однієї «робочої» бульбашки і, відповідно, час її життя становить тисячні частки секунди (10–6–10–5с).

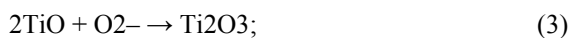
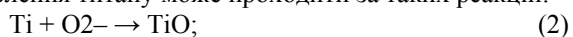
В електролітах, що містять іони фтору, як відомо, відбувається сильне розчинення титану, тому до складу електроліту входить NH_4F і KF .

Також встановлено, що теоретично розраховану кількість електроенергії на процес синтезу TiO_2 набагато перевищує реально витрачений.

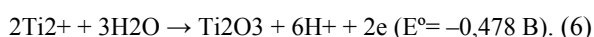
Для окислення 0,45 мкг титану необхідно 0,3 мкг кисню, на анодний синтез якого за законом Фарадея має бути витрачено 3,6 Кл. Хімічне розчинення титану відбувається поряд з електрохімічним синтезом діоксиду титану [36]:



Відповідно до загальноприйнятого механізму окислення титану може проходити за таких реакцій:



Реакції електрохімічного утворення плівок оксиду титану [36]:



Висновки. У багатьох роботах відзначено, що при ЕПП на точність обробки істотний вплив має самоорганізований або примусовий рух електроліту і його розсіювальна здатність, під якою розуміють ступінь рівномірності розподілу електричного струму на оброблюваній поверхні. Однак вплив міжелектродної відстані, геометричної форми електролітичної ванни, розташування оброблюваних заготовок одна

відносно одної і щодо стінок ванни на точність обробки, незважаючи на науково-практичну значимість цих факторів, до теперішнього часу не досліджені. В підсумку, внаслідок нестачі експериментально обґрунтованих даних про розсіювальну здатність електроліту при ЕПП деталей з високими вимогами до точності розмірів доводиться використовувати складну технологічну оснастку, що значно знижує продуктивність і підвищує вартість обробки.

Дослідження впливу ЕПП на експлуатаційні характеристики поверхні деталей зі сплавів на основі титану має важливе науково-практичне значення. Проведення комплексних експериментальних досліджень впливу ЕПП на такі експлуатаційні характеристики поверхні, як корозійна стійкість, стійкість проти міжкристалітної корозії, коефіцієнт тертя, адгезійну міцність гальванічних і вакуумно-плазмових покриттів дозволить значно розширити сферу застосування технологій ЕПП, номенклатуру оброблюваних сплавів і підвищити надійність деталей і вузлів різного призначення.

З огляду на те, що ПГО є динамічно стійкою системою з середньою товщиною, порівняною з висотою профілю поверхні, можна припустити, що пробій ПГО може відбутись з однаковою ймовірністю як на виступах, так і в западинах профілю оброблюваної поверхні в області випадкових неоднорідностей електричного поля. З цих причин, а також у зв'язку з відсутністю теоретичного й експериментального обґрунтування наведених вище гіпотез про механізм згладжування шорсткості поверхні в умовах ЕПП адекватність запропонованих гіпотез викликає сумнів. Шорсткість поверхні є однією з основних геометричних характеристик якості поверхні деталей і значно впливає на її експлуатаційні характеристики. З цієї причини розробка теорії формування топографії в умовах ЕПП, що враховує весь комплекс наведених вище чинників, має важливе науково-практичне значення.

Список літератури:

1. Силькевич, Ю. В. Электроимпульсное полирование на основе железа, хрома и никеля [Текст] / Ю. В. Силькевич, В. К. Шелег, И. Н. Янковский, Г. Я. Беляев. – Минск: БНТУ, 2014. – 324 с.
2. Ильющенко, А. Ф. Исследование влияния различных температур и концентраций электролита при электролитно-плазменной обработке на состав, структуру и свойства нержавеющей стали 12Х18Н9 [Текст] / А. Ф. Ильющенко, И. В. Фомихина, Ю. О. Лисовская и др. // НАН Беларуси, Белорусский национальный технический университет. – 2009. – С. 14–19.
3. Плотников, Н. В. К вопросу о модели электролитно-плазменного полирования поверхности [Текст] / А. М. Смыслов, Д. Р. Таминдаров. – Уфа: УГАТУ, 2013. – Т. 17, № 4 (57). – С. 90–95.
4. Парфенов, Е. В. Управление технологическими процессами электролитно-плазменной обработки на основе пассивной идентификации свойств поверхностного слоя [Текст] / Е. В. Парфенов // Вестник УГАТУ. Технология машиностроения. – Уфа: УГАТУ, 2011. – Т. 15, № 4 (44): Статьи и сообщения. – С. 215–224.
5. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов [Текст] / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 232 с.
6. Локтев, Д. Е. Исследование параметров электролитно-плазменного полирования низколегированной стали методом планирования полного факторного эксперимента [Текст] / Д.

- Е. Локтев, Л. А. Ушомирская, В. И. Новиков // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 2009. – № 5. – С. 15–18.
7. Белкин, П. Н. Анодная электрохимико-термическая модификация металлов и сплавов [Текст] / П. Н. Белкин // Электронная обработка материалов. – 2010. – № 6. – С. 29–41.
 8. Парфенов, Е. В. Обобщенная математическая модель технологического процесса электролитно-плазменного удаления покрытий [Текст] / Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин // Вестник УГАТУ. – 2007. – Т. 9, № 7. – С. 33–40.
 9. Пат. № 13937 Беларуси. Устройство для электролитно-плазменного полирования металлического изделия [Текст] / Кревсун, Э. П. Куликов, И. С. Каменев, А. Я. Ермаков В. Л. – Оpubл. 30. 12. 2010.
 10. Пат. № 16063 Беларуси. Устройство для электролитно-плазменной обработки токопроводящего изделия [Текст] / Кревсун, Э. П. Куликов, И. С. Нагула П. К. – Оpubл. 30.06.2012.
 11. Пат. № 2268326 RF Установка электролитно-плазменного полирования C25 F 7/00 [Текст] / Касимов, Р. Г. Горяинов, В. Н. Балахнин А. О. – Оpubл. 20.01.2006.
 12. Ерофеев, Ю. М. Установка для электролитно-плазменного полирования [Текст] / Ю. М. Ерофеев, В. Н. Пиеничный, В. М. Мизунов // Конверсия в машиностроении. – 2003. – № 1. – С. 80–82.
 13. Ушомирская, Л. А. Особенности чистой обработки турбинных лопаток [Текст] / Л. А. Ушомирская, А. И. Фоломкин, В. И. Новиков // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 2008. – № 4. – С. 19–21.
 14. Амирханова, Н. А. Исследование закономерностей электролитно-плазменного полирования жаропрочного сплава ЭП-718 [Текст] / Н. А. Амирханова, В. А. Белоногов, Г. У. Белоногова // Металлообработка. – 2003. – № 6. – С. 16–20.
 15. Смыслов, А. М. Многоэтапная электролитно-плазменная обработка изделий из титана и титановых сплавов [Текст] / А. М. Смыслов, М. К. Смылова, А. Д. Мингажев, К. С. Селиванов // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 13, № 1. – С. 141–145.
 16. Пат. № 2168565 RF Способ электрохимического полирования металлических изделий C25 F 3/16. [Текст] / Мирзоев, Р. А. Стыров, М. И. Степанова, Н. И. Майоров А. И. – Оpubл. 10.06.2001.
 17. Пат. № 2116391 RF Способ полирования изделий C25 F 3/16. [Текст] / Амирханова, Н. А. Белоногов, В. А. Касимов, Р. Г. Горяинов В. Н. – Оpubл. 27.07.1998.
 18. Чиркунова, Н. В. Формирование нано- и микроразмерных образований при электролитно-плазменной обработке аустенитной нержавеющей стали [Текст] / Н. В. Чиркунова, А. П. Воленко, В. К. Чуркин, И. М. Сафаров, Р. Р. Мулюков // Письма о материалах. – 2013. – Т. 3. – С. 163–165.
 19. Синькевич, Ю. В. Фазовый состав и микроструктура электроимпульсно полированной поверхности коррозионно-стойких сталей [Текст] / Ю. В. Синькевич, И. Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2009. – № 37. – С. 233–238.
 20. Синькевич, Ю. В. Электроимпульсное полирование деталей из коррозионно-стойких и углеродистых конструкционных сталей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю. В. Синькевич. – Минск, 1998. – 23 с.
 21. Воленко, А. П. Электролитно-плазменная обработка металлических изделий [Текст] / О. В. Бойченко, Н. В. Чиркунова // Вектор науки ТГУ. – 2012. – № 4 (22). – С. 144–147.
 22. Станишевский, В. К. Исследование электрической устойчивости системы источник питания-нагрузка при электролитной обработке [Текст] / В. К. Станишевский, А. Э. Париццо, А. А. Семченко, А. А. Кособуцкий // Электронная обработка материалов. – 1988. – № 1. – С. 26–29.
 23. А. с. СССР № 1775508 C25F 3/16. Способ электролитно-плазменного полирования изделий сложной формы [Текст] / В. К. Станишевский, Г. Е. Слепнев, Л. М. Семенов, А. А. Кособуцкий, А. Э. Париццо, В. А. Хлебцевич. – Оpubл. 1992. – Бюл. № 42.
 24. Новиков, В. И. Повышение эффективности изготовления сложно-профильных деталей из легированных сталей методом электролитно-плазменного полирования [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / В. И. Новиков. – Санкт-Петербург, 2010. – 148 с.
 25. Пат. РФ № 2133943, Способ измерения шероховатости поверхности МКИ6 G 01 В 7/34 [Текст] / Горбатков, С. А. Парфенов., Е. В. Быбин А. А. – Оpubл. 27.07.99.
 26. Суминов, И. В. Микродуговое окисление: теория, технология, оборудование [Текст] / И. В. Суминов, А. В. Эпельфельд, В. Б. Людин. – М.: Экомет, 2005. – 368 с.
 27. Суминов, И. В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов [Текст] / И. В. Суминов, П. Н. Белкин, А. В. Эпельфельд, В. Б. Людин, Б. Л. Крит, А. М. Борисов. – Москва: Техносфера, 2011. – 512 с.
 28. Черненко, В. И. Теория и технология анодных процессов при высоких напряжениях [Текст] / В. И. Черненко, Л. А. Снежко, В. И. Папанова. – Киев: Наукова думка, 1995. – 199 с.
 29. Сарилов, М. Ю. Повышение эффективности электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта [Текст]: дисс. ... д. т. н. / М. Ю. Сарилов. – Комсомольск-на-Амуре, 2008. – 377 с.
 30. Кабалдин, Ю. Г. Повышение устойчивости процесса электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта [Текст] / Ю. Г. Кабалдин, М. Ю. Сарилов, С. В. Биленко. – КнАГТУ, – 2007. – 191 с.
 31. Пат. № 2202451 RF. Способ управления процессом удаления дефектного покрытия электролитно-плазменным методом МПК7В23Н7/20 [Текст] / Михайловский, А. И. Невьянцева, Р. Р. Парфенов, Е. В. Быбин А. А. – Оpubл. 2003.
 32. Parfenov, E. V. Process Control for Plasma Electrolytic Removal of TiN Coatings. Part 1: Duration Control [Text] / E. V. Parfenov, R. R. Nevyantseva, S. A. Gorbatkov // Surface and Coatings Technology. – 2005. – Vol. 199. – P. 189–197.
 33. Parfenov, E. V. Impedance spectroscopy characterisation of PEO process and coatings on aluminium [Text] / E. V. Parfenov, A. L. Yerokhin, A. Matthews // Thin Solid Films. – 2007. – Vol. 516. – P. 428–432.
 34. Мукаева, В. Р. Математическое моделирование процесса электролитно-плазменного полирования [Текст] / В. Р. Мукаева, Е. В. Парфенов // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16. – № 6. – С. 67–73.
 35. Пат. №2475700 RF. Способ измерения шероховатости поверхности в процессе электролитно-плазменной обработки МПК G 01 В 7/34 [Текст] / Парфенов, Е. В. Мукаева, В. Р. Невьянцева, Р. Р. Быбин А. А. – Оpubл. 20.02.2013. Бюл. № 5.
 36. Якименко, Л. М. Электродные материалы в прикладной электрохимии [Текст] / Л. М. Якименко. – М.: Химия, 1977. – 264 с.

Bibliography (transliterated):

1. Synkevych, Yu. V. (2014). Elektroimpulsnoe polyrovanye na osnove zheleza, khroma y nykelia. Minsk: BNTU, 325.
2. Yliushchenko, A. F., Fomykhyna, Y. V., Lysovskaya, Yu. O. et al. (2009). Yssledovanye vliyaniya razlychnykh temperatur y koncentratsyi elektrolita pry elektrolitno-plazmennoi obrabotke na sostav, strukturu y svoystva nerzhavayushchei staly 12Kh18N9. NAN Belarusy, Belorusskiy natsionalnyi tekhnicheskiy unyversytet, 14–19.
3. Plotnykov, N. V., Smyslov, A. M., Tamyndarov, D. R. (2013). K voprosu o modely elektrolitno-plazmennoho polyrovaniya poverkhnosti. Ufa: UHATU, 17 (4 (57)), 90–95.
4. Parfenov, E. V. (2011). Upravlenye tekhnolohyeshkymy protsessamy elektrolitno-plazmennoi obrabotky na osnove passyvnoi ydentyfikatsyy svoystv poverkhnostnoho sloia. Vestnyk UHATU. Tekhnolohiya mashynostroeniya. Ufa: UHATU, 15 (4 (44)), 215–224.
5. Kulykov, Y. S., Vashchenko, S. V., Kamenev, A. Ya. (2010). Elektrolitno-plazmennaya obrabotka materyalov. Mynsk: Belarusskaya nauka, 232.
6. Loktev, D. E., Ushomyrskaia, L. A., Novykov, V. Y. (2009). Yssledovanye parametrov elektrolitno-plazmennoho polyrovaniya nyzkolehyrovannoi staly metodom planyrovaniya polnoho faktornogo eksperymenta. Elektrofyzycheskiye y elektrokhymycheskiye metody obrabotky. 5. 15–18.
7. Belkin, P. N. (2010). Anodnaya elektrokhymiko-termicheskaia modyfykatsiya metallov y spлавov. Elektronnaya obrabotka materyalov, 6. 29–41.
8. Parfenov, E. V., Neviantseva, R. R., Bybyn, A. A. (2007). Obobshchennaya matematycheskaia model tekhnolohyeshkogo protsessa elektrolitno-plazmennoho udaleniya pokrytyi. Vestnyk UHATU, 9 (7). 33–40.
9. Krevsun, E. P., Kulykov, Y. S., Kamenev, A. Ya., Ermakov, V. L.

- (2010). Pat. № 13937 Belarusy Ustroistvo dlia elektrolitno-plazmennogo polyrovaniya metallichesko zydelya, published: 30. 12. 2010.
10. Krevsun, E. P., Kulykov, Y. S., Nahula, P. K. (2012). Pat. №16063 Belarusy Ustroistvo dlia elektrolitno-plazmennoi obrabotky tokoprovodiashcheho zydelya, published: 30. 12. 2010.
 11. Kasymov, R. H., Horiainov, V. N., Balakhyn, A. O. (2006). Patent № 2268326 RF. Ustanovka elektrolitno-plazmennogo polyrovaniya, published: 20.01.2006.
 12. Erofeev, Yu. M., Pshenychnyi, V. N., Myhunov, V. M. (2003). Ustanovka dlia elektrolitno-plazmennogo polyrovaniya. Konversiya v mashinostroeny, 1. 80–82.
 13. Ushomyrskaya, L. A., Folomkyn, A. Y., Novykov, V. Y. (2008). Osobennosti chystovoi obrabotky turbynykh lopatok. Elektrofyzicheskiye y elektrokhimicheskiye metody obrabotky, 4. 19–21.
 14. Amyrkhanova, N. A., Belonohov, V. A., Belonohova, H. U. (2003). Yssledovanye zakonomernosti elektrolitno-plazmennogo polyrovaniya zharoprochno splava EP-718. Metalloobrabotka, 6. 16–20.
 15. Smyslov, A. M., Smyslova, M. K., Mynhazhev, A. D., Selyvanov, K. S. (2009). Mnogoetapnaia elektrolitno-plazmennai obrabotka zydelyi yz tytana y tytanovykh splavov. VestnykUHATU, 13 (1), 141–145.
 16. Myrzoiev, R. A., Styrov, M. Y., Stepanova, N. Y., Maiorov, A. Y. (2001). Pat. № 2168565 RF.Sposob elektrokhimicheskogo polyrovaniya metallicheskykh zydelyi. C25 F 3/16.
 17. Amyrkhanova, N. A., Belonohov, V. A., Kasymov, R. H., Horiainov V. N. (1998). Pat. № 2116391 RF. Sposob polyrovaniya zydelyi. C25 F 3/16.
 18. Chyrkunova, N. V., Volenko, A. P., Chyrkun, V. K., Safarov, Y. M., Muliukov, R. R. (2013). Formirovaniye nano- y mykrorazmernykh obrazovaniy pry elektrolitno-plazmennoi obrabotke austenitnoi nerzhavieushchei staly. Pysma o materialakh, 3, 163–165.
 19. Synkevych, Yu. V., Yankovskiy, Y. N. (2009). Fazoviy sostav y mikrostruktura elektroympulsno polyrovannoi poverkhnosti korrozyonno-stoikykh stali. Mezhdunarodnyi sbornik nauchnykh statei: Prohressyvnye tekhnolohyy y systemy mashinostroeniya, 37, 233–238.
 20. Synkevych, Yu. V. (1998). Elektroympulsnoe polyrovaniye detalei yz korrozyonno-stoikykh y uhlerodistykh konstruksionnykh stali. Mynsk, 23.
 21. Volenko, A. P., Boichenko, O. V., Chyrkunova, N. V. (2012). Elektrolitno-plazmennai obrabotka metallicheskykh zydelyi. Vektor nauky THU, 4 (22), 44–147.
 22. Stanyshevskiy, V. K., Parshuto, A. E., Semchenko, A. A., Kosobutskiy, A. A. (1988). Yssledovaniye elektrycheskoi ustoiichivosti systemy ystochnyk pytaniya-nahruczka pry elektrolitnoi obrabotke. Elektronnaia obrabotka materialov, 1. 26–29.
 23. Stanyshevskiy, V. K., Slepnev, H. E., Semenenko, L. M., Kosobutskiy, A. A., Parshuto, A. E., Khlebtsevych, V. A. (1992). Sposob elektrolitno-plazmennogo polyrovaniya zydelyi slozhnoi formy (SSSR). 1775508; No. 42.
 24. Novykov, V. Y. (2010). Povysheniye efektyvnosti yzgotovleniya slozhno-profilynykh detalei yz lehyrovannykh stali metodom elektrolitno-plazmennogo polyrovaniya. Saint-Petersburg, 148.
 25. Neviantseva, R. R., Horbatkov, S. A., Parfenov, E. V., Bybyn, A. A. (1999). Pat. № 2133943 RF.Sposob yzmereniya sherokhovatosti poverkhnosti.
 26. Sumynov, Y. V., Epelfeld, A. V., Liudyn, V. B. (2005) Mykroduhovie oksydyrovaniye: teoriya, tekhnolohiya, oborudovaniye. Moscow: Ekomet, 368.
 27. Sumynov, Y. V., Belkyn, P., Nepelfeld, A. V., Liudyn, V. B., Kryt, B. L., Borysov, A. M. (2011) Plazmenno-elektroliticheskoe modyfytsirovaniye poverkhnosti metallov y splavov. Moscow: Tekhnosfera, 2, 512.
 28. Chernenko, V. Y., Snezhko, L. A., Papanova, V. Y. (1995). Teoriya y tekhnolohiya anodnykh protsessov pry vysokykh napriazheniyakh. Kyiv: Naukova dumka, 199.
 29. Sarylov, M. Yu. (2008). Povysheniye efektyvnosti elektroerozyonnoi obrabotky y kachestva obrabotannoi poverkhnosti na osnove podkhodov ykusstvennoho yntellekta. Komsomolsk-na-Amure. 377.
 30. Kabaldyn, Yu. H., Sarylov, M. Yu., Bylenko, S. V. (2007). Povysheniye ustoiichivosti protsessa elektroerozyonnoi obrabotky y kachestva obrabotannoi poverkhnosti na osnove podkhodov ykusstvennoho yntellekta. KnAHTU, 191.
 31. Mykhailovskiy, A. Y., Neviantseva, R. R., Parfenov, E. V., Bybyn, A. A. (2003). Patent № 2202451 RF. Sposob upravleniya protsessom udaleniya defektno pokrytiya elektrolitno-plazmennym metodom.
 32. Parfenov, E. V., Neviantseva, R. R., Gorbatkov, S. A. (2005). Process Control for Plasma Electrolytic Removal of TiN Coatings. Part 1: Duration Control. Surface and Coatings Technology, 199, 189–197.
 33. Parfenov, E. V., Yerokhin, A. L., Matthews, A. (2007). Impedance spectroscopy characterisation of PEO process and coatings on aluminium. Thin Solid Films, 516, 428–432.
 34. Mukaeva, V. R., Parfenov, E. V. (2012). Matematicheskoe modelirovaniye protsessa elektrolitno-plazmennogo polyrovaniya. Vestnyk UHATU, 16 (6), 67–73.
 35. Parfenov E. V., Mukaeva V. R., Neviantseva R. R., Bybyn A. A. (2013). Patent №2475700 RF. Sposob yzmereniya sherokhovatosti poverkhnosti v protsesse elektrolitno-plazmennoi obrabotky.
 36. Yakymenko, L. M. (1977). Elektrodnye materialy v prykladnoi elektrokhimyy. Moscow: Khymiya, 264.

Поступила (received) 05.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Огляд досягнень в області електролітно-плазмового полірування виробів з титанових сплавів / С. Л. Негруб, Є. Г. Володько // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С. 74–82. – Бібліогр.: 36 назв. – ISSN 2079-5459.

Обзор достижений в области электролитно-плазменного полирования изделий из титановых сплавов/ С. Л. Негруб, Е. Г. Володько // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.74–82. – Бібліогр.: 36 назв. – ISSN 2079-5459.

Overview achievements in the field electrolytic-plasma polishing products from titanium alloys/ S. Nehrub, E. Volodko //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P.74 –82. – Bibliogr.: 36. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Негруб Світлана Леонідівна – кандидат технічних наук, Національна металургійна академія України, доцент кафедри технології машинобудування; пр. Гагарина, 4, м. Дніпро, Україна, 49600.

Володько Євгеній Григорович – магістр, Національна металургійна академія України, аспірант кафедри технології машинобудування; пр. Гагарина, 4, м. Дніпро, Україна, 49600; e-mail: yevhenii.volodko@gmail.com.

Негруб Светлана Леонидовна – кандидат технических наук, Национальная металлургическая академия Украины, доцент кафедры технологии машиностроения; пр. Гагарина, 4, г. Днепр, Украина, 49600.

Володько Евгений Григорьевич – магистр, Национальная металлургическая академия Украины, аспирант кафедры технологии машиностроения; пр. Гагарина, 4, г. Днепр, Украина, 49600; e-mail: yevhenii.volodko@gmail.com.

Nehrub Svillana – PhD, National Metallurgical Academy of Ukraine, associate professor Department of Technology of Machine Building; Gagarin ave., 4, Dnipro, Ukraine, 49600; e-mail: nehrub_svetlana@mail.ru.

Volodko Yevhenii – Master, National Metallurgical Academy of Ukraine, graduate student Department of Technology of Machine Building; Gagarin ave., 4, Dnipro, Ukraine, 49600; e-mail: yevhenii.volodko@gmail.com.

УДК 539.3

Д. Д. ИСМАЙЛОВА

ЗАДАЧА КРУЧЕНИЯ РАДИАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОГО ЦИЛИНДРА

Изучается задача кручения радиально-неоднородного изотропного полого цилиндра, когда боковые поверхности свободны от напряжений. Показано, что решение складывается из двух типов решений: проникающего решения и решения типа пограничного слоя.

Построены точные и асимптотические решения задачи кручения цилиндра, когда упругие характеристики меняются по общим степенным законам, по радиусу. На основе проведенного анализа разъяснен характер напряженно-деформированного состояния цилиндра.

Ключевые слова: однородные решения, пограничный слой, решение Сен-Венана, краевой эффект.

Вивчається задача кручення радіально-неоднорідного изотропного полого циліндра, коли бічні поверхні вільні від напружень. Показано, що рішення складається з двох типів рішень: проникаючого рішення і рішення типу прикордонного шару.

Побудовано точні і асимптотичні рішення задачі кручення циліндра, коли пружні характеристики змінюються за загальними степенним законам, по радіусу. На основі проведеного аналізу роз'яснено характер напружено-деформованого стану циліндра.

Ключові слова: однорідні рішення, прикордонний шар, рішення Сен-Венана, крайовий ефект.

The problem of torsion of a radially inhomogeneous isotropic hollow cylinder is studied, when the side surfaces are free from stresses. It is shown that the solution consists of two types of solutions: a penetrating solution and a solution of the boundary layer type.

Precise and asymptotic solutions of the torsion problem of the cylinder are constructed, when the elastic characteristics change according to general power laws, along the radius. Based on the analysis, the nature of the stress-strain state of the cylinder is explained.

Keywords: homogeneous solutions, boundary layer, Saint-Venant solution, edge effect.

Введение. В [1–3] разработана асимптотическая теория кручения для радиально-слоистых тел. Метод указанных работ был обобщен [4, 5] в задачах стационарных крутильных колебаний радиально-слоистого цилиндра.

В [6] методом асимптотического интегрирования уравнений теории упругости изучена задача кручения для радиально-неоднородного цилиндра малой толщины.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу кручения кругового радиально-неоднородного полого цилиндра. В цилиндрической системе координат область, занятая цилиндром обозначим через $\Gamma = \{r \in [r_1; r_2], \phi \in [0; 2\pi], z \in [-L; L]\}$. Будем считать, что модуль сдвига $-G = G(r)$ произвольная строго положительная интегрируемая функция.

Уравнения равновесия при отсутствии массовых сил в цилиндрической системе координат r, ϕ, z имеют вид [7]:

$$\frac{\partial \sigma_{r\phi}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{\phi z}}{\partial z} + \frac{2}{r} \sigma_{r\phi} = 0, \quad (1)$$

где $\sigma_{r\phi}, \sigma_{\phi z}$ – компоненты тензора напряжений, которые выражаются через компоненты вектора перемещений следующим образом [7]:

$$\sigma_{r\phi} = G \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial r} - \frac{u_\phi}{r} \right), \quad \sigma_{\phi z} = G \frac{\partial u_\phi}{\partial z}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получаем уравнения равновесия в перемещениях:

$$\frac{\partial}{\partial \rho} \left[G(\rho) \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial \rho} - \frac{u_\phi}{\rho} \right) \right] + \frac{2G(\rho)}{\rho} \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial \rho} - \frac{u_\phi}{\rho} \right) + G(\rho) \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial \xi^2} = 0. \quad (3)$$

Здесь $\rho = \frac{r}{R_0}, \xi = \frac{z}{R_0}$ – новые безразмерные

переменные; $R_0 = \frac{r_1 + r_2}{2}$ – радиус срединной поверхности цилиндра; $u_\phi = u_\phi(\rho, \xi)$ – компонента вектора смещения;

$$\rho \in [\rho_1; \rho_2], \quad \xi \in [-l; l] \left(\rho_s = \frac{r_s}{R_0}, l = \frac{L}{R_0}; s = 1, 2 \right).$$

Предполагаем, что боковая часть цилиндра свободна от напряжений, т.е.

© Д. Д. Исмаилова. 2017

$$\sigma_{\rho\phi} = G(\rho) \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial \rho} - \frac{u_\phi}{\rho} \right) = 0, \quad (4)$$

при

$$\rho = \rho_s \quad (s = 1, 2),$$

а на торцах заданы граничные условия

$$\sigma_{\phi\xi} = f^\pm(\rho) \quad \text{при } \xi = \pm l, \quad (5)$$

где $f^\pm(\rho)$ – достаточно гладкие функции, удовлетворяющие условиям равновесия.

Решение задачи. Решение (3) будем искать в виде:

$$u_\phi(\rho, \xi) = v(\rho) \cdot m(\xi), \quad (6)$$

где функция $m(\xi)$ подчинена условию

$$m''(\xi) - \mu^2 m(\xi) = 0. \quad (7)$$

Подставляя (6) в (3), (4), с учетом (7) получаем:

$$\begin{aligned} & \left[G(\rho) \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) \right]' + \\ & + \frac{2G(\rho)}{\rho} \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) + \\ & + \mu^2 G(\rho) v(\rho) = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

$$G(\rho) \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) = 0$$

при $\rho = \rho_s, (s = 1, 2).$ (9)

(8), (9) можно представить в следующем виде

$$Av = \mu^2 v, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} Av = & \left\{ -\frac{1}{G(\rho)} \left[G(\rho) \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) \right]' - \right. \\ & \left. - \frac{2}{\rho} \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) \right\}; \end{aligned}$$

$$G(\rho) \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) = 0$$

при $\rho = \rho_s; (s = 1; 2)$.

Введем гильбертово пространство H со скалярным произведением

$$(u, v) = \int_{\rho_1}^{\rho_2} G(\rho) v(\rho) u(\rho) \rho d\rho.$$

Лемма 1. Оператор $A: H \rightarrow H$ симметричен.

Доказательство: Для $\forall u(\rho), v(\rho) \in D_A$ имеем:

$$(Av, u) - (v, Au) = \int_{\rho_1}^{\rho_2} G(\rho) \cdot Av \cdot u(\rho) \cdot \rho d\rho - \int_{\rho_1}^{\rho_2} G(\rho) Au \cdot v(\rho) \cdot \rho d\rho =$$

$$= \int_{\rho_1}^{\rho_2} (Av \cdot u - v Au) \cdot \rho G(\rho) d\rho =$$

$$= \int_{\rho_1}^{\rho_2} \left\{ \left[-\frac{1}{G(\rho)} \left(G(\rho) \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) \right)' - \frac{2}{\rho} \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) \right] u(\rho) + \right.$$

$$\left. + \left[\frac{1}{G(\rho)} \left(G(\rho) \left(u'(\rho) - \frac{u(\rho)}{\rho} \right) \right)' + \frac{2}{\rho} \left(u'(\rho) - \frac{u(\rho)}{\rho} \right) \right] v(\rho) \right\} \rho G(\rho) d\rho =$$

$$= \int_{\rho_1}^{\rho_2} \left\{ - \left[G(\rho) \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) \right]' \rho u(\rho) - 2G(\rho) \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) u(\rho) + \right.$$

$$\left. + \left[G(\rho) \left(u'(\rho) - \frac{u(\rho)}{\rho} \right) \right]' \rho v(\rho) + 2G(\rho) \left(u'(\rho) - \frac{u(\rho)}{\rho} \right) v(\rho) \right\} d\rho =$$

$$= \int_{\rho_1}^{\rho_2} \left[G(\rho) \left(u'(\rho) - \frac{u(\rho)}{\rho} \right) \right]' \rho v(\rho) d\rho - \int_{\rho_1}^{\rho_2} \left[G(\rho) \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) \right]' \rho u(\rho) d\rho +$$

$$+ \int_{\rho_1}^{\rho_2} 2G(\rho) (u'(\rho) v(\rho) - v'(\rho) u(\rho)) d\rho = \int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho v(\rho) d \left(G(\rho) \left(u'(\rho) - \frac{u(\rho)}{\rho} \right) \right) -$$

$$- \int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho u(\rho) d \left(G(\rho) \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) \right) + \int_{\rho_1}^{\rho_2} 2G(\rho) (u'(\rho) v(\rho) - v'(\rho) u(\rho)) d\rho =$$

$$= G(\rho) \left(u'(\rho) - \frac{u(\rho)}{\rho} \right) \rho v(\rho) \Big|_{\rho_1}^{\rho_2} - \int_{\rho_1}^{\rho_2} G(\rho) \left(u'(\rho) - \frac{u(\rho)}{\rho} \right) d(\rho v(\rho)) -$$

$$- G(\rho) \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) \rho u(\rho) \Big|_{\rho_1}^{\rho_2} + \int_{\rho_1}^{\rho_2} G(\rho) \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) d(\rho u(\rho)) +$$

$$+ \int_{\rho_1}^{\rho_2} 2G(\rho) (u'(\rho) v(\rho) - v'(\rho) u(\rho)) d\rho =$$

$$= \int_{\rho_1}^{\rho_2} G(\rho) \left(-u'(\rho) + \frac{u(\rho)}{\rho} \right) (v(\rho) + \rho v'(\rho)) d\rho +$$

$$+ \int_{\rho_1}^{\rho_2} G(\rho) \left(v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} \right) (\rho u'(\rho) + u(\rho)) d\rho +$$

$$+ \int_{\rho_1}^{\rho_2} 2G(\rho) (u'(\rho) v(\rho) - u(\rho) v'(\rho)) d\rho = 0,$$

т. е.

$$(Av, u) = (v, Au)$$

и оператор A – симметричен.

Все собственные значения $\lambda_k(A) = \mu_k^2$ – вещественные, а собственные функции удовлетворяют условию ортогональности [8]:

$$(v_s, v_t) = \int_{\rho_1}^{\rho_2} G(\rho) v_s(\rho) v_t(\rho) \rho d\rho = d_s \delta_{st}, \quad (11)$$

где

$$d_s = \int_{\rho_1}^{\rho_2} G(\rho) v_s^2(\rho) \rho d\rho.$$

$\mu^2 = 0$ – собственное значение оператора $A: H \rightarrow H$, и ему соответствует собственная функция $v_0(\rho) = \rho$.

Решение уравнения (3), удовлетворяющее граничным условиям (4), можно представить в виде

$$u_\phi(\rho, \xi) = u_{\phi 0}(\rho, \xi) + \sum_{k=1}^{\infty} v_k(\rho) (E_k e^{-\mu_k \xi} + B_k e^{\mu_k \xi}), \quad (12)$$

где $u_{\phi 0}(\rho, \xi) = E_0 \rho \xi$ – решение Сен-Венана; E_k, B_k – произвольные постоянные.

На основании (12) имеем:

$$\sigma_{\rho\phi} = \sum_{k=1}^{\infty} G(\rho) \left(v_k'(\rho) - \frac{v_k(\rho)}{\rho} \right) \times (E_k e^{-\mu_k \xi} + B_k e^{\mu_k \xi}); \quad (13)$$

$$\sigma_{\phi\xi} = E_0 \rho G(\rho) + \sum_{k=1}^{\infty} G(\rho) \mu_k v_k(\rho) (B_k e^{\mu_k \xi} - E_k e^{-\mu_k \xi}); \quad (14)$$

Укажем характер построенных решений. Для крутящих моментов M_{kp} , напряжений, действующих в сечении $\xi = const$, имеем:

$$M_{kp} = 2\pi \int_{\rho_1}^{\rho_2} \sigma_{\phi\xi} \rho^2 d\rho. \quad (15)$$

(14) подставим в (15):

$$M_{kp} = 2\pi E_0 \int_{\rho_1}^{\rho_2} G(\rho) \rho^3 d\rho + 2\pi \sum_{k=1}^{\infty} \left(\int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho^2 G(\rho) v_k(\rho) d\rho \right) \mu_k (B_k e^{\mu_k \xi} - E_k e^{-\mu_k \xi}). \quad (16)$$

Умножим обе части (8) на ρ^2 и проинтегрируем полученное выражение в $[\rho_1; \rho_2]$:

$$\int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho^2 \left[G(\rho) \left(v_k'(\rho) - \frac{v_k(\rho)}{\rho} \right) \right]' d\rho + \int_{\rho_1}^{\rho_2} 2G(\rho) \rho \left(v_k'(\rho) - \frac{v_k(\rho)}{\rho} \right) d\rho + \mu_k^2 \int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho^2 G(\rho) v_k(\rho) d\rho = 0. \quad (17)$$

С помощью интегрирования по частям и с использованием (9) из (17) получим:

$$\int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho^2 G(\rho) v_k(\rho) d\rho = 0. \quad (18)$$

Подставим (18) в (16):

$$M_{kp} = 2\pi E_0 \int_{\rho_1}^{\rho_2} G(\rho) \rho^3 d\rho. \quad (19)$$

Из (19) видно, что постоянная E_0 пропорциональна крутящим моментам M_{kp} , напряжений, действующих в сечении $\xi = const$. Решение Сен-Венана определяет внутреннее напряженно-деформированное состояние цилиндра. Напряженное состояние, соответствующее второй части решений (12), является самоуравновешенным в каждом сечении $\xi = const$ и имеет характер краевого эффекта, локализованного у торцов, что обосновывает принцип Сен-Венана.

Подставим (14) в граничные условия (5):

$$\sum_{k=1}^{\infty} G(\rho) \mu_k v_k(\rho) (B_k e^{\mu_k \xi} - E_k e^{-\mu_k \xi}) \Big|_{\xi=\pm l} = f_1^\pm(\rho), \quad (20)$$

где

$$f_1^\pm(\rho) = f^\pm(\rho) - \frac{\rho G(\rho) M_{kp}}{2\pi \int_{\rho_1}^{\rho_2} G(\rho) \rho^3 d\rho}.$$

Умножая (20) на $\rho v_n(\rho)$ и интегрируя в пределах $[\rho_1, \rho_2]$, с учетом (11) имеем:

$$\left(\mu_n e^{\mu_n \xi} B_n - \mu_n e^{-\mu_n \xi} E_n \right) \Big|_{\xi=\pm l} = \frac{1}{d_n} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho f_1^\pm(\rho) v_n(\rho) d\rho. \quad (21)$$

После решения системы (21) определим неизвестные постоянные B_n и E_n :

$$B_n = \frac{t_n^+ e^{\mu_n l} - t_n^- e^{-\mu_n l}}{2\mu_n \operatorname{sh}(2\mu_n l)}, \quad E_n = \frac{t_n^+ e^{-\mu_n l} - t_n^- e^{\mu_n l}}{2\mu_n \operatorname{sh}(2\mu_n l)}.$$

Допустим у цилиндра модуль сдвига задан в виде функции

$$G(\rho) = g_0 \rho^n, \quad (22)$$

где n – произвольное положительное число, g_0 – постоянная.

С учетом (22) из (8), (9) имеем:

$$v''(\rho) + \frac{(n+1)}{\rho} v'(\rho) + \left(\mu^2 - \frac{(n+1)}{\rho^2} \right) v(\rho) = 0, \quad (23)$$

$$v'(\rho) - \frac{v(\rho)}{\rho} = 0 \quad \text{при } \rho = \rho_s. \quad (s=1; 2) \quad (24)$$

Общее решение (23) имеет вид:

$$v(\rho) = \rho^{-\frac{n}{2}} \left(C J_{1+\frac{n}{2}}(\mu\rho) + D Y_{1+\frac{n}{2}}(\mu\rho) \right) \quad (25)$$

где $J_{1+\frac{n}{2}}(\mu\rho)$, $Y_{1+\frac{n}{2}}(\mu\rho)$ – функции Бесселя первого и второго родов, соответственно; C, D – произвольные постоянные.

С помощью (25), удовлетворяя граничным условиям (24), относительно C, D получаем однородную линейную систему алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} & \left(\mu\rho J'_{1+\frac{n}{2}}(\mu\rho) - \left(1 + \frac{n}{2}\right) J_{1+\frac{n}{2}}(\mu\rho) \right) C + \\ & + \left(\mu\rho Y'_{1+\frac{n}{2}}(\mu\rho) - \left(1 + \frac{n}{2}\right) Y_{1+\frac{n}{2}}(\mu\rho) \right) D = 0 \end{aligned}$$

при $\rho = \rho_s$. (26)

$$(s=1; 2).$$

Из условия существования нетривиальных решений этой системы получаем характеристическое уравнение:

$$\begin{aligned} \Delta(\mu, \rho_1, \rho_2) &= \mu^2 \rho_1 \rho_2 L_{1+\frac{n}{2}}^{(1,1)}(\mu) - \mu \left(1 + \frac{n}{2}\right) \times \\ & \times \left(\rho_1 L_{1+\frac{n}{2}}^{(1,0)}(\mu) + \rho_2 L_{1+\frac{n}{2}}^{(0,1)}(\mu) \right) + \\ & + \left(1 + \frac{n}{2}\right)^2 L_{1+\frac{n}{2}}^{(0,0)}(\mu) = 0, \end{aligned} \quad (27)$$

где

$$\begin{aligned} L_{1+\frac{n}{2}}^{(i,j)}(\mu) &= J_{1+\frac{n}{2}}^{(i)}(\mu\rho_1) Y_{1+\frac{n}{2}}^{(j)}(\mu\rho_2) - \\ & - J_{1+\frac{n}{2}}^{(j)}(\mu\rho_2) Y_{1+\frac{n}{2}}^{(i)}(\mu\rho_1); \quad (i, j=0; 1). \end{aligned}$$

Трансцендентное уравнение (27) определяет счетное множество μ_k , а соответствующие им постоянные C_k, D_k пропорциональны алгебраическим дополнениям элементов какой-либо строки определителя системы (26). Для C_k, D_k имеем:

$$C_k = \left[\mu_k \rho_2 Y'_{1+\frac{n}{2}}(\mu_k \rho_2) - \left(1 + \frac{n}{2}\right) Y_{1+\frac{n}{2}}(\mu_k \rho_2) \right],$$

$$D_k = - \left[\mu_k \rho_2 J'_{1+\frac{n}{2}}(\mu_k \rho_2) - \left(1 + \frac{n}{2}\right) J_{1+\frac{n}{2}}(\mu_k \rho_2) \right]. \quad (28)$$

Подставляя (28) в (25) и суммируя по всем корням, получаем:

$$\begin{aligned} u_\phi(\rho, \xi) &= \sum_{k=1}^{\infty} \rho^{-\frac{n}{2}} \left[\mu_k \rho_2 L_{1+\frac{n}{2}}^{(0,1)}(\mu_k \rho, \mu_k \rho_2) - \right. \\ & \left. - \left(1 + \frac{n}{2}\right) L_{1+\frac{n}{2}}^{(0,0)}(\mu_k \rho, \mu_k \rho_2) \right] m_k(\xi), \end{aligned} \quad (29)$$

где

$$m_k(\xi) = E_k e^{-\mu_k \xi} + B_k e^{\mu_k \xi};$$

$$\begin{aligned} L_{1+\frac{n}{2}}^{(i,j)}(\mu\rho, \mu\rho_2) &= J_{1+\frac{n}{2}}^{(i)}(\mu\rho) Y_{1+\frac{n}{2}}^{(j)}(\mu\rho_2) - \\ & - J_{1+\frac{n}{2}}^{(j)}(\mu\rho_2) Y_{1+\frac{n}{2}}^{(i)}(\mu\rho); \quad (i, j=0; 1). \end{aligned}$$

Для компонент тензора напряжений имеем:

$$\begin{aligned} \sigma_{\rho\phi} &= \sum_{k=1}^{\infty} \rho^{\frac{n}{2}-1} \left[\mu_k^2 \rho_2 L_{1+\frac{n}{2}}^{(1,1)}(\mu_k \rho, \mu_k \rho_2) - \right. \\ & - \mu_k^2 \left(1 + \frac{n}{2}\right) \left(\rho L_{1+\frac{n}{2}}^{(1,0)}(\mu_k \rho, \mu_k \rho_2) - \rho_2 L_{1+\frac{n}{2}}^{(0,1)}(\mu_k \rho, \mu_k \rho_2) \right) + \\ & \left. + \left(1 + \frac{n}{2}\right)^2 L_{1+\frac{n}{2}}^{(0,0)}(\mu_k \rho, \mu_k \rho_2) \right] m_k(\xi), \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\rho\xi} &= \sum_{k=1}^{\infty} \rho^{\frac{n}{2}} \left[\mu_k \rho_2 L_{1+\frac{n}{2}}^{(0,1)}(\mu_k \rho, \mu_k \rho_2) - \right. \\ & \left. - \left(1 + \frac{n}{2}\right) L_{1+\frac{n}{2}}^{(0,0)}(\mu_k \rho, \mu_k \rho_2) \right] m'_k(\xi). \end{aligned}$$

Допустим цилиндр имеет малую толщину. Исследуем асимптотическое поведение решения задачи.

Положим

$$\rho_1 = 1 - \varepsilon, \quad \rho_2 = 1 + \varepsilon, \quad (31)$$

где $\varepsilon = \frac{r_2 - r_1}{2R_0}$ – малый параметр, характеризующий

толщину цилиндра.

Подставляя (31) в (27), получаем:

$$\Delta(\mu, \rho_1, \rho_2) = \Delta(\mu, \varepsilon) = 0.$$

Лемма 2. Нули $\Lambda(\mu)$ функции $\Delta(\mu, \varepsilon)$ при $\varepsilon \rightarrow 0$ являются счетным множеством и представляются в виде

$$\Lambda(\mu) = \Lambda_1(\mu) \cup \Lambda_2(\mu)$$

1) $\Lambda_1(\mu)$ состоит из двукратного нуля $\mu = 0$,

2) $\Lambda_2(\mu)$ состоит из счетного множества нулей

$$\mu_k = \frac{\pi k}{2\varepsilon} + O(\varepsilon).$$

Доказательство: Представим $\Delta(\mu, \varepsilon)$ в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta(\mu, \varepsilon) = & \\ = & \frac{4}{\pi} \mu^2 \left\{ 1 + \left[-\frac{2}{3} \mu^2 + \frac{2}{3} \left(1 + \frac{n}{2}\right)^2 + \frac{4}{3} \left(1 + \frac{n}{2}\right) \right] \varepsilon^2 + \right. \\ & + \left[\frac{2}{15} \mu^4 + \left(\frac{2}{15} - \frac{4}{15} \left(1 + \frac{n}{2}\right)^2 - \frac{8}{15} \left(1 + \frac{n}{2}\right) \right) \mu^2 + \right. \\ & + \frac{2}{15} \left(1 + \frac{n}{2}\right)^4 + \frac{8}{15} \left(1 + \frac{n}{2}\right)^3 + \\ & \left. \left. + \frac{4}{5} \left(1 + \frac{n}{2}\right)^2 + \frac{8}{15} \left(1 + \frac{n}{2}\right) \right] \varepsilon^4 + \dots \right\} = 0. \quad (32) \end{aligned}$$

Отметим что,

$$\Delta(\mu, \varepsilon) = \mu^2 \Delta_0(\mu, \varepsilon)$$

где $\lim_{\mu \rightarrow 0} \Delta_0(\mu, \varepsilon) \neq 0$.

Таким образом, получаем, что $\mu = 0$ является двукратным нулем $\Delta(\mu, \varepsilon)$. Покажем, что все нули $\Delta_0(\mu, \varepsilon)$ неограниченно возрастают при $\varepsilon \rightarrow 0$. Предположим обратное. Допустим $\mu_k \rightarrow \mu_k^*$ при $\varepsilon \rightarrow 0$. Тогда справедливо предельное соотношение

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \Delta_0(\mu_k, \varepsilon) \neq \Delta_*(\mu_k^*).$$

Предельные точки множества нулей μ_k при $\varepsilon \rightarrow 0$ определяются из уравнения

$$\Delta_*(\mu_k^*) = \frac{4}{\pi} = 0.$$

Полученное противоречие утверждает что, предположение о существовании ограниченных нулей при $\varepsilon \rightarrow 0$ невозможно, т.е. $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \mu_k = \infty$.

При $\varepsilon \rightarrow 0$ возможны следующие случаи:

$$1^0) \quad \varepsilon \mu_k \rightarrow 0;$$

$$2^0) \quad \varepsilon \mu_k \rightarrow const;$$

$$3^0) \quad \varepsilon \mu_k \rightarrow \infty.$$

Аналогично методу [9] можно показать что случаи 1⁰) и 3⁰) здесь невозможны. Для построения асимптотики нулей группы 2⁰) отыскиваем их в виде:

$$\mu_k = \frac{\delta_k}{\varepsilon} + O(\varepsilon) \quad (33)$$

Подставляя (33) в (27) и учитывая асимптотические разложения функций

$$J_{1+\frac{n}{2}}(\mu), \quad Y_{1+\frac{n}{2}}(\mu)$$

при больших значениях аргумента [10], для δ_k получаем:

$$\sin 2\delta_k = 0, \quad \text{т. е. } \delta_k = \frac{\pi k}{2}.$$

Перемещение и напряжения, соответствующие корню $\mu^2 = 0$ определяются формулами

$$u_\phi^{(1)}(\rho, \xi) = E_0 \rho \xi; \quad \sigma_{\phi\xi}^{(1)} = E_0 \rho^{n+1}; \quad \sigma_{\rho\phi}^{(1)} = 0. \quad (34)$$

Полагая $\rho = 1 + \varepsilon \eta$ ($-1 \leq \eta \leq 1$), решения, соответствующие множеству нулей $\Lambda_2(\mu)$, можно представить в виде:

$$u_\phi^{(2)}(\rho, \xi) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[\delta_k \cos(\delta_k(1-\eta)) + O(\varepsilon) \right] m_k(\xi),$$

$$\sigma_{\rho\phi}^{(2)} = \frac{g_0}{\varepsilon} \sum_{k=1}^{\infty} \left[\delta_k^2 \sin(\delta_k(1-\eta)) + O(\varepsilon) \right] m_k(\xi), \quad (35)$$

$$\sigma_{\phi\xi}^{(2)} = g_0 \sum_{k=1}^{\infty} \left[\delta_k \cos(\delta_k(1-\eta)) + O(\varepsilon) \right] m_k'(\xi).$$

Для перемещения и напряжений имеем:

$$u_\phi(\rho, \xi) = u_\phi^{(1)}(\rho, \xi) + u_\phi^{(2)}(\rho, \xi),$$

$$\sigma_{\rho\phi} = \sigma_{\rho\phi}^{(2)}, \quad \sigma_{\phi\xi} = \sigma_{\phi\xi}^{(1)} + \sigma_{\phi\xi}^{(2)}.$$

Формулы (34) определяют внутреннее напряженно-деформированное состояние цилиндра. Напряженное состояние, определяемое формулами (35),

имеет характер пограничного слоя и первые члены его асимптотического разложения эквивалентны краевому эффекту Сен-Венана в теории неоднородных плит [2, 3, 6].

Выводы. Решение задачи кручения радиально-неоднородного цилиндра, когда боковые поверхности свободны от напряжений состоит из проникающих решений, которые определяются через крутящие моменты касательных напряжений, приложенных к сечению $\xi=const$ и из погранслоев, локализованных у торцов цилиндра.

Список литературы:

1. Ахмедов, Н. К. О принципе Сен-Венана в задаче кручения слоистого цилиндра [Текст] / Н. К. Ахмедов, Ю. А. Устинов // Прикладная математика и механика. – 1988. – Т. 52, № 2. – С. 264–268.
2. Ахмедов, Н. К. Некоторые задачи теории упругости для сильно неоднородных слоистых пластин и оболочек [Текст] / Н. К. Ахмедов, Ю. А. Устинов // Актуальные аспекты физико-механических исследований. – 2007. – С. 48–61.
3. Ахмедов, Н. К. Анализ структуры пограничного слоя в задаче кручения слоистой сферической оболочки [Текст] / Н. К. Ахмедов, Ю. А. Устинов // Прикладная математика и механика. – 2009. – Т. 73, № 3. – С. 416–426.
4. Ахмедов, Н. К. Крутильные колебания и волны в слоистом цилиндре [Текст] / Н. К. Ахмедов, Ю. А. Устинов // Известия АН СССР, Механика твердого тела. – 1991. – № 2. – С. 92–98.
5. Ахмедов, Н. К. Распространение крутильных волн в радиально-слоистом цилиндрическом волноводе [Текст] / Н. К. Ахмедов // Известия РАН, Механика твердого тела. – 2008. – № 2. – С. 114–123.
6. Akhmedov N.K. Asymptotic analysis of torsion problem for a radially-inhomogeneous cylinder of small thickness [Text] /

- N. K. Akhmedov // Transactions of NAS of Azerbaijan. – 2006. – Vol. 1, № XXVI. – P. 193–197.
7. Лурье, А. И. Теория упругости [Текст] / А. И. Лурье. – М.: Наука, 1970. – 939 с.
8. Михлин, С. Г. Линейные уравнения в частных производных [Текст] / С. Г. Михлин. – М.: Высшая школа, 1977. – 423 с.
9. Мехтиева, М. Ф. Асимптотический анализ некоторых пространственных задач теории упругости для полых тел [Текст] / М. Ф. Мехтиева. – Баку: НАН Азербайджана, 2008. – 320 с.
10. Бейтмен, Г. Высшие трансцендентные функции. Том 1 [Текст] / Г. Бейтмен, А. Эрдейн. – М.: Наука, 1973. – 294 с.

Bibliography (transliterated):

1. Ahmedov, N. K., Ustinov, Ju. A. (1988). O principe Sen-Venana v zadache kruchenija sloistogo cilindra. Prikladnaja matematika i mehanika, 52 (2), 264–268.
2. Ahmedov, N. K., Ustinov, Ju. A. (2007). Nekotorye zadachi teorii uprugosti dlja sil'no neodnorodnyh sloistyh plastin i obolochek. Aktual'nye aspekty fiziko-mehaničeskikh issledovanij, 48–61.
3. Ahmedov, N. K., Ustinov, Ju. A. (2009). Analiz struktury pogranichnogo sloja v zadache kruchenija sloistoj sferičeskoj obolochki. Prikladnaja matematika i mehanika, 73 (3), 416–426.
4. Ahmedov, N. K., Ustinov, Ju. A. (1991). Krutit'nye kolebanija i volny v sloistom cilindre. Izvestija AN SSSR, Mehanika tverdogo tela, 2, 92–98.
5. Ahmedov N. K. (2008). Rasprostranenie krutit'nyh voln v radial'no-sloistom cilindričeskom volnovode. Izvestija RAN, Mehanika tverdogo tela, 2, 114–123.
6. Akhmedov, N. K. (2006). Asymptotic analysis of torsion problem for a radially-inhomogeneous cylinder of small thickness. Transactions of NAS of Azerbaijan, 1 (XXVI), 193–197.
7. Lur'e, A. I. (1970). Teorija uprugosti. Moscow: Nauka, 939.
8. Mihlin, S. G. (1977). Linejnye uravnenija v častnyh proizvodnyh, Moscow: Vysshaja škola, 423.
9. Mehtiev, M. F. (2008). Asimptotičeskij analiz nekotoryh prostranstvennyh zadach teorii uprugosti dlja polyh tel. Baku: NAN Azerbajdzhana, 320.
10. Bejtmn, G., Jerdejn, A. (1973). Vysshie transcendentnye funkcii. Tom 1. Moscow: Nauka, 294.

Поступила (received) 06.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Завдання крутіння радіально-неоднорідного циліндра/ Д. Д. Ісмайлова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С.82–87. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Задача кручения радиально-неоднородного цилиндра/ Д. Д. Исмайлова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С.82–87.. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

The problem of torsion of a radially inhomogeneous cylinder/ J. J. Ismayilova // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P.82–87. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ісмайлова Джалала Джамшид кизи – аспірант, Гянджінський Державний Університет, кафедра «Загальні технічні дисципліни і технологія»; вул. Гейдар Алієв, 187, м Гянджа, Азербайджан, AZ 2000; e-mail: celaleismayilova@gmail.com.

Ісмайлова Джалала Джамшид кызы – аспірант, Гянджинский Государственный Университет, кафедра «Общие технические дисциплины и технология»; ул. Гейдар Алиев, 187, г. Гянджа, Азербайджан, AZ 2000; e-mail: celaleismayilova@gmail.com.

Ismayilova Jalala Jamshid gizi – Postgraduate Student, Ganja State University, department of "General technical disciplines and technology", str. Heydar Aliyev, Ganja, Azerbaijan, AZ 2000; e-mail: celaleismayilova@gmail.com.

УДК 54.057:544.653:621.13:661.13

В. Л. КОВАЛЕНКО, В. А. КОТОК

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК $\text{Ni}(\text{OH})_2$, ПОЛУЧЕННОГО В ЩЕЛЕВОМ ДИАФРАГМЕННОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЕ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ СУЛЬФАТА НАТРИЯ

Изучены структурные и электрохимические характеристики образцов гидроксида никеля, синтезированных в щелевом диафрагменном электролизере в присутствии в католите сульфата натрия различной концентрации. Показана возможность синтеза высоко электрохимически активного гидроксида никеля с оптимальной кристаллической структурой и кристалличностью при различном содержании сульфата натрия. Отрицательного влияния сульфата натрия не выявлено. Полученные данные позволят создать высокоэффективную промышленную технологию непрерывного электрохимического получения гидроксида никеля.

Ключевые слова: гидроксид никеля, щелевой диафрагменный электролизер, щелочные аккумуляторы, кристалличность, циклическая вольтамперограмма.

Вивчені структурні та електрохімічні характеристики зразків гідроксиду нікелю, синтезованих в щілинному діафрагмовому електролізері в присутності в католіті сульфату натрію різної концентрації. Показана можливість синтезу високо електрохімічно активного гідроксиду нікелю з оптимальною кристалічною структурою та кристалічністю при різному вмісті сульфату натрію. Негативного впливу сульфату натрію не виявлено. Отримані дані дозволять створити високоєфективну промислову технологію безперервного електрохімічного отримання гідроксиду нікелю.

Ключові слова: гідроксид нікелю, щілинний діафрагмовий електролізер, лужні акумулятори, кристалічність, циклічна вольтамперограма.

This investigation deals with the development of the industrial technology for continuous electrochemical obtaining of nickel hydroxide with high electrochemical properties. One of the main requirements of industrial technology is water recycling. Water recycling in the nickel hydroxide obtaining from sulfate salts will increase of Na_2SO_4 concentration. Therefore the influence of sodium sulfate addition on the structural and electrochemical properties has been investigated. Samples of $\text{Ni}(\text{OH})_2$ has been synthesised with continuous electrochemical method in slit diaphragm electrolyzer under such condition: $i_c=12 \text{ A/dm}^2$, catholite 0.2 M NiSO_4 , catholite and anolite flow speeds are 0.2 l/h. After obtaining nickel hydroxide was filtered by vacuum pump, dried at 90°C , washed from soluble salt and redried. The samples have been characterized by XRD and cycling voltammogram.

The possibility of synthesis of high electrochemical active nickel hydroxide with optimal structure and crystallinity, has been shown. The negative influence of sodium sulfate addition under all studied concentrations has not found.

The results of this investigation will be used for development of highly effective continuous industrial technology of electrochemical obtaining of the nickel hydroxide.

Keywords: nickel hydroxide, slit diaphragm electrolyzer, alkaline secondary cell, crystallinity, cycling voltammogram.

Введение. Щелочные никель-кадмиевые, никель-металлгидридные и никель-железные аккумуляторы широко используются как источники тока для транспорта, на железной дороге, для питания электродвигателей различной мощности. Очень актуальным является использование щелочных аккумуляторов для устройств возобновляемой энергетики [1]. Известно, что характеристики щелочных аккумуляторов определяется характеристиками гидроксидно-никелевого электрода, а стоимость гидроксида никеля составляет 65–70 % стоимости аккумуляторов. Поэтому получение электрохимически высокоактивного $\text{Ni}(\text{OH})_2$ является приоритетным для развития щелочных аккумуляторов.

Гидроксид никеля существует в двух модификациях [2]: β -модификация (формула $\text{Ni}(\text{OH})_2$, структура минерала брусита) и α -модификация (формула $3\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, гидротальцитоподобная структура). α - $\text{Ni}(\text{OH})_2$ обладает значительно более высокими электрохимическими характеристиками, чем β - $\text{Ni}(\text{OH})_2$. Однако его стабильность значительно ниже: в концентрированной щелочи, особенно при повышенных температурах, α - $\text{Ni}(\text{OH})_2$ переходит в β - $\text{Ni}(\text{OH})_2$ [3], что сопровождается потерей емкости. β - $\text{Ni}(\text{OH})_2$ обладает высокой стабильностью при циклировании и широко применяется в качестве активного вещества как аккумуляторов [4], так и суперконденсаторов [5, 6].

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Существует множество методов получения гидроксида никеля, отличающиеся источником

OH^- ионов и последовательностью смешивания растворов катиона никеля и гидроксил-ионов.

Чаще всего используются химические методы, при которых в качестве источника гидроксил-анионов применяется раствор щелочи. Используется метод прямого синтеза, при котором раствор щелочи добавляется к раствору катиона металла (Ni^{2+}). Однако было показано, что при прямом синтезе происходит формирование основных солей [7], имеющих существенно более низкую электрохимическую активность. Поэтому более целесообразно использовать обратный синтез, когда раствор катиона Ni^{2+} медленно добавляют к раствору щелочи [8]. При этом сразу формируется единая фаза гидроксида. К недостаткам такого метода можно отнести то, что СДГ в начале и в конце процесса формируется при различных рН, что влияет на характеристики продукта. Для устранения такого недостатка применяют синтез при постоянном рН [9].

Для синтеза высокодисперсного гидроксида часто используется гомогенного осаждения, при котором ионы-осадители (OH^- анионы) образуются в результате термического гидролиза аминоксодержащих соединений, например мочевины или уротропина. В результате гидролиза гидроксил-ионы образуются по всему объему раствора, в отличие от метода осаждения, где реакция протекает только на границе раздела добавленной капли и исходного раствора. Для проведения синтеза раствор нитрата никеля с мочевиной (уротропином или другим водорастворимым амином) подвергают нагреву и выдержке при температуре 80–90 °C [10]. В работе [11] для синтеза использовалась

смесь воды и этилового спирта. Нагрев раствора в [12] проводили с помощью микроволнового излучения. Главным недостатком метода гомогенного осаждения является энергозатратность.

Практически все химические методы получения гидроксида никеля являются периодическими. Это существенный недостаток, т. к. при получении в периодическом режиме характеристики продукта будут колебаться от партии к партии. Для промышленного применения непрерывный метод значительно предпочтительнее.

ОН– анионы, как ионы-осадители, могут быть синтезированы в результате протекания катодной электрохимической реакции. Образовавшиеся гидроксил-ионы реагируют с катионами металлов с получением гидроксида. Однако метод катодного синтеза в основном используется для получения пленок гидроксида никеля [13]. Следует отметить, что электрохимический синтез обладает рядом преимуществ: регулирование скорости процесса регулированием плотности тока, легкость автоматизации проведения процесса. Поэтому электрохимический синтез является перспективным методом получения гидроксида никеля.

В ранее проведенных исследованиях [6, 14-16] был разработан метод непрерывного электрохимического получения β -Ni(OH)₂ в щелевом диафрагменном электролизере (ЩДЭ) при подаче в катодное пространство раствора сульфата никеля. Данный метод является непрерывным и очень перспективным для синтеза гидроксида никеля. Однако исследования проводились при подаче в катодное пространство чистого раствора сульфата никеля. Однако при промышленном производстве гидроксида никеля целесообразно проводить рециклинг католита. При этом в католите будет накапливаться сульфат натрия, влияние которого на свойства получаемого в ЩДЭ гидроксида никеля не изучено.

Цель и задачи исследования. Целью работы было изучение влияния содержания сульфата натрия в католите на характеристики гидроксида никеля, синтезированного в ЩДЭ.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- синтезировать электрохимически в ЩДЭ образцы гидроксида никеля при различных концентрациях сульфата натрия;
- изучить структурные и электрохимические характеристики полученных образцов
- провести комплексный анализ результатов для определения возможности синтеза активного Ni(OH)₂ в ЩДЭ в присутствии Na₂SO₄ с определением оптимальной концентрации.

Методы, применяемые для изучения влияния сульфата натрия в католите на характеристики гидроксида никеля. Метод синтеза в щелевом диафрагменном электролизере. Базовый метод синтеза [6, 16] основан на электролизе, проводимом в проточном щелевом диафрагменном электролизере (ЩДЭ). В катодное пространство с помощью перистальтического насоса подавался раствор сульфата никеля с концентрацией 0,2 М, в анодное пространство – раствор NaOH, с одинаковым расходом 0,2 л/ч.

При протекании тока на катоде выделялся водород, и происходило генерирование гидроксил-анионов, которые в объеме реагировали с катионами никеля с образованием осадка гидроксида никеля. Осадок выносился из аппарата с потоком католита. Гидроксид отделялся от католита сразу после выхода из ЩДЭ с помощью вакуум-насоса, колбы Бунзена и воронки Бюхнера. Образцы гидроксида высушивались при 90 °С в течение суток, размалывались, просеивались через сито 71 мкм, промывались от растворимых солей и повторно высушивались при тех же условиях.

Для определения влияния сульфата натрия его вводили в католит в различных концентрациях. В табл. 1 приведены маркировки образцов с указанием концентрации сульфата натрия.

Таблица 1 – Маркировка образцов гидроксида никеля

Описание	Маркировка
Чистый Ni(OH) ₂ , без добавления Na ₂ SO ₄	S0,2–12SF0
Ni(OH) ₂ , концентрация Na ₂ SO ₄ 40 г/л	S0,2–12SF40
Ni(OH) ₂ , концентрация Na ₂ SO ₄ 60 г/л	S0,2–12SF60
Ni(OH) ₂ , концентрация Na ₂ SO ₄ 80 г/л	S0,2–12SF80
Ni(OH) ₂ , концентрация Na ₂ SO ₄ 100 г/л	S0,2–12SF100
Ni(OH) ₂ , концентрация Na ₂ SO ₄ 120 г/л	S0,2–12SF120

Метод определения электропроводности раствора сульфата никеля с добавкой сульфата натрия. Удельную электропроводность католита с различной концентрацией сульфата натрия определяли с помощью моста переменного тока с частотой 40 МГц. Для определения использовали стеклянную ячейку с впаянными гладкими Pt электродами.

Методы изучения характеристик образцов Ni(OH)₂, полученных в ЩДЭ при различных концентрациях сульфата натрия. Кристаллическую структуру образцов изучали методом рентгенофазового анализа (РФА) с помощью дифрактометра ДРОН-3 (Россия) (Co-Kα излучение, интервал углов 10–90° 2θ, скорость сканирования 0.1 °/с). Электрохимические свойства гидроксидов никеля изучали методом циклической вольтамперометрии в специальной ячейке ЯСЭ-2 с помощью электронного потенциостата Ellins P-8 (Россия). Для исследований рабочий электрод получали путем намазывания смеси образца гидроксида никеля (81 % масс.), графита (16 % масс.) и ПТФЭ (3 % масс.) [16] на токоотвод: Ni сетка, приваренная на Ni пластинку. Электролит – 6М КОН. Противозлектрод – никелевая сетка, электрод сравнения – насыщенный хлорсеребряный. Изучение проводилось в интервале потенциалов 0 – 500 мВ (НВЭ) при скорости развертки 1 мВ/с;

Результаты изучения влияния концентрации сульфата натрия на характеристики образцов гидроксида никеля. На рис. 1 приведена зависимость удельной электропроводности раствора сульфата никеля с различной концентрацией сульфата натрия. Следует отметить, что удельная электропроводность существенно возрастает при увеличении концентрации.

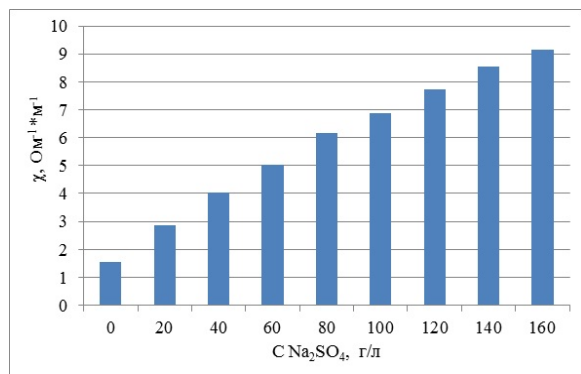


Рис. 1 – Зависимость удельной электропроводности католита от концентрации сульфата натрия, $Ohm^{-1} \cdot cm^{-1}$

Результаты рентгенофазового анализа. Рентгеновские дифрактограммы образцов приведены на рис. 2. Следует отметить, что все образцы имеют структуру, содержащую α и β модификации [6]. При повышении концентрации сульфата натрия кристалличность образцов несколько снижается.

Электрохимические свойства приведены на рис. 3.

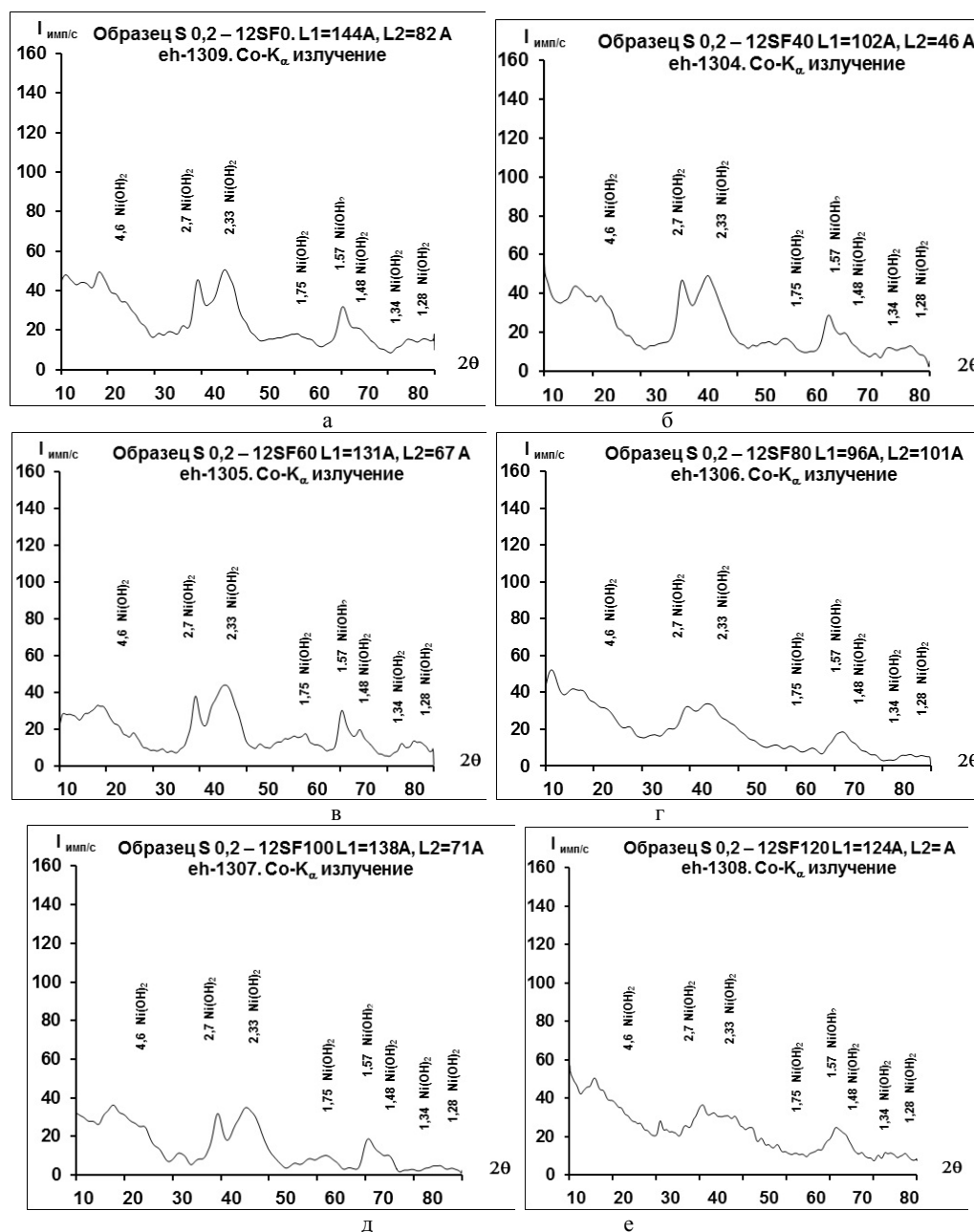


Рис. 2 – Дифрактограммы образцов гидроксида никеля: а - S0,2–12SF0; б - S0,2–12SF40; в - S0,2–12SF60; г - S0,2–12SF80; д - S0,2–12SF100; е - S0,2–12SF120

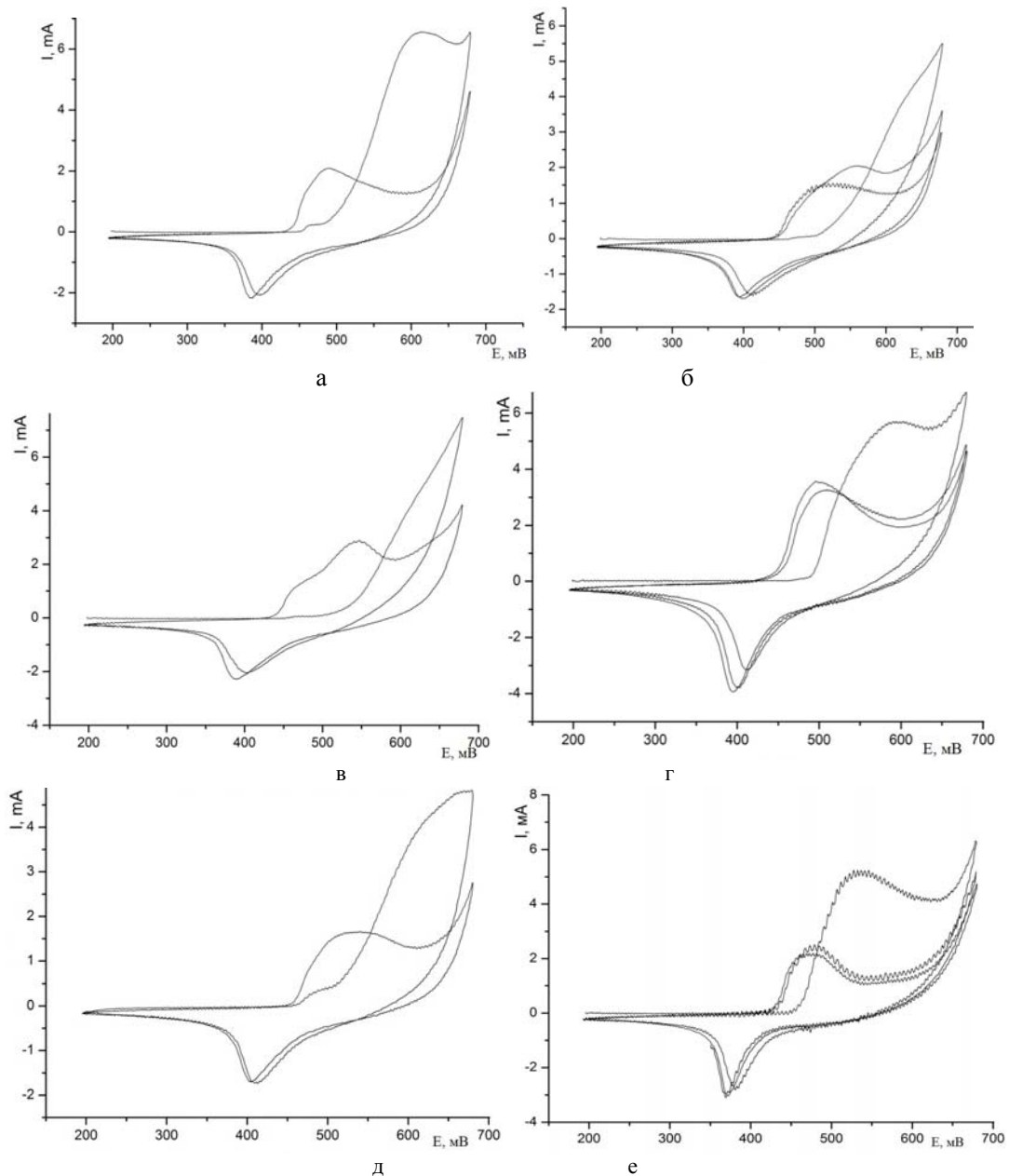


Рис. 3 – Вольтамперограммы образцов: а - S_{0,2}-12SF₀; б - S_{0,2}-12SF₄₀; в - S_{0,2}-12SF₆₀; г - S_{0,2}-12SF₈₀; д - S_{0,2}-12SF₁₀₀; е - S_{0,2}-12SF₁₂₀

Обсуждение результатов изучения влияния содержания сульфата натрия в католите на характеристики гидроксида никеля. В первую очередь необходимо отметить, что изначально была выдвинута гипотеза о возможном влиянии добавки сульфата натрия на процесс получения гидроксида никеля в ЩДЭ. Электрохимический синтез Ni(OH)₂ в ЩДЭ проходит в уникальных условиях [6]: гидроксил-ионы, образующиеся на катоде, непрерывно реагируют с ионами никеля. Таким образом, частица гидроксида никеля растет при движении по щели электролизера. При этом частица гидроксида никеля нагревается за счет Ленц-Джоулева тепла, в результате чего происходит старение (кристаллизация) гидроксида никеля. Количество тепла, выделяющегося в ЩДЭ, зависит от напряжения на электролизере, которое в свою очередь в значительной степени определяется

электропроводностью электролита. Введение добавки сульфата натрия в католит должно повысить электропроводность, что приведет к снижению температуры католита, снижению кристалличности и увеличению электрохимической активности. Все полученные результаты будут рассматриваться, исходя из данной гипотезы.

Определение электропроводности католита с разной концентрацией сульфата натрия. Как показано на рис. 1, удельная электропроводность католита при повышении концентрации сульфата натрия значительно возрастает, что соответствует теоретическим представлениям. Введение 20 г/л Na₂SO₄ в католит приводит к увеличению электропроводности практически вдвое.

Кристаллическая структура образцов. Рентгеновские дифрактограммы (рис. 2) не выявили суще-

ственного влияния концентрации сульфата натрия на кристалличность образцов. Только для образца S0,2–12SF120 наблюдается более значительная аморфизация. Вероятно, это объясняется тем, что при столь высокой электропроводности её вклад к напряжению на электролизере не является большим. При этом следует указать, что наблюдается некоторый разброс кристалличности, что указывает на неравномерность нагрева частиц осадка в электролизере из-за конструктивных особенностей ЩДЭ и возможного образования застойных зон. В общем случае следует сле-

довать вывод, что при любой концентрации сульфата натрия образцы кристаллическая структура образцов Ni(OH)₂ не претерпевает значительных изменений и соответствует высокоактивному гидроксиду никеля.

Электрохимические свойства образцов. Анализ дифрактограмм проводится по наличию четко выраженного первого зарядного пика, значению и стабильности удельных токов разрядного пика и обратимости (разности потенциалов анодного и катодного пика) (табл. 2)

Таблица 2 – Параметры циклических вольтамперограмм различных образцов гидроксида никеля

Маркировка	E_{a1}^1 , мВ	E_{a2}^3 , мВ	E_{k2} , мВ	ΔE , мВ	Гуд, мА
S0,2–12SF0	610	490	400	90	2.1
S0,2–12SF40	-	555	400	155	1.8
S0,2–12SF60	-	555	390	165	2.2
S0,2–12SF80	590	495	395	100	3.9
S0,2–12SF100	-	525	410	115	1.9
S0,2–12SF120	515	470	370	100	3.7

Анализ данных табл. 2 подтвердил ранее сделанный вывод о разбросе данных для различных концентраций Na₂SO₄. Следует отметить, что четко выраженный первый зарядный (анодный) пик, указывающий на высокую электрохимическую активность, характерен для образцов S0,2–12SF80 и S0,2–12SF120. Для этих же образцов характерны самые высокие удельные токи разрядного пика и самая хорошая обратимость. Все это указывает на высокую электрохимическую активность, превышающую электрохимическую активность контрольного образца S0,2–12SF0. Характеристики образцов S0,2–12SF40, S0,2–12SF60 и S0,2–12SF100 несколько хуже. Такие результаты, вероятно указывают на локальный поверхностный перегрев образующегося осадка за счет образования застойных зон в щелевом электролизере. В общем виде следует отметить, что присутствие в катодите сульфата натрия приводит к синтезу в ЩДЭ высокоактивного Ni(OH)₂. При этом получение при высоких концентрациях сульфата натрия позволяет повысить электрохимические характеристики образцов.

Выводы

1. Были изучены структурные и электрохимические свойства образцов гидроксида никеля, полученных в щелевом диафрагменном электролизере при использовании разных концентраций сульфата натрия (от 40 до 120 г/л). Выявлено, что введение Na₂SO₄ до концентрации 100 г/л практически не влияет на кристалличность, при дальнейшем увеличении концентрации кристалличность снижается. Показано, что все образцы, синтезированные в присутствии сульфата натрия, имеют высокую электрохимическую активность, при этом более высокие характеристики выявлены у образцов, синтезированных при высоких концентрациях Na₂SO₄ 80–120 г/л.

2. При комплексном анализе результатов сделан вывод о том, что присутствие в катодите сульфата натрия позволяет синтезировать электрохимически высокоактивные образцы гидроксида никеля. Отрицательное влияние сульфата натрия любой концентрации не выявлено.

Список літератури:

1. Posada, J. O. G. Aqueous batteries as grid scale energy storage solutions [Text] / J. O. G. Posada, A.J.R. Rennie, S. P. Villar, V. L. Martins, J., Marinaccio, A., Barnes, P. J. Hall, et. al // Renewable and Sustainable Energy Review. – 2017. – No. 68. – P. 1174–1182. doi: [10.1016/j.rser.2016.02.024](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.024)
2. Hall, D. S. Raman and Infrared spectroscopy of α and β phases of thin nickel hydroxide films electrochemically formed on nickel [Text] / D. S. Hall, D. J. Lockwood, S. Poirier, C. Bock, B. R. MacDougall // The Journal of Physical Chemistry A. – 2012. – № 116 (25). – P. 6771–6784. doi: [10.1021/jp303546r](https://doi.org/10.1021/jp303546r)
3. Hu, M. Structural transformation and its effects on the electrochemical performances of a layered double hydroxide [Text] / M. Hu, Z. Yang, L. Lei, Y. Sun // Journal of Power Sources. – 2011. – № 196 (3). – P. 1569–1577. doi: [10.1016/j.jpowsour.2010.08.041](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.08.041)
4. Vidotti, M. Nickel hydroxide modified electrodes: a review study concerning its structural and electrochemical properties aiming the application in electrocatalysis, electrochromism and secondary batteries [Text] / M. Vidotti, R. Torresi, S.C. De Torresi // Quim Nova. – 2010. – Vol. 33, № 10. – P. 2176–2186.
5. Kovalenko, V. L. Nickel hydroxide obtained by high-temperature two-step synthesis as an effective material for supercapacitor applications [Text] / V. L. Kovalenko, V. A. Kotok, A. A. Sykchin, I. A. Mudryi, B. A. Ananchenko, A. A. Burkov, V. A. Solovov, S. Deabate, A. Mehdi, J.-L. Bantignies, F. Henn // Journal of Solid State Electrochemistry. – 2016. – № 21 (3). – P. 683 – 691. doi: [10.1007/s10008-016-3405-2](https://doi.org/10.1007/s10008-016-3405-2)
6. Kovalenko, V. Definition of factors influencing on Ni(OH)₂ electrochemical characteristics for supercapacitors [Text] / V. Kovalenko, V. Kotok, A. Bolotin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 5/6 (83). – P. 17–22. doi: [10.15587/1729-4061.2016.79406](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79406)
7. Соловов, В. А. Механизм формирования гидроксида никеля в системе Ni(NO₃)₂–NaOH [Текст] / В. А. Соловов, Н. В., Николенко, В. Л. Коваленко, В. А. Коток, Д. В. Гиренко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях. – 2017. – № 7 (1229). – С. 199–204.
8. Ramesh, T. N. Synthesis of nickel hydroxide, Effect of precipitation conditions on phase selectivity and structural disorder [Text] / T. N. Ramesh, P. V. Kamath // Journal of Power Sources. – 2006. – № 156 (2). – P. 655–661. doi: [10.1016/j.jpowsour.2005.05.050](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.05.050)
9. Hu, B. Controllable Synthesis of Zinc-Substituted α - and β -Nickel Hydroxide Nanostructures and Their Collective Intrinsic Properties [Text] / B. Hu, S.-F. Chen, S.-J. Liu // Chemistry - A European Journal. – 2008. – № 14 (29). – P. 8928 – 8938. doi: [10.1002/chem.200800458](https://doi.org/10.1002/chem.200800458)
10. Gong, L. Facile solvothermal synthesis Ni(OH)₂ nanostructure for electrochemical capacitors [Text] / L. Gong, X. Liu, L. Su // Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials. – 2011. – № 21(4). – P. 866–870. doi: [10.1007/s10904-011-9519-1](https://doi.org/10.1007/s10904-011-9519-1)

11. Yang, L.-X. Hydrothermal synthesis of nickel hydroxide nanostructures in mixed solvents of water and alcohol [Text] / L.-X. Yang, Y.-J. Zhu, H. Tong, Z.-H. Liang, L. Li, L. Zhang // Journal of Solid State Chemistry. – 2007. – № 180 (7). – P. 2095–2101. doi: [10.1016/j.jssc.2007.05.009](https://doi.org/10.1016/j.jssc.2007.05.009)
12. Xu, L. 3D Flowerlike α -Nickel Hydroxide with Enhanced Electrochemical Activity Synthesized by Microwave-Assisted Hydrothermal Method [Text] / L. Xu, Y.-S. Ding, C.-H. Chen, L. Zhao, C. Rimkus, R. Joesten, S. L. Suib // Chemistry of Materials. – 2008. – № 20 (1). – P. 308–316. doi: [10.1021/cm702207w](https://doi.org/10.1021/cm702207w)
13. Fomanyuk, S. S. Kinetics of electrochromic process in thin films of cathodically deposited nickel hydroxide [Text] / S. S. Fomanyuk, Y. S. Krasnov, G. Y. Kolbasov // Journal of Solid State Electrochemistry. – 2013. – № 17 (10). – P. 2643–2649. doi: [10.1007/s10008-013-2169-1](https://doi.org/10.1007/s10008-013-2169-1)
14. Kovalenko, V. Obtaining of Ni-Al layered double hydroxide by slit diaphragm electrolyzer [Text] / V. Kovalenko, V. Kotok // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 2/6 (86). – P. 11–16. doi: [10.15587/1729-4061.2017.95699](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.95699)
15. Kovalenko, V. L. The synthesis of nickel hydroxide by electrolysis from nickel nitrate solution in the slit diaphragm electrolyzer. Electrochemical properties [Text] / V. L. Kovalenko, V. A. Kotok // Collection of research papers of National mining university. – 2015. – № 49 – P. 181–186.
16. Kovalenko, V. L. Electrochemical obtaining of $\text{Ni}(\text{OH})_2$ from sulphate solution by flowing slit diaphragm electrolyzer [Text]: Book of abstracts / V. L. Kovalenko, V. A. Kotok, V. V. Malishev // RSE-SEE, 1st regional symposium on electrochemistry of South-East Europe, 2008. – P. 201–203.
17. Kotok, V. Optimization of nickel hydroxide electrode of the hybrid supercapacitor [Text] / V. Kotok, V. Kovalenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technology. – 2017. – № 1/6 (85). – P. 4–9. doi: [10.15587/1729-4061.2017.90810](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.90810)

Bibliography (transliterated):

1. Posada, J. O. G., Rennie, A. J. R., Villar, S. P., Martins, V. L., Marinaccio, J., Barnes, A., ... Hall, P. J. (2017). Aqueous batteries as grid scale energy storage solutions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68, 1174–1182. doi: [10.1016/j.rser.2016.02.024](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.024)
2. Hall, D. S., Lockwood, D. J., Poirier, S., Bock, C., MacDougall, B. R. (2012). Raman and Infrared Spectroscopy of α and β Phases of Thin Nickel Hydroxide Films Electrochemically Formed on Nickel. The Journal of Physical Chemistry A, 116 (25), 6771–6784. doi: [10.1021/jp303546r](https://doi.org/10.1021/jp303546r)
3. Hu, M., Yang, Z., Lei, L., Sun, Y. (2011). Structural transformation and its effects on the electrochemical performances of a layered double hydroxide. Journal of Power Sources, 196 (3), 1569–1577. doi: [10.1016/j.jpowsour.2010.08.041](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.08.041)
4. Vidotti, M., Torresi, R., De Torresi, S. (2010). Nickel hydroxide modified electrodes: a review study concerning its structural and electrochemical properties aiming the application in electrocatalysis, electrochromism and secondary batteries. Quim Nova, 33, 2176–2186.
5. Kovalenko, V. L., Kotok, V. A., Sykchin, A. A., Mudryi, I. A., Ananchenko, B. A., Burkov, A. A., ... Henn, F. (2016). Nickel hydroxide obtained by high-temperature two-step synthesis as an effective material for supercapacitor applications. Journal of Solid State Electrochemistry, 21 (3), 683–691. doi: [10.1007/s10008-016-3405-2](https://doi.org/10.1007/s10008-016-3405-2)
6. Kovalenko, V., Kotok, V., Bolotin, O. (2016). Definition of factors influencing on $\text{Ni}(\text{OH})_2$ electrochemical characteristics for supercapacitors. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (6 (83)), 17–22. doi: [10.15587/1729-4061.2016.79406](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79406)
7. Solovov, V. A., Nikolenko, N. V., Kovalenko, V. L., Kotok, V. A., Girenko, D. V. (2017) Formation mechanism of nickel hydroxide in system $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2\text{-NaOH}$. Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies., 7 (1229), 199–204.
8. Ramesh, T. N., Kamath, P. V. (2006). Synthesis of nickel hydroxide: Effect of precipitation conditions on phase selectivity and structural disorder. Journal of Power Sources, 156 (2), 655–661. doi: [10.1016/j.jpowsour.2005.05.050](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.05.050)
9. Hu, B., Chen, S.-F., Liu, S.-J., Wu, Q.-S., Yao, W.-T., Yu, S.-H. (2008). Controllable Synthesis of Zinc-Substituted α - and β -Nickel Hydroxide Nanostructures and Their Collective Intrinsic Properties. Chemistry - A European Journal, 14 (29), 8928–8938. doi: [10.1002/chem.200800458](https://doi.org/10.1002/chem.200800458)
10. Gong, L., Liu, X., Su, L. (2011). Facile Solvothermal Synthesis $\text{Ni}(\text{OH})_2$ Nanostructure for Electrochemical Capacitors. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 21 (4), 866–870. doi: [10.1007/s10904-011-9519-1](https://doi.org/10.1007/s10904-011-9519-1)
11. Yang, L.-X., Zhu, Y.-J., Tong, H., Liang, Z.-H., Li, L., Zhang, L. (2007). Hydrothermal synthesis of nickel hydroxide nanostructures in mixed solvents of water and alcohol. Journal of Solid State Chemistry, 180 (7), 2095–2101. doi: [10.1016/j.jssc.2007.05.009](https://doi.org/10.1016/j.jssc.2007.05.009)
12. Xu, L., Ding, Y.-S., Chen, C.-H., Zhao, L., Rimkus, C., Joesten, R., Suib, S. L. (2008). 3D Flowerlike α -Nickel Hydroxide with Enhanced Electrochemical Activity Synthesized by Microwave-Assisted Hydrothermal Method. Chemistry of Materials, 20 (1), 308–316. doi: [10.1021/cm702207w](https://doi.org/10.1021/cm702207w)
13. Fomanyuk, S. S., Krasnov, Y. S., Kolbasov, G. Y. (2013). Kinetics of electrochromic process in thin films of cathodically deposited nickel hydroxide. Journal of Solid State Electrochemistry, 17 (10), 2643–2649. doi: [10.1007/s10008-013-2169-1](https://doi.org/10.1007/s10008-013-2169-1)
14. Kovalenko, V., Kotok, V. (2017). Obtaining of Ni-Al layered double hydroxide by slit diaphragm electrolyzer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (6 (86)), 11–16. doi: [10.15587/1729-4061.2017.95699](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.95699)
15. Kovalenko, V. L., Kotok, V. A. (2015). The synthesis of nickel hydroxide by electrolysis from nickel nitrate solution in the slit diaphragm electrolyzer. Electrochemical properties. Collection of research papers of National mining university, 49, 181–186.
16. Kovalenko, V. L., Kotok, V. A., Malishev, V. V. (2008). Electrochemical obtaining of $\text{Ni}(\text{OH})_2$ from sulphate solution by flowing slit diaphragm electrolyzer. RSE-SEE, 1st regional symposium on electrochemistry of South-East Europe, 201–203.
17. Kotok, V., Kovalenko, V. (2017). Optimization of nickel hydroxide electrode of the hybrid supercapacitor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (6 (85)), 4–9. doi: [10.15587/1729-4061.2017.90810](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.90810)

Поступила (received) 10.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вивчення характеристик $\text{Ni}(\text{OH})_2$, отриманого в щільному діафрагмовому електролізері при різних концентраціях сульфату натрію / В. Л. Коваленко, В. А. Коток // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 88–94. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-5459.

Изучение характеристик $\text{Ni}(\text{OH})_2$, полученного в щелевом диафрагменном электролизере при различной концентрации сульфата натрия / В. Л. Коваленко, В. А. Коток // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 88–94. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-5459.

Investigation of characteristics of $\text{Ni}(\text{OH})_2$, obtained in the slit diaphragm electrolyzer under different Na_2SO_4 concentrations / V. Kovalenko, V. Kotok // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P. 88–94. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Коваленко Вадим Леонідович – кандидат технічних наук, доцент 1) кафедра аналітичної хімії та хімічної технології харчових добавок і косметичних засобів, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, м. Дніпро, Україна, 49005

2) Кафедра технології неорганічних речовин та технологій електрохімічних виробництв, ФГБОУ ВО Вятський державний університетвул. Московська, 36, м. Кіров, Російська Федерація, 610000.

Коваленко Вадим Леонідович – Кандидат технических наук, доцент, 1) Кафедра аналитической химии и химической технологии пищевых добавок и косметических средств, ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», просп. Гагарина, 8, г. Днепр, Украина, 49008; 2) Кафедра технологии неорганических веществ и электрохимических производств, ФГБОУ «Вятский государственный университет», ул. Московская, 36, г. Киров, Российская Федерация, 610000; E-mail: vadimchem@gmail.com

Коток Валерій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент: 1) Кафедра процесів і апаратів, та загальної хімічної технології, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, м. Дніпро, Україна, 49005, 2) Кафедра технології неорганічних речовин та технологій електрохімічних виробництв, ФГБОУ ВО Вятський державний університет, вул. Московська, 36, м. Кіров, Російська Федерація, 610000, E-mail: valeriykotok@gmail.com

Коток Валерій Анатолійович – Кандидат технических наук, доцент, 1) процессов и аппаратов, и общей химической технологии, ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», просп. Гагарина, 8, г. Днепр, Украина, 49008; 2) Кафедра технологии неорганических веществ и электрохимических производств, ФГБОУ «Вятский государственный университет», ул. Московская, 36, г. Киров, Российская Федерация, 610000, тел. +38050-602-11-15, E-mail: valeriykotok@gmail.com

Kovalenko Vadym – PhD, associate professor; 1) The Department of Analytical Chemistry and Food Additives and Cosmetics SHEI [Ukrainian State University of Chemical Technology](http://www.ukchemtech.edu), Gagarina ave, 8, Dnipro, Ukraine, 49005

2) The Department of Technologies of Inorganic Substances and Electrochemical Manufacturing, FSBEI HE Vyatka State University, Moskovskaya str., 36, Kirov city, Russian Federation 610000, E-mail: vadimchem@gmail.com

Kotok Valerii – PhD, associate professor; 1) The Department of Processes, Apparatus and General Chemical Technology, SHEI [Ukrainian State University of Chemical Technology](http://www.ukchemtech.edu), Gagarina ave, 8, Dnipro city, Ukraine, 49005; 2) The Department of Technologies of Inorganic Substances and Electrochemical Manufacturing, FSBEI HE Vyatka State University, Moskovskaya str., 36, Kirov city, Russian Federation 610000, E-mail: valeriykotok@gmail.com

УДК 662.614.2:661.975:669.18

И. Г. ЯКОВЛЕВА, А. А. ПЕТРИК

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗОВ В ВАННЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА

Рассматривается аналитическая модель горения монооксида углерода в агрегате, позволяет анализировать зависимость концентрации газов от конструктивных параметров фурмы и дутьевого режима плавки. При этом в расчете рассматривается трехкомпонентная среда, состоящая из кислорода моно- и диоксида углерода. Результаты работы могут быть использованы при определении рациональных конструкций дутьевых устройств и технологических параметров продувки ванны сталеплавильного агрегата с учетом распределения концентраций газов, что позволит вплотную подойти к вопросу разработки энергосберегающих режимов выплавки стали.

Ключевые слова: трехкомпонентная среда, модель, энергосберегающий режим, дутьевое устройство, концентрация газов, монооксид углерода, газовый поток, реакционная зона, факел, сталеплавильный агрегат.

Розглядається аналітична модель горіння монооксиду вуглецю в агрегаті, яка дозволяє аналізувати залежність концентрації газів від конструктивних параметрів фурми і дутьєвого режиму плавки. При цьому в розрахунок розглядається трикомпонентне середовище, що складається з кисню моно- і діоксиду вуглецю. Результати роботи можуть бути використані при визначенні раціональних конструкцій дуттєвих пристроїв і технологічних параметрів продувки ванни сталеплавильного агрегату з урахуванням розподілу концентрацій газів, що дозволить підійти до питання розробки енергозберігаючих режимів виплавки стали.

Ключові слова: трикомпонентне середовище, модель, енергозберігаючий режим, дуттєвий пристрій, концентрація газів, монооксид вуглецю, газовий потік, реакційна зона, факел, сталеплавильний агрегат.

In the article is shows the burning of carbon monoxide in the steelmaking unit, which allow to analyze the dependence of the gas concentration on the design parameters of the lance and the blowing mode of melting. The result of the work is the calculation of the volume fraction of gases in the working space of the steelmaking unit, namely O₂, CO, CO₂ for various designs of blowing devices. As a scientific novelty, the existing technique has been improved and the possibility of analyzing the flow of gases (O₂, CO, CO₂) in the unit. It allows studying the influence of the structural features of the lance (height, nozzle angle, diameters of the nozzles of the lance) and the process parameters of purging (pressure, oxygen flow and speed) on the distribution of gas concentrations.

Practical significance lies in the possibility of using the results of the work to determine the rational design of blowing devices, which will allow us to the issue of developing energy-saving steelmaking modes.

Keywords: three-component medium, model, energy-saving modes, blowing device, gas concentration, carbon monoxide, gas stream, reaction zone, torch, steelmaking unit.

© И. Г. Яковлева, А. А. Петрик. 2017

Введение. В соответствии с представлениями [1], в струях, истекающих из сопел фурмы, можно выделить следующие зоны: сверхзвуковую, переходную и свободной струи.

Процесс горения СО в струе относится к типу диффузионного горения [2], так как смешение СО и О₂ происходит по цепному механизму с участием активных центров. В данной постановке при изучении процесса горения проведение прямых опытных экспериментов чрезвычайно затруднено, поэтому необходимую для практических целей информацию можно получить при проведении численного моделирования [3, 4].

Анализ литературных данных и постановка проблемы моделирования продувки ванны сталеплавильного агрегата. В трудах [5–8] авторами рассмотрен механизм и приведена визуализация гидродинамических процессов с нанесением изолиний концентраций образования оксида углерода для конвертера при условии подачи кислорода через 4-х сопловую фурму, при изменении углов наклона сопел от 0 до 25°. При этом учет и распределение других газовых элементов, участвующих в реакции при взаимодействии О₂ с расплавом не учитывается.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является определение влияния конструктивных особенностей дутьевого устройства и технологических параметров продувки на распределение концентраций газов.

Задачей исследования является расчет концентрации газов при различных конструктивных параметрах дутьевого устройства.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Усовершенствовать математическую модель распределения концентраций газов при продувке расплава сталеплавильного агрегата кислородом.

2. Определить объемные доли газов в рабочем пространстве сталеплавильного агрегата, а именно О₂, СО, СО₂ для различных конструкций дутьевых устройств.

Материалы и методы исследования определения концентрации газов в ванне сталеплавильного агрегата. Поток газов в рабочем пространстве сталеплавильного агрегата образует сложную пространственную структуру турбулентных вихревых течений, крайне сложную для теоретического анализа. В связи с этим при выполнении численного моделирования использовали следующие предположения и допущения:

1. Кислородная фурма находится по оси симметрии объема.

2. Контакт газа с металлической ванной происходит по горизонтальной поверхности.

3. В модели используется осевая симметрия потока.

4. Течение стационарно в макроскопическом масштабе времени, а пульсационные скорости подчиняются гипотезе Прандтля.

5. В любой точке рабочего объема агрегата присутствуют только кислород, СО и СО₂ в концентрациях, определяемых динамикой течения.

6. Поток кислорода, вдуваемого в агрегат, полностью поглощается ванной, из которой выделяется газовая смесь СО и СО₂.

Условия:

1. На цилиндрической границе, действует условие непротекания.

2. На поверхности раздела сред и атмосферы действуют граничные условия свободного потока (непрерывность скоростей и давлений).

Для определения поля средних и пульсационных скоростей в объеме агрегата в качестве исходных использовали дифференциальные уравнения Эйлера в дивергентном виде [9]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{w}) = 0, \quad \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \bar{w}) + \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \bar{w}) + \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \bar{w}) + \operatorname{div}(\rho \bar{w}) = 0, \quad (2)$$

где r и z - цилиндрические координаты, ρ - плотность, p - давление, u , v - составляющие вектора скорости \bar{w} вдоль осей z и r .

Для замыкания системы (1, 2) использовали уравнение состояния в виде:

$$p = p(\rho, J), \quad (3)$$

где $J = E - w^2 / 2$ - удельная внутренняя энергия.

При замене размерных величин нормированными (w нормируется из скорости звука в невозмущенном потоке a_∞ , плотность ρ на ρ_∞ - плотность невозмущенного потока, координаты z и r - на радиус R цилиндра, время t - на $(\frac{R}{a_\infty})$ получим:

$$w_\infty = M_\infty, \rho_\infty = 1, \quad (4)$$

$$\rho_\infty = \frac{1}{\gamma}, J_\infty = \frac{J}{[\gamma^*(\gamma-1)]}, \quad (5)$$

где M - число Маха; $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ - отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме.

Уравнения (4), (5) будем решать с помощью разностной схемы методом установления [10]. Для этого введем следующие начальные условия: $w_0 = 0$, плотность и давление газа в агрегате задаются, при этом примем следующую конкретизацию уравнения состояния (5):

$$J_0 = \left(\frac{p_0}{p_\infty}\right) * \left(\frac{\rho_\infty}{\rho}\right) * J_\infty. \quad (6)$$

В дальнейшем алгоритм решения строится на расщеплении по физическим процессам [10], причем каждый шаг решения состоит из трех этапов: 1. Эйле-

ров этап. Учитываются эффекты ускорения газа лишь за счет давления. 2. Лагранжев этап. Учитываются потоки массы через границы ячеек расчетной сетки. 3. Вычисление окончательных значений параметров потока на основе законов сохранения массы, импульса и энергии для каждой ячейки, и всей системы в целом на фиксированной расчетной сетке.

Сходимость проверяли по критериям невязки массы втекающего и вытекающего газа, а также максимального изменения скорости по сравнению с предыдущим приближением. Итерации заканчиваются при одновременном выполнении обоих критериев.

$$\tilde{E}_{i,j}^n = E_{i,j}^n - \left[\frac{j \cdot p_{i,j+\frac{1}{2}}^n \cdot v_{i,j+\frac{1}{2}}^n - (j-1) p_{i,j-\frac{1}{2}}^n \cdot v_{i,j-\frac{1}{2}}^n + \frac{p_{i+\frac{1}{2},j}^n - p_{i-\frac{1}{2},j}^n}{\Delta z} \cdot u_{i+\frac{1}{2},j}^n}{\left(j - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta r} \right] \cdot \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}; \quad (9)$$

для второго этапа

$$\Delta m_{i+\frac{1}{2},j}^n = \begin{cases} (j^{-1/2}) \cdot \rho_{i,j}^n \cdot \frac{\tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n}{2} \cdot \Delta r^2; \\ \Delta t > 0, \tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n > 0; \\ (j^{-1/2}) \cdot \rho_{i+1,j}^n \cdot \frac{\tilde{u}_{i+1,j}^n}{2} \cdot \Delta r^2; \Delta t < 0, \tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n < 0; \end{cases} \quad (10)$$

для третьего этапа

$$\rho_{i,j}^{n+1} = \rho_{i,j}^n + \frac{1}{\left(j - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta r^2 \cdot \Delta z} \cdot \left[\Delta m_{i-\frac{1}{2},j}^n - \Delta m_{i+\frac{1}{2},j}^n + \Delta m_{i,j-\frac{1}{2}}^n - \Delta m_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right]; \quad (11)$$

$$X_{i,j}^{n+1} = \left\{ D_{i,j}^1 \cdot \tilde{X}_{i-1,j}^n \cdot \Delta m_{i-\frac{1}{2},j}^n + D_{i,j}^2 \cdot \tilde{X}_{i,j-1}^n \cdot \Delta m_{i,j-\frac{1}{2}}^n - D_{i,j}^3 \cdot \tilde{X}_{i+1,j}^n \cdot \Delta m_{i+\frac{1}{2},j}^n - D_{i,j}^4 \cdot \tilde{X}_{i,j+1}^n \cdot \Delta m_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \tilde{X}_{i,j}^n \cdot \left[\left(j - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta r^2 \cdot \Delta z \cdot \rho_{i,j}^n + (1 - D_{i,j}^1) \cdot \Delta m_{i-\frac{1}{2},j}^n + (1 - D_{i,j}^2) \cdot \Delta m_{i,j-\frac{1}{2}}^n - (1 - D_{i,j}^3) \cdot \Delta m_{i+\frac{1}{2},j}^n - (1 - D_{i,j}^4) \cdot \Delta m_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right] \right\} // \left[\left(j - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta r^2 \cdot \Delta z \cdot \rho_{i,j}^{n+1} \right], \quad (12)$$

здесь Δm – изменение массы ячейки; X – одна из величин (u, v, E),

$$D_{i,j}^k = \begin{cases} 1, \text{поток втекает в прямоугольник } (i, j) \text{ со стороны } k \\ 0, \text{поток вытекает из прямоугольника } (i, j) \text{ со стороны } k \end{cases} \quad (13)$$

В данных условиях для трехкомпонентной среды, состоящем из кислорода моно- и диоксида углерода, необходимо учитывать все три составляющие втекающей и вытекающей из ячейки массы. С этой целью введем в рассмотрение объемные (молярные) доли каждого из газов. Тогда на эйлеровом этапе парциальное давление определится:

$$p_{i,j}^\alpha = \rho_{i,j}^\alpha \cdot (\gamma_\alpha - 1) \cdot \left(E_{i,j}^\alpha - \frac{1}{2} \cdot W_{i,j}^2 \right), \quad (14)$$

здесь α – обобщенное обозначение одного из трех газов.

Расчет течения газов в сталеплавильном агрегате проводили по указанной методике на сетке, содержащей 37 узлов в осевом и 15 узлов в радиальном направлении в соответствии с расчетной областью. Расчет выполнялся в пакете программ на языке C++.

Разностная аппроксимация дифференциальных уравнений (1, 2) приводит к следующим расчетным формулам:

для первого этапа

$$\tilde{u}_{i,j}^n = u_{i,j}^n - \frac{p_{i+\frac{1}{2},j}^n - p_{i-\frac{1}{2},j}^n}{\Delta z} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}; \quad (7)$$

$$\tilde{v}_{i,j}^n = v_{i,j}^n - \frac{p_{i,j+\frac{1}{2}}^n - p_{i,j-\frac{1}{2}}^n}{\Delta r} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}; \quad (8)$$

Итерации продолжались до одновременного достижения относительной невязки втекающей и вытекающей массы не более 10^{-6} и изменения средних скоростей за одну итерацию на величину не более 1 %.

На рис. 1 (А, Б, В) - 2 (А, Б, В) приведены варианты расчета течения газов: на рис. 1 (А, Б, В) – продувка ванны агрегата через 6-ти сопловую фурму с углом наклона сопел 30° ; на рис. 2 (А, Б, В) – через экспериментальную фурму (комбинированное расположение углов наклона сопел): т. 1, 23 – нижняя и верхняя границы контакта газа с металлом. Сравнивая результаты, можно отметить, что при опытной конструкции фурмы проникновение молекул кислорода в расплав значительно выше, что приводит к интенсификации процесса выделения СО. Объемная доля каждого из газов однозначно определяется, если известна объемная доля кислорода.

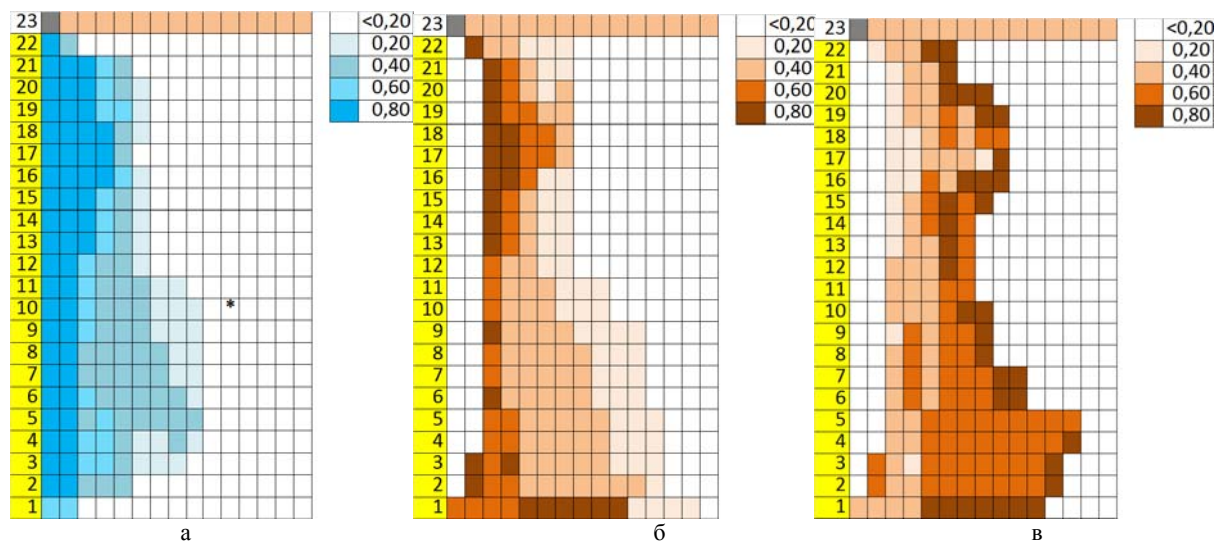


Рис. 1 – Объемная концентрация газов в рабочем пространстве конвертера для базового варианта конструкции фурмы: а – O_2 ; б – CO ; в – CO_2

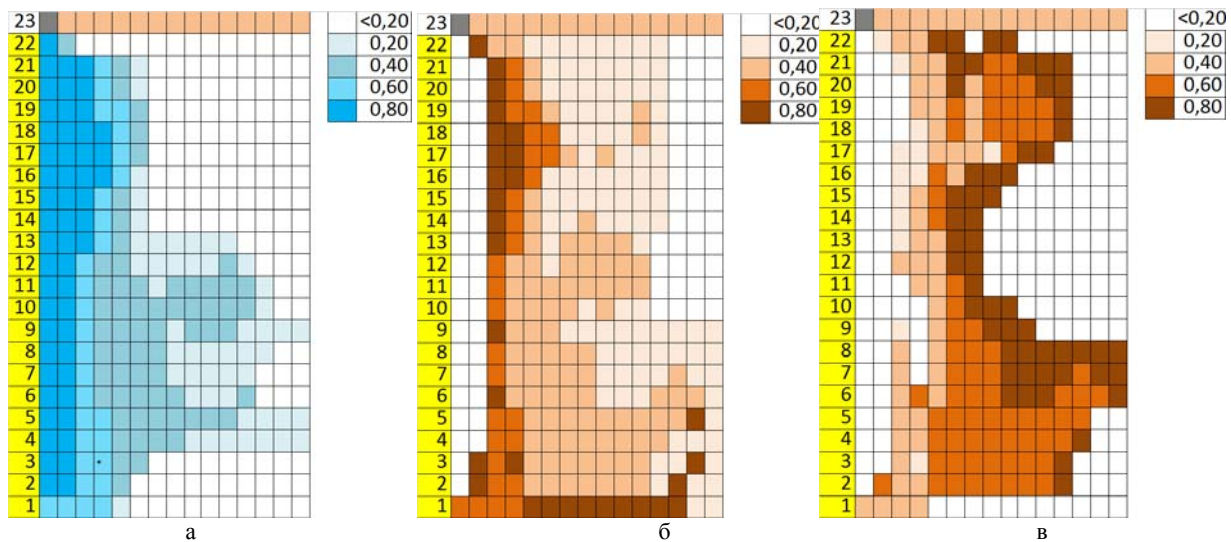


Рис. 2 – Объемная концентрация газов в рабочем пространстве конвертера для опытного варианта конструкции фурмы: а – O_2 ; б – CO ; в – CO_2

Выводы

1. Предложенная математическая модель позволяет анализировать зависимость концентрации газов (O_2 , CO , CO_2) от конструктивных параметров фурмы и дутьевого режима плавки.

2. Полученные результаты работы позволяют исследовать влияние конструктивных особенностей фурмы на распределение концентраций газов, что позволит вплотную подойти к вопросу определения рациональной конструкции дутьевого устройства, обеспечивающего наибольшее тепловыделение.

Список литературы:

1. Протопопов, Е. В. О повышении эффективности дожигаания отходящих газов в полости конвертера [Текст] / Е. В. Протопопов, А. Г. Чернятевич, Е. Л. Мастероженко, С. В. Юдин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1999. – № 3 – С. 30–35.
2. Охотский, В. Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов [Текст] / В. Б. Охотский. – М.: Металлургия, 1993. – 151 с.
3. Айзатулов, Р. С. Теоретические основы сталеплавильных процессов [Текст] / Р. С. Айзатулов, Е. В. Протопопов, П. С. Харлашин, Л. Ю. Назюта. – М.: МИСиС, 2002. – 320 с.
4. Крикент, И. В. Численное исследование гидродинамики расплава в установке ковш-печь постоянного тока [Текст] / И. В. Крикент, С. Е. Самохвалов, Д. Ю. Кабаков, И. В. Кривцун, В. Ф. Демченко, В. П. Питюк, С. В. Греков // Современная электрометаллургия. – 2014. – № 3. – С. 45–49.
5. Самохвалов, С. Е. Квazitрехмерная математическая модель гидродинамических процессов в полости конвертера [Текст] / С. Е. Самохвалов, А. Н. Сокол // Математическое моделирование. – 2008. – № 19. – С. 67–70.
6. Сокол, А. Н. Математическое моделирование гидродинамических процессов в полости конвертера во время верхней продувки в трехмерной постановке [Текст] / А. Н. Сокол // Вестник ХНТУ. – 2010. – № 39. – С. 448–454.
7. Сокол, А. Н. Сопряженная трехмерная математическая модель гидродинамических и массопереносных процессов в шлаковой и металлических фазах металлургического конвертера [Текст] / А. Н. Сокол // Математическое моделирование. – 2012. – № 27. – С. 101–104.
8. Сокол, А. Н. Математическое моделирование гидродинамических и массопереносных процессов в полости конвертера с учетом наличия лома [Текст] / А. Н. Сокол // Математическое моделирование. – 2013. – № 29. – С. 54–57.
9. Митрофанова, О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок [Текст] / О. В. Митрофанова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 288 с.

10. Огурцов, А. П. Методи розщеплення в задачах гідродинаміки і тепломасопереносу [Текст] / А. П. Огурцов, С. Є. Самохвалов, Т. Ж. Надригайло. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2003. – 260 с.
- Bibliography (transliterated):**
1. Protopopov, E. V., Chernyatevich, A. G., Masterovenko, E. L., Yudin, S. V. (1999). On increasing the efficiency of afterburning of waste gases in the converter cavity. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija*, 3, 30–35.
 2. Okhotsky, V. B. (1993). *Physico-chemical mechanics of steel-smelting processes*. Moscow: Metallurgy, 151.
 3. Aizatulov, R. S., Protopopov, E. V., Kharlashin, P. S. Nazjuta L. Ju. (2002). *The theoretical foundations of steelmaking processes*. Moscow: MISiS, 320.
 4. Krikent, I. V., Samokhvalov, S. E., Kabakov, D. Ju., Krivcun, I. V., Demchenko, V. F., Pipjuk, V. P., Grekov, S. V. (2014). Numerical study of melt hydrodynamics in the installation of a ladle-furnace of direct current. *Modern electrometallurgy*, 3, 45–49.
 5. Samokhvalov, S., Sokol, A. (2008). Quasi-three-dimensional mathematical model of hydrodynamic processes in the converter cavity. *Mathematical modeling*, 19, 67–70.
 6. Sokol, A. (2010). Mathematical modeling of hydrodynamic processes in the cavity of the converter during the upper purge in a three-dimensional setting. *Messenger of the KhNTU*, 39, 448–454.
 7. Sokol, A. (2012). Conjugated three-dimensional mathematical model of hydrodynamic and mass transfer processes in slag and metallic phases of metallurgical converter. *Mathematical modeling*, 27, 101–104.
 8. Sokol, A. (2013). Mathematical modeling of hydrodynamic and mass transfer processes in the cavity of the converter taking into account the presence of scrap. *Mathematical modeling*, 29, 54–57.
 9. Mitrofanova, O. (2010). *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennyh potokov v kanalah jaderno-jenergeticheskikh ustanovok*. Moscow: FIZMATLIT, 288.
 10. Ogurtsov, A., Samokhvalov, S., Nadrigajlo, T. (2003). *Splitting methods in problems in problems of hydrodynamics and heat transfer*. Dnipropetrovsk: system technologies, 260.

Поступила (received) 24.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

До питання визначення концентрації газів у ванні сталеплавильних агрегатів / І. Г. Яковлева, О. А. Петрик // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С. 94–98. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

К вопросу определения концентрации газов в ванной сталеплавильных агрегатов / И. Г. Яковлева, А. А. Петрик // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.94–98. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

To the question of determining the concentration of gases in the bath of steel-smelting unit / I. Jakovleva, A. Petrik // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P. 94–98. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Яковлева Ірина Геннадіївна – доктор технічних наук, професор, Запорізька державна інженерна академія, кафедра "Теплоенергетики"; Пр. Соборний 226, м. Запоріжжя, Україна, 69007; e-mail: yakovleva@zgia.zp.ua.

Петрик Олексій Анатолійович – аспірант, Запорізька державна інженерна академія, кафедра "Теплоенергетики"; Пр. Соборний 226, м. Запоріжжя, Україна, 69007; e-mail: iternell17@mail.ru.

Яковлева Ірина Геннадіївна – доктор технічних наук, професор, Запорізька державна інженерна академія, кафедра «Теплоенергетики», Пр. Соборний 226, г. Запоріжжя, Україна, 69007; e-mail: yakovleva@zgia.zp.ua.

Петрик Олексій Анатолійович – аспірант, Запорізька державна інженерна академія, кафедра «Теплоенергетики»; Пр. Соборний 226, г. Запоріжжя, Україна, 69007; e-mail: iternell17@mail.ru.

Jakovleva Irina – doctor of technical sciences, Professor, Zaporozhye State Engineering Academy; Department of Power Engineering,; Sobornyy 226, Zaporozhye, Ukraine, 69006; e-mail: iternell17@mail.ru.

Petrik Aleksey – post-graduate student, Zaporozhye State Engineering Academy, Department of Power Engineering,; Sobornyy 226, Zaporozhye, Ukraine, 69006; e-mail: yakovleva@zgia.zp.ua.

УДК 622.83:622.27

С. В. ПИСЬМЕННИЙ

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОЇ ЗОНИ СКЛЕПОУТВОРЕННЯ НА КОНТУРІ ПІДЗЕМНО-ТРАНСПОРТНОЇ ВИРОБКИ ПРИ КОМБІНОВАНІЙ РОЗРОБЦІ ЗАЛІЗОРУДНИХ РОДОВИЩ

Запропонована методика визначення кутової точки руйнівного тиску на контурі гірничої виробки з урахуванням техногенних сил, яка дає можливість визначити тиск та слабе місце на контурі гірничої виробки в умовах однорідного та неоднорідного гірського масиву. Дана методика дозволяє розрахувати тиск який діє на контур виробки з урахуванням раніше відробленого очисного блоку, що знаходиться в безпосередній близькості. Дана методика відрізняється від відомих визначенням кута діючого руйнівного тиску на контурі виробки урахуванням глибини розробки, радіусу кривизни склепіння утворюючої виробку та напруженнями, які змінюють початкове поле при очисному вийманні.

Ключові слова: напруження, кутова руйнівна точка, виробка, радіус кривизни склепіння, тиск, очисний блок.

Предложена методика определения угловой точки разрушаемого давления на контуре горной выработки с учетом техногенных сил, которые дают возможность определить давление и слабое место на контуре подземной горной выработки в условиях однородного и неоднородного горного массива. Данная методика позволяет определить действующего давление на контур выработки с учетом ранее отработанного очистного блока находящегося в непосредственной близости. Методика определения действующего угла разрушительного давления на контуре выработки отличается от известных учетом глубины разработки, радиуса кривизны свода образования выработки и напряжений, которые изменяют первоначальное поле при очистной выемке.

Ключевые слова: напряжение, угловая разрушительная точка, выработка, радиус кривизны свода, давление, очистной блок.

The article proposes a method for determination of the angular point of the destructive pressure on the mine working contour, taking into account the man-made forces, which makes it possible to determine the pressure and weak point on the mine working contour in a homogeneous and heterogeneous mountain massif. When solving the issue of the stability of mine workings in a multi-modular rock massif and determining the angular point of the destructive pressure on the mine working contour of a vaulted form, an analytical method of research is applied, taking into account the practice of the Kryvbas mines and establishing certain limitations when using it. This method differs from the known ones by determining the angle of the acting destructive pressure on the mine working contour taking into account the mine working depth, the vault curvature radius of the mine working generator and the stresses that change the initial field in the cleaning cavity. This method allows to calculate the pressure acting on the mine working contour, taking into account the previously used treatment unit in close proximity. The possibility of adjusting the parameters of the mine workings at the design stage of the block's excavation is determined directly when mining in homogeneous and heterogeneous rocks, taking into account the man-made forces and the shear angle of the rocks in which the mining working is done. The choice of the most expedient vault curvature radius of the mine working generator will increase the resistance of the rocks around the mine.

Keywords: tension, angular destructive point, mine working, vault curvature radius, pressure, cleaning block.

Вступ. Залізородне родовище Криворізького басейну представлено поодинокими та паралельно-зближеними рудними тілами природно-бідних і природно-багатих руд, які розробляються відкритим і підземним способами. За попередньою оцінкою, при існуючих обсягах виробництва гірничодобувні підприємства Криворізького залізородного басейну до 2070

рр. відпрацюють, близько 70% балансових запасів природно-бідних залізних руд (4,7 млрд. т) або досягнуть максимальної економічно-доцільної глибини ведення відкритих гірничих робіт [1-3]. В межах діючих гірничодобувних комплексів зосереджено понад 2,1 млрд. т запасів залізистих кварцитів, перспективних до комбінованої відкрито-підземної розробки (табл. 1) [4].

Таблиця 1 – Запаси природно-бідних руд залізистих кварцитів Криворізького родовища перспективних для розробки комбінованим відкрито-підземним способом

Гірничодобувний комплекс	Глибина гірничих робіт, м	Запаси в межах родовища, млн. т	
		балансові	забалансові
Ганнівський кар'єр	275	500	340
Першотравневий кар'єр	400	710	480
Інгулецький кар'єр	395-440	440	140
Південний кар'єр	325-350	1800	600
Глеєватський кар'єр	395	710	350
Петровський кар'єр	305		
Артемовський кар'єр	185		
Кар'єр №2-біс	225	2650	235
Кар'єр №3-біс	300		
		6810	2145

Відпрацювання забалансових запасів залізних руд в межах діючих гірничодобувних підприємств, комбінованим відкрито-підземним способом з річною продуктивністю 10 млн. т, дозволить подовжити їх плідну роботу ще на 20-30 років.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У розвиток теорії комбінованої відкрито-підземної розробки внесли значний вклад досліджен-

ня: В.О. Щелканова, Д.Р. Каплунова, В.С. Хохрякова, К.Н. Трубецкого, Б.М. Андреева, С.О. Сторчака, А.Д. Черних, М.І. Ступніка та інші вчені, які запропонували наступні варіанти комбінованої відкрито-підземної розробки: коли початок розробки здійснюється відкритим способом, а доопрацювання запасів – підземним, рис. 1, а; сумісної розробки родовища в часі та в просторі, рис. 1, б.

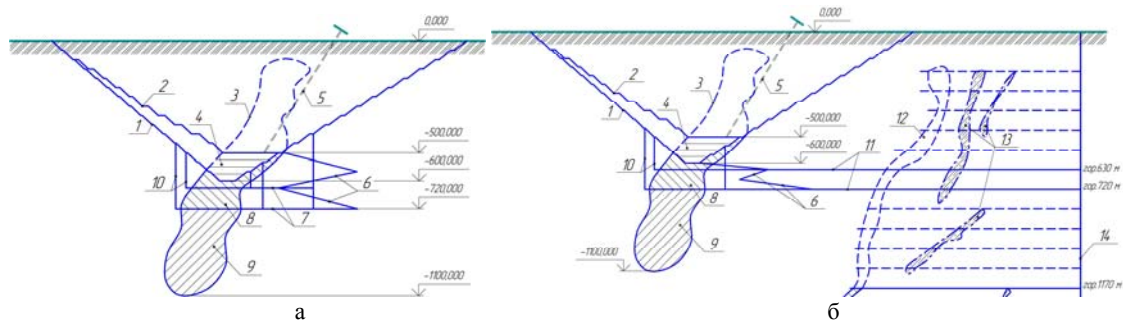


Рис. 1 – Схема розкриття забалансових запасів комбінованим відкрито-підземним способом: а – з транспортуванням руди на борт кар'єру; б – з транспортуванням руди до головного ствола; 1, 2 – контур кар'єру відповідно граничний та робочий; 3 – відпрацьовані запаси відкритим способом; 4, 8 – запаси, що відпрацьовуються відповідно відкритим та комбінованим способами; 5 – циклічно-поточкова технологія; 6 – похилий спіральний з'їзд; 7 – транспортні горизонти; 9 – поклад залізистих кварцитів; 10 – шурф; 11 – відкотний горизонт; 12 – запаси, що відпрацьовані підземним способом; 13 – поклад супутньої мінеральної сировини або бідних залізних руд.

Розкриття забалансових запасів відкрито-підземним способом з транспортуванням руди з очисного блоку на борт кар'єру здійснюється за допомогою похилих транспортних виробок, рис. 1а. Портал похилої транспортної виробки розташовують безпосередньо на дні кар'єру або на робочому горизонті біля комплексу циклічно-поточної технології. Транспортування гірничої маси з очисного блоку до колодязю крупного дроблення здійснюється підземними автосамоскидами по підземним гірничим виробкам 6, 7 [5].

Розкриття забалансових запасів комбінованим відкрито-підземним способом з транспортуванням руди з очисного блоку до головного ствола здійснюється горизонтальними транспортними виробками 11 або похилою виробкою, рис. 1б. Горизонтальна виробка 11 служить для транспортування гірничої маси до головного рудопідйомного ствола, а похила 6 – доставки до вибою матеріалів, обладнання бурової та прохідницької техніки [1, 4].

Для ефективного видобутку корисної копалини при даних схемах розкриття, необхідно створити єдину підземно-транспортну систему. Головною проблемою при створенні підземно-транспортної системи є забезпечення стійкості гірського масиву навколо підземної транспортної виробки на весь термін розробки родовища.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення небезпечної зони склепоутворення на контурі підземної транспортної виробки.

Задачею дослідження є обґрунтування активної зони склепоутворення на контурі підземної транспортної виробки при відпрацюванні забалансових запасів комбінованим відкрито-підземним способом.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Дослідити вплив початкового поля напружень різномодульного масиву на параметри склепоутворення на контурі підземної транспортної виробки.

2. Удосконалити методику по визначенню активної зони склепоутворення в різномодульному масиві навколо гірничої транспортної виробки.

Матеріали та методи дослідження початкового поля напружень різномодульного масиву на зону склепоутворення на контурі підземно-транспортної виробки. Подальший розвиток комбі-

нованої відкрито-підземної розробки залежить від достовірності наукового прогнозу гірничо-технічних умов, надійної оцінки неторкнутого масиву, а також прогнозування проявів гірського тиску. Застосування потужних самохідних бурових і вантажно-транспортних машин при видобутку залізних руди потребує забезпечувати надійність та стійкість гірничим виробкам з площею поперечного перерізу більше ніж 20 м² на весь термін їх існування [6].

Службою прогнозу гірських ударів ПАТ "Кривбасзалізрудком" було встановлено, що на глибинах понад 1000 м виробки прагнуть прийняти форму поперечного перетину близьку до еліптичної. Зі збільшенням глибини ведення гірничих робіт радіус закруглення для боків виробки збільшується, а для покрівлі виробки зменшується. Залежність радіусів заокруглення боків виробки та покрівлі для гірничої виробки висотою 3,75 м і шириною 5,15 м представлений на рис. 2.

За даними оптико-поляризаційного моделювання [7] встановлено, що контур виробки прагне придбати форму шатра. Виходячи з цього, локальне вивалоутворення можливо на тих ділянках, де зосереджена висока концентрація руйнівних напружень або породи навколо виробки є нестійкими, шаруватими або тріщинуватими.

Руйнівний тиск (вага порід) що діє на контур виробки визначається з виразу

$$P_{к.в} = \pm \frac{P \cdot \sin \delta}{l}, \quad (1)$$

де $P_{к.в}$ – руйнуючий тиск (вага) що діє на контур виробки, т/м²; P – тиск (вага) налягаючих порід, т/м³; l – довжина дуги контуру склепіння виробки, м,

Максимальні напруження в гірському масиві, які виникають на контурі виробки визначається

$$\left. \begin{matrix} \sigma_{\theta} \\ \sigma_r \end{matrix} \right\} = \sigma_z \cdot \left(1 \pm \frac{1}{r^2} \right), \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = 0,$$

де σ_r , σ_{θ} – нормальні та тангенційні напруження, т/м²; r – відстань від центру виробки до елементарного об'єму, м; τ_{xy} – дотичні напруження, т/м²;

Нормальні та дотичні напруження, що входять в

рівняння (2) описуються системою рівнянь

$$\begin{cases} \sigma_{\theta,r} = \sigma_n \cdot \cos \delta, \\ \tau_{r,\theta} = \sigma_n \cdot \sin \delta, \end{cases} \quad (3)$$

де σ_n – діюче значення ущільнюючого напруження, т/м²; δ – кут, під яким діє руйнівний тиск на контур виробки, град.

Підставивши у вираз (2) формули (1 та 3) та ви-

конавши відповідні перетворення, отримаємо остаточне рівняння руйнівного тиску на контурі виробки аркової форми в залежності від кута прикладеного навантаження до контуру виробки

$$P_{к.в} = \pm \frac{r \cdot \tau_0 \cdot \sin \delta}{\sin 2\delta - r^2 \cdot \cos \beta \cdot \text{tg} \rho} \quad (4)$$

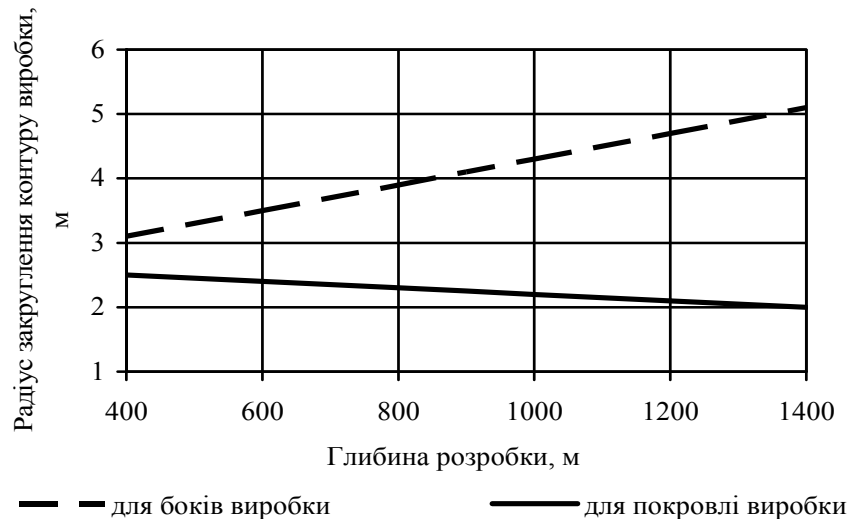


Рис. 2 – Залежності радіусу закруглення контуру гірничої виробки від глибини розробки при площі поперечного перетину 16 м²

Якщо руйнівний тиск масиву, визначений за формулою (4), більше нормальних напружень навколо виробки, то контур гірничої виробки буде зберігати свою стійкість, в іншому випадку контур виробки буде схильний до деформації під кутом δ .

Визначимо розмір породної ділянки що руйнується на контурі виробки від локального вивалоутворення (рис. 3).

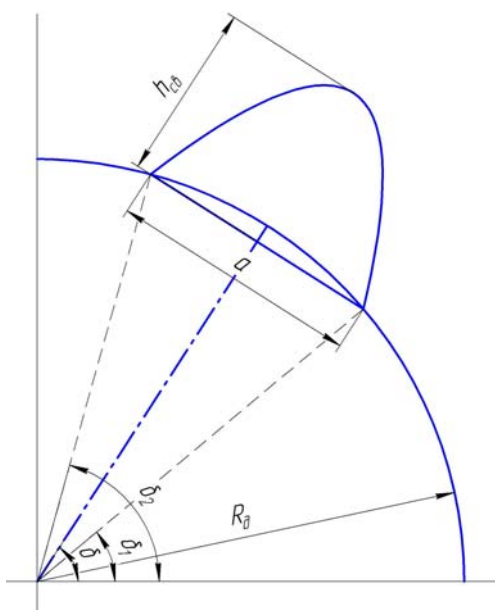


Рис. 3 – Схема до визначення параметрів утворення склепіння обвалення на контурі виробки в верхній її частині

Згідно з дослідженнями [7-10] руйнування порід над очисним простором відбувається по теоріям М.М.Протодьяконова або С.В.Ветрова – гіпотези склепінь [11]. Відповідно до гіпотези склепінь тиск визначається вагою налягаючих порід, ув'язнених у зводі нестійкої рівноваги або динамічно-розвантаженого куполу (зводу) [10-12], з якого частинки рухаються тільки під власною вагою.

При великій прохідності частинок і малому куті внутрішнього тертя витікання відбувається дуже плавно, а під дією вертикальних сил породи в зводі руйнуються. Швидкість випадання або заміщення частинок в динамічному зводі визначається висотою еліпсоїда тиску, а крива динамічного зводу описується рівнянням [12, 13]

$$y^2 = 2 \cdot p \cdot x, \quad (5)$$

де p – висота фігури розвантаження (динамічного) склепіння, м; x – поточна координата по осі x - x .

Згідно з дослідженнями [11], висота динамічного зводу склепіння визначається за виразом

$$h_{св} = p = \frac{a}{2 \cdot \text{tg} \rho} = \frac{a}{f}, \quad (6)$$

де $h_{св}$ – висота динамічного зводу, м; a – ширина (прольоту оголення) склепіння в нижній його частині, м; ρ – кут внутрішнього тертя, що відповідає даній висоті переміщення частинок, град.; f – коефіцієнт міцності порід за шкалою проф. М.М. Протодьяконова.

Таким чином, висота динамічного зводу нестійкої рівноваги визначають з виразу

$$h_{cb} = \frac{a}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \left(1 - \frac{r^2}{(0,5 \cdot a)^2} \right), \quad (7)$$

де r – радіус склепіння, м.

Відповідно до гіпотези Ветрова С.В. [11], висота динамічного зводу нестійкої рівноваги в загальному вигляді визначається виразом

$$h_{cb} = k_{hc} \cdot a, \quad (8)$$

де k_{hc} – коефіцієнт висоти склепіння.

Відповідно до проведених досліджень проф. В.А.Коржом [12] стосовно породам Криворізького басейну, коефіцієнт висоти склепіння визначається за формулою

$$k_{hc} = \exp(3 \cdot \pi / f - 2) + 0,2. \quad (9)$$

Як показують розрахунки [11], коефіцієнт висоти склепіння змінюється від 0,125 до 0,5 в залежності від міцності порід.

Дослідженнями проф. Борисова А.А. [14] встановлено, що стосовно до осадових шаруватих порід висота склепіння дорівнює; - проф. Галаєва Н.З. [11] з моделювання однорідних тріщинуватих вивержених порід. Так як динамічні склепіння розвантаження постійно руйнуються і утворюються знову висота таких склепінь згідно [11] визначається за формулами (6-8). Розрахунки висоти склепіння нестійкої динамічної рівноваги за виразами (6-8) відрізняються не більше ніж на 3-7%. Таким чином, для подальших розрахунків скористаємося формулою (7).

Згідно рис. 4 проліт вивалоутворення за контуром вироблення визначається за виразом

$$a = R_0 \cdot \sin \left(\frac{180 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot R_0} \right), \quad (10)$$

де R_0 – радіус дуги висота склепіння обвалення, м; l – довжина дуги, м.

Тоді площа вивалу визначається як різниця площ парабол по формулі, рис. 4

$$S = \frac{R_0}{6} \cdot \left(8 \cdot \left(1 - \frac{l}{2 \cdot R_0 \cdot f} \right) \cdot \sin \alpha - \frac{3 \cdot l}{R_0} - \sin 2\alpha \right). \quad (11)$$

У шаруватих породах причиною локального вивалоутворення є зниження міцності та коефіцієнту зчеплення порід між шарами. Значення міцності на контактах між шарами значно менше, тому руйнування в масиві буде відбуватися саме на контактах між породами. Границя вивалу по периметру зводу гірничої виробки обмеженими кутами θ_{xz1} и θ_{xz2} визначається за формулою

$$\begin{cases} \delta_{1,2} = 0,5 \left(\arcsin \left(\sin \rho + \frac{\tau_0}{P} \cos \rho \right) \pm \rho \right), \\ 2 \cdot \sin 2\delta \geq 0. \end{cases} \quad (12)$$

Навантаження від ваги породи на поверхні кріплення при утворенні склепіння обвалення залежить від розтягуючих напружень (рис. 4).

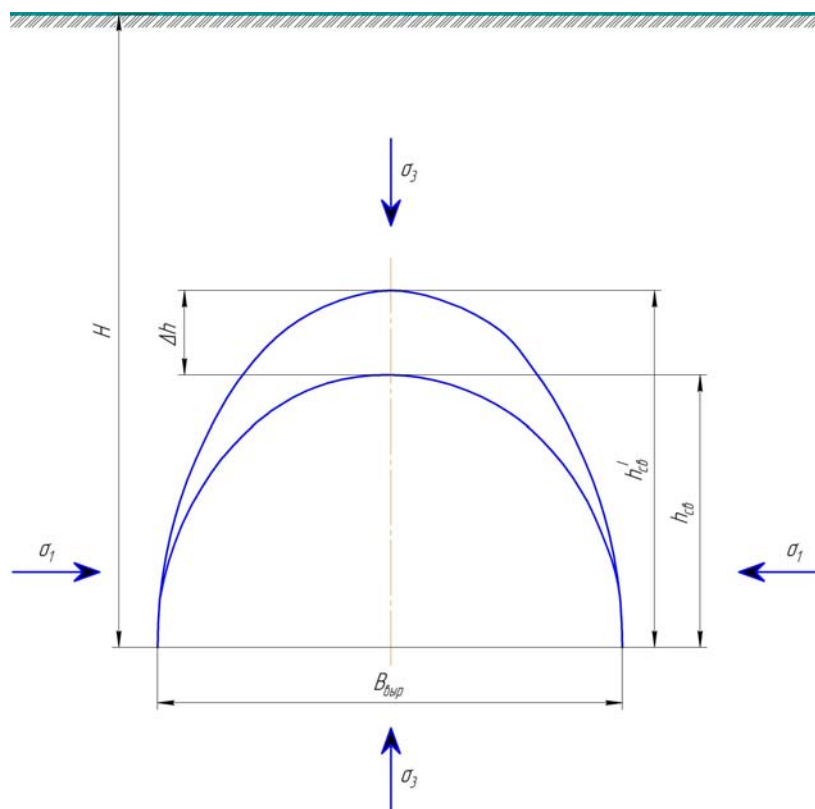


Рис. 4 – Схема до визначення навантаження на кріплення при розвитку сводообразованні від напруг, що розтягують

Висота утворення склепіння нестійкої рівноваги відповідає новому контуру виробки, на якому діють розтягуючі напруження, тому висота склепіння після деформації визначається з виразу

$$\Delta h = h'_{cb} - h_{cb}, \quad (13)$$

де h'_{cb} – висота нового контуру утворюючої склепіння стійкої рівноваги, м;

Після перетворення формули (13) отримаємо остаточний вираз для визначення приросту висоти склепіння нестійкої рівноваги при дії розтягуючих напружень в гірському масиві на контурі гірничої виробки

$$\Delta h = \frac{a \cdot (1 - \mu)}{\mu} \cdot \left(\frac{1 - 2 \cdot \mu}{1 - \mu} - \frac{\sigma_p}{\sigma_z} \right) - h_{cb}, \quad (14)$$

де Δh – деформація початкової висоти утворюючої склепіння стійкої рівноваги від розтягуючих напружень, м; μ – коефіцієнт Пуассона.

Результати дослідження початкового поля напружень різномодульного масиву на зону склепоутворення на контурі підземно-транспортної виробки.. Виконав розрахунки відповідно виразу (12), побудовані залежності розподілу руйнівного тиску на контурі виробки в залежності від кута її прикладення для однорідного та неоднорідного масиву, рис. 5, 6

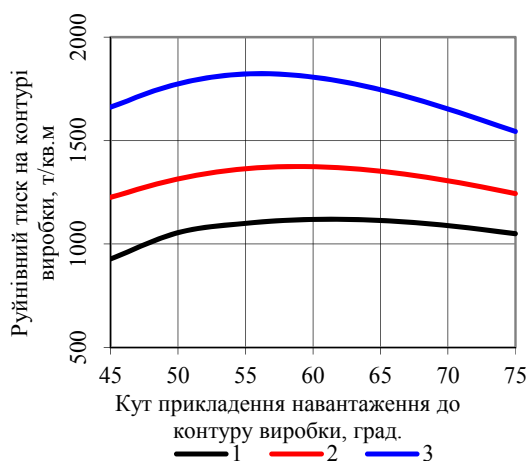


Рис. 5– Величина руйнівного тиску на контурі виробки за зоною впливу очисних робіт в залежності від кута прикладення навантаження до контуру виробки зсуву порід в однорідному масиві: 1–3 – відповідно кут зрушення порід 55,60 і 65 град

З графіків, наведеного на рис. 5, видно, що гранична рівновага на контурі виробки змінюється від 55 до 65 град. в залежності від кута зсуву порід. Так при куті зсуву порід 55 град. утримуюча сила на контурі виробки діє під кутом 65 град., а зі збільшенням кута зсуву до 65 град. кут максимально утримуючої сили зменшується до 55 град.

Згідно графіків, наведених на рис. 6, встановлено, що в неоднорідному масиві руйнівне навантаження на контурі виробки діє під кутом 55 град. а макси-

мально-допустимі руйнівні напруження зменшується з 1190 до 550 т/м².

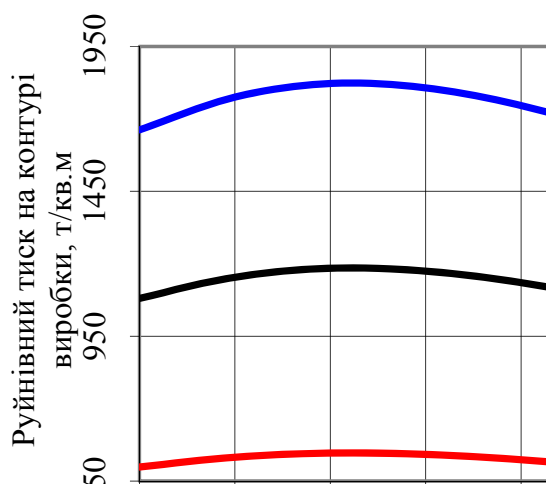


Рис. 6 – Величина руйнівного тиску на контурі виробки за зоною впливу очисних робіт в неоднорідному та однорідному гірських масивах, при куті зсуву порід 65 град.:

1, 2 – неоднорідний гірський масив відповідно для мікросхарового та окремих шарів порід і контактів; 3 – однорідний гірський масив

Таким чином, в однорідному масиві гірнична виробка руйнується при максимально-допустимому навантаженні в 1830 т/м², а в неоднорідному масиві руйнівний тиск на контурі виробки зменшується в 1,5-3,0 рази.

Для підтвердження надійності запропонованої методики за допомогою програмного комплексу ЛІРА 9.4 було визначено поле діючих напружень навколо гірничої виробки склепінчастої форми. При визначенні напружено-деформованого стану гірського масиву використовувався метод кінцевих елементів, який дозволяє вирішувати системи рівнянь з великою кількістю невідомих.

За допомогою даного комплексу вирішували питання напружено-деформованого стану: в лінійно-пружнотній середовищі; в рамках нелінійної теорії пружності і в пружно-пластичній постановці кроковим і кроків-ітераційним методами з автоматичним вибором кроку навантаження. Результати виконаних розрахунків еквівалентних і вертикальних напружень при висоті гірничої виробки 5 м в однорідному гірському масиві наведені на рис. 7, 8.

З наведених епюр еквівалентних і вертикальних напружень див. рис. 7, 8 видно, що найбільші напруження виникають на контурі гірничої виробки в склепінній її частині, а кут дії руйнуючого тиску дорівнює 60 град.

Таким чином, моделювання методом кінцевих елементів підтверджує достовірність методики з визначення активної зони склепоутворення на контурі підземно-транспортної виробки при комбінованій розробці залізородних родовищ.

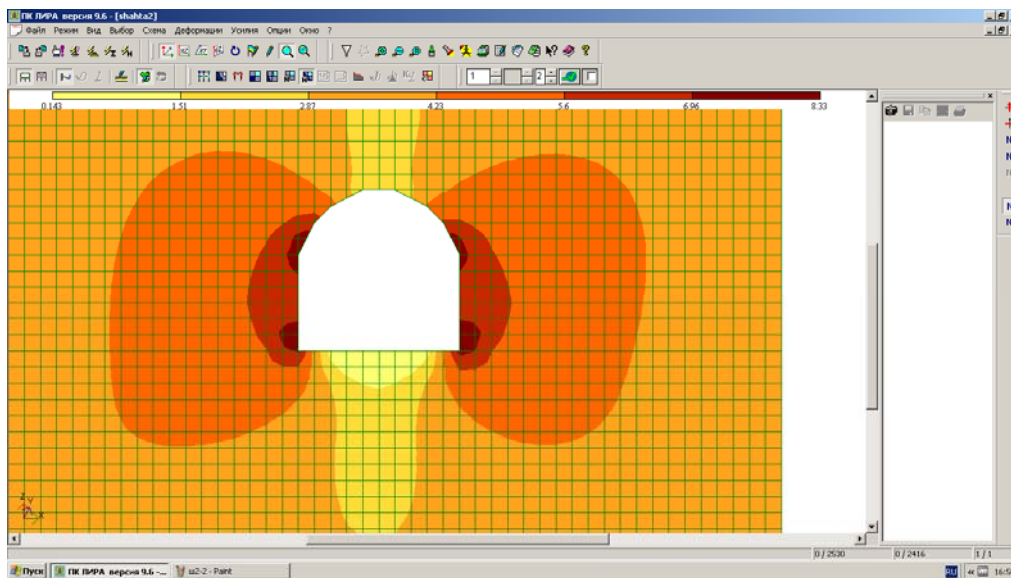


Рис. 7 – Епюри еквівалентних напружень діючих навколо гірничої виробки

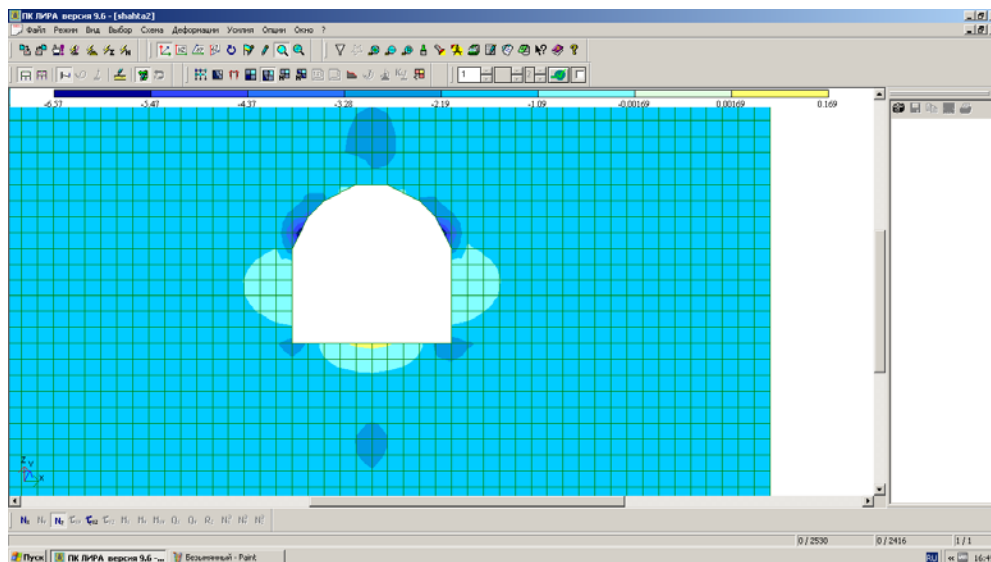


Рис. 8 – Епюри вертикальних напружень по теорії Мора, що діють навколо гірничої виробки

Обговорення результатів дослідження визначення активної зони склепоутворення на контурі підземно-транспортної виробки при комбінованій розробці залізрудних родовищ. Встановлено, що в межах діючих залізрудних підприємств Криворізького залізрудного басейну забалансових запасів природно-бідних руд налічується понад 2,0 млрд. т, які можливо відпрацювати відкрито-підземним або підземним способами. Відробку запасів комбінованим способом доцільно здійснювати з створенням єдиної підземно-транспортної системи із застосуванням імпортованого самохідного устаткування, що дозволить подовжити роботу гірничим підприємствам на 20-30 років.

Доведено, що стійкість гірничих виробок залежить від діючих напружень, які виникають в різномодульному гірському масиві на контурі виробки в склепінній її частині. Визначений кут під яким діють максимальні руйнівні напруження дозволяє визначити заходи, які дозволять підвищити стійкість гірничим виробкам, а також подовжити термін їх існування без додаткових експлуатаційних витрат.

Висновки

1. На контур горизонтальної підземно-транспортної виробки в однорідному та неоднорідному масиві діє руйнівне поле напружень навколо якого формується зона склепіння стійкої рівноваги. На контур виробки діє руйнівний тиск під кутом, який змінюється за поліноміальним законом в залежності від руйнівного тиску та кута зміщення порід, зі збільшенням кута внутрішнього тертя з 55 до 65 град., кут під яким діють максимальні напруження на контурі виробки зменшується з 65 до 55 град. в однорідних породах

2. В неоднорідному масиві діюче поле напружень змінюється зворотньопропорційно куту зсуву порід та відстані від очисного блоку і знаходиться в межах від 50 до 80 град.

Список літератури:

1. *Ступник, Н. И.* Перспективные технологические варианты дальнейшей отработки железорудных месторождений системами с массовым обрушением руды [Текст] / *Н. И. Ступник, С. В. Письменный* // Вестник Криворожского национального университета. – 2012. – № 30. – С. 3–6.
2. *Ступник, Н.* Pillars sizing at magnetite quartzites room-work

- [Text] / N. Stupnik, V. Kalinichenko, S. Pismennyi // Mining of Mineral Deposite. A Balkema Book. – 2013. – P. 11–15.
3. Stupnik N. I. Testing complex-structural magnetite quartzite deposits chamber system design theme [Text] / N. I. Stupnik, V. A. Kalinichenko, V. A. Kolosov, M. B. Fedko, S. V. Pismennyi // Metallurgical and mining industry. – No. 2. – 2014. – P. 89–93.
 4. Письменный, С. В. Исследования устойчивости целиков от формы очистной камеры при отработке магнетитовых кварцитов в полях действующих шахт подземным способом [Текст] / С. В. Письменный // Вестник Криворожского национального университета. – 2014. – № 36. – С. 9–13
 5. Ступнік, М. І. Комбіновані способи подальшої розробки залізородних родовищ Криворізького басейну [текст] / М. І. Ступнік, С. В. Письменний // Гірничий вісник. – 2012. – № 95 (1). – С. 3–7.
 6. Ступнік, Н. І. Исследование формы поперечного сечения подземных выработок при комбинированной отработке месторождений [Текст] / Н. І. Ступнік, Б. Н. Андреев, С. В. Письменний // Вестник Криворожского национального университета. – 2014. – № 32. – С. 3–6.
 7. Лавриненко, В. Ф. Уровень удароопасности пород на глубоких горизонтах шахт Кривбасса [Текст] / В. Ф. Лавриненко, В. І. Лысак // Разработка рудных месторождений. – 1991. – № 52. – С. 30–36.
 8. Влох, Н. П. Прогноз удароопасности выработок на стадии проектирования горных работ [Текст] / Н. П. Влох, А. В. Зубков, Я. І. Липин // Прогноз и предотвращение горных ударов на рудных месторождениях. – 1987. – С. 50–54.
 9. Влох, Н. П. Совершенствование конструкции днищ в условиях действия высоких горизонтальных сжимающих напряжений [Текст] / Н. П. Влох, А. В. Зубков, Ю. Ф. Пятков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1981. – № 4. – С. 78–82.
 10. Тимченко, А. В. Формирование нагрузки от локальных вывалов при сплошном сводообразовании [Текст] / А. В. Тимченко, В. Н. Пустобриков, Т. С. Цидаев // Вестник Владикавказского научного центра. – 2007. – Т. 7. – № 2. – С. 44–48.
 11. Галаев, Н. З. Управление состоянием массива горных пород при подземной разработке рудных месторождений [Текст] / Н. З. Галаев. – М.: Недра. 1990. – 176 с.
 12. Stupnik, N. Modeling of stopes in soft ores during ore mining [Text] / N. Stupnik, V. Kalinichenko, V. Kolosov, S. Pismennyi, A. Shepel // Metallurgical and mining industry. – 2014. – No. 3. – P. 32–36.
 13. Plevako, V. Analytical study of the bending of isotropic plates, inhomogeneous in thickness [Text] / V. Plevako, V. Potapov, V. Kycenko, I. Lebedynecj, I. Pedorych // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/74 (82). – P. 10–16. doi: [10.15587/1729-4061.2016.75052](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75052)
 14. Ступнік, Н. І. Разработка рекомендаций по выбору типа крепления горных выработок и сопряжений в условиях урановых шахт ГП "ВОСТГОК" [Текст] / Н. І. Ступнік, М. Б. Федько, В. А. Колосов, С. В. Письменний // Научный вестник НГУ. – 2014. – № 5. – С. 21–25.

Bibliography (transliterated):

1. Stupnik, N. I., Pis'mennyi, S. V. (2012). Perspektivnyye tekhnologicheskiye varyanty dal'neyshey obrabotki zhelezorudnykh mestorozhdeniy sistemami s massovym obrusheniym rudy. Visnyk Kryvoriz'koho natsional'noho universytetu, 30, 3–7.
2. Stupnik, N., Kalinichenko, V. Pismennyi, S. (2013) Pillars sizing at magnetite quartzites room-work. Mining of Mineral Deposite. A Balkema Book, 11–15.
3. Stupnik, N. I., Kalinichenko V. A., Kolosov, V. A., Fedko M. B. Pismennyi, S. V. (2014). Testing complex-structural magnetite quartzite deposits chamber system design theme. Metallurgical and mining industry, 2, 89–93.
4. Pismennyi, S. V. (2014). Issledovaniya ustoychivosti tselikov ot formy ochistnoy kamery pri otrabotke magnetitovykh kvartsitov v polyakh deystvuyushchikh shakht podzemnym sposobom. Visnyk Kryvoriz'koho natsional'noho universytetu, 36, 9–13.
5. Stupnik, M. I., Pys'mennyi, S. V. (2012). Kombinovani sposoby podal'shoyi rozrobky zalizorudnykh rodovyshch Kryvoriz'koho baseynu. Hirnychyy visnyk, 95 (1), 3–7.
6. Stupnik, N. I., Andreyev, B. N., Pys'mennyi, S. V. (2012). Issledovaniye formy poperechnogo secheniya podzemnykh vyrabotok pri kombinirovannoy otrabotke mestorozhdeniy. Visnyk Kryvoriz'koho natsional'noho universytetu, 32, 3–6.
7. Lavrinenko, V. F., Lysak, V. I. (1991). Uroven' udaroopasnosti porod na glubokikh gorizontakh shakht Krivbassa. Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy, 52, 30–36.
8. Vlokh, N. P., Zubkov, A. V., Lipin, Ya. I. (1987). Prognoz udaroopasnosti vyrabotok na stadii proyektirovaniya gornyykh rabot. Prognoz i predotvrashcheniye gornyykh udarov na rudnykh mestorozhdeniyakh Apatity, 50–54.
9. Vlokh, N. P., Zubkov, A. V., Pyatkov, Yu. F. (1981). Sovershenstvovaniye konstruktssii dnishch v usloviyakh deystviya vysokikh gorizontalnykh szhimayushchikh napryazheniy. Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopyayemykh, 4, 78–82.
10. Timchenko, A. V., Pustobrikov, V. N. Tsidayev, T. S. (2007). Formirovaniye nagruzki ot lokal'nykh vyvalov pri sploshnom svodoobrazovanii. Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra, 7 (2), 44–48.
11. Galayev, N. Z. (1979). Upravleniye sostoyaniyem massiva gornyykh porod pri podzemnoy razrabotke rudnykh mestorozhdeniy, Moscow: Nedra, 176.
12. Stupnik, N., Kalinichenko, V., Kolosov, V., Pismennyi, S., Shepel, A. (2014). Modeling of stopes in soft ores during ore mining, 3, 32–36.
13. Plevako, V., Potapov, V., Kycenko, V., Lebedynecj, I., Pedorych, I. (2016). Analytical study of the bending of isotropic plates, inhomogeneous in thickness. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (7 (82)), 10–16. doi: [10.15587/1729-4061.2016.75052](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75052)
14. Stupnik, N. I., Fed'ko, M. B., Kolosov, V. A., Pis'mennyi, S. V. (2014). Razrabotka rekomendatsiy po vyboru tipa krepleniya gornyykh vyrabotok i sopryazheniy v usloviy uranovykh shakht GP "VOSTGOK". Naukovyy visnyk NHU, 5, 21–25.

Надійшла (received) 20. 04. 2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методика визначення активної зони склепоутворення на контурі підземно-транспортної виробки при комбінованій розробці залізородних родовищ/ С. В. Письменний // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.99–106. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Методика определения активной зоны сводообразования на контуре подземно-транспортной выработки при комбинированной разработке железородных месторождений/ С. В. Письменний // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.99–106. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Method for determining the core of the arch of formation on the contour of underground transport excavation in the combined development of iron ore deposits/ S. Pismennyi //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 99–106. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-5459

Письменный Сергей Васильевич – доцент, кандидат технических наук, Государственный высший навчальний заклад "Криворізький національний університет", доцент кафедри "Підземної розробки родовищ корисних копалин"; адреса університету: вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна, 50027

Письменный Сергей Васильевич – доцент, кандидат технических наук, Государственное высшее учебное заведение "Криворожский национальный университет", доцент кафедры "Подземной разработки месторождений полезных ископаемых"; адрес университета: ул. Виталия Матусевича, 11, г. Кривой Рог, Украина, 50027

Pysmennyi Serhii – Associate Professor, candidate of technical sciences (PhD), State institution of higher education «Kryvyi Rih National University», Associate Professor "Underground mining of mineral deposits"; University address: 11, Vitaliy Matusevych str., Kryvyi Rih, Ukraine, 50027

УДК 621.74

О. А. ЧИБИЧИК, Р. Н. СТЕПАНЕНКО, А. Н. ГОРОЩЕНКО, Д. В. ГРИЦЕНКО, Л. А. САЛТЫКОВ, Д. Н. МАКАРЕНКО

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЛИТЬЯ ПОД НИЗКИМ ДАВЛЕНИЕМ Al-Mg СПЛАВА ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМУМА ЖИДКОТЕКУЧЕСТИ

Проведено математическое моделирование влияния соотношения Al/Mg и температуры на жидкотекучесть Al-Mg сплава. Показано, что такое влияние может быть описано уравнением регрессии в факторном пространстве 2^2 , которое получено на основе реализации центрального ортогонального композиционного плана (ОЦКП) второго порядка. Проанализирована возможность исследования полученной поверхности отклика для выявления оптимальных значений входных переменных, выступающих главными технологическими режимами литья под низким давлением

Ключевые слова: литье под низким давлением, Al-Mg сплав, жидкотекучесть, центральный ортогональный композиционный план второго порядка, уравнение регрессии, поверхность отклика

Проведено математичне моделювання впливу співвідношення Al/Mg та температури на рідкотікучість Al-Mg сплаву. Показано, що такий вплив може бути описано рівнянням регресії у факторному просторі 2^2 , яке побудовано на основі реалізації центрального ортогонального композиційного плану (ОЦКП) другого порядку. Проаналізовано можливість дослідження отриманої поверхні відгуку для виявлення оптимальних значень вхідних змінних, що виступають головними технологічними режимами лиття під низьким тиском.

Ключові слова: лиття під низьким тиском, Al-Mg сплав, рідкотікучість, центральный ортогональный композиційний план другого порядку, рівняння регресії, поверхня відгуку

An adequate regression equation describing the influence of the Al/Mg ratio and temperature on the Al-Mg alloy castability for low-pressure casting is obtained. It is shown that such effect can be described by the regression equation in the factor space 2^2 , which is obtained on the basis of the realization of the second order central orthogonal compositional design (COCD). The possibility of investigating the received response surface is analyzed to identify the optimal values of the input variables that act as the main technological regimes of low-pressure casting. In particular, it is shown that the study of the nature of the function $*(\lambda)$ in the four ranges of the input variable separated by the poles λ_1 and λ_2 makes it possible to find the values of the input variables that are suboptimal and provide the possibility of obtaining high castability indices by the appropriate selection of technological regimes - Al/Mg ratio and temperature of the Al-Mg alloy for low-pressure casting.

Keywords: low-pressure casting, Al-Mg alloy, castability, second order central orthogonal compositional design, regression equation, response surface

Введение. В последнее время в литейном производстве одним из самых перспективных способов является литье под низким давлением (ЛНД). Наиболее широко ЛНД применяется для изготовления отливок из алюминиевых сплавов. Отличительной способностью ЛНД от остальных видов литья является многоступенчатое регулирование давления газа над зеркалом расплава в тигле машины с сифонной подачей расплава в литейную форму по металлопроводу. Именно поэтому для изготовления отливок энергетического машиностроения, в частности заливки роторов тяговых электроприводов, выбрана именно эта технология. В частности, наилучшей является технология, при которой рабочее давление устанавливается на уровне, близком к минимально необходимому, а после заполнения формы и выдержки, достаточной для образования твердой поверхности отливки, давление поднимают с целью повышения эффективности питания. Особую актуальность при этом приобретают

вопросы, связанные с моделированием влияния технологических факторов на жидкотекучесть сплава.

Анализ литературных данных. ЛНД относится к специальным видам литья, преимущественно цветного литья, поэтому рассмотрение данной технологии, так же, как и для других спецвидов, происходит в основном с позиции управления качеством [1–3]. Авторы по-разному подходят к исследованию подобных технологий и формированию качества готовых отливок, например на этапе проектирования (САПР) [4, 5] или этапе эксплуатации с непосредственной экспериментальной обработкой технологического процесса [6–10]. Последнему подходу, включающему в себя также математическое моделирование на основе полученных промышленных экспериментальных данных технологии ЛНД, посвящены работы [11–13]. Несмотря на то, что все перечисленные исследования в основном ориентированы на решение конкретных практических задач и не содержат в себе системного

© О. А. Чибичик, Р. Н. Степаненко, А. Н. Горощенко, Д. В. Гриценко, Л. А. Салтыков, Д. Н. Макаренко. 2017

обобщения, их результаты позволяют сделать важный вывод. А именно: перспективным является математическое моделирование процессов в условиях литейных цехов и построение адекватных уравнений, описывающих данные процессы. Получение таких уравнений может дать возможность дальнейшего синтеза оптимального управления процессами ЛНД на основе типизации математического описания данного процесса [14].

Цель и задачи исследования. Целью исследования являлось изучение возможности аналитического описания технологических режимов литья под низким давлением для Al-Mg сплавов.

Для достижения цели ставились такие задачи:

– построение уравнения регрессии, описывающего влияние соотношения Al/Mg и температуры на жидкотекучесть Al-Mg сплава;

– анализ полученного уравнения на предмет выявления характера влияния технологических режимов на жидкотекучесть

Методы исследований и полученные результаты. В качестве входных переменных выбирались отношение содержания алюминия к содержанию магния Al/Mg, % (x_1) и температура, °C (x_2). В качестве выходных переменных – жидкотекучесть по прутковой пробе, мм (y).

Учитывая, что из данных экспериментального материала можно «снять» значения входных и выходных переменных в точках плана полного факторного эксперимента ($N=2^k$), в качестве метода построения модели был использован метод построения полного ортогонального центрального композиционного плана второго порядка [15, 16]. Нормирование значений входных переменных осуществлялось по формулам:

$$x_1 = \frac{x_1^* - \bar{x}_1}{I_1}, \quad (1)$$

$$x_2 = \frac{x_2^* - \bar{x}_2}{I_2}, \quad (2)$$

где x_1, x_2 – нормированные значения входных переменных, x_1^*, x_2^* – натуральные значения входных переменных, \bar{x}_1, \bar{x}_2 – средние значения входных переменных ($\bar{x}_1 = 20, \bar{x}_2 = 6$), I_1, I_2 – интервалы варьирования входных переменных ($I_1=10, I_2=1$).

Математическая модель представляется полиномом вида:

$$y_i = b_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 (x_1^2 - \beta) + a_4 (x_2^2 - \beta) + a_5 x_1 x_2, \quad (3)$$

где a_i – оцениваемые коэффициенты, β – параметр, рассчитываемый в зависимости от числа точек ядра композиционного плана 2^{n-p} , плеча «звёздных» точек α и числа точек плана по формуле:

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^N (x_i^j)^2}{N} = \frac{2^{n-p} + \alpha}{N}. \quad (4)$$

Коэффициенты a_i определены по формулам [15, 16]:

$$a_i = c_1 \sum_{j=1}^N x^j y^j, i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$a_i = c_2 \sum_{j=1}^N [(x_{i-n}^j)^2 - \beta] y^j, i = n+1, \dots, 2n \quad (6)$$

$$a_i = c_3 \sum_{j=1}^N x_\mu^j x_\lambda^j y^j, \lambda = 1, \dots, n, \mu \neq \lambda, i = 2n+1, \dots, k \quad (7)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y^j - \beta \sum_{i=1}^n a_{n+i} \quad (8)$$

В формулах (5)–(8) c_1, c_2, c_3 – коэффициенты для линейный, квадратичных и парных взаимодействий независимых переменных соответственно, n – число линейных членов модели, N – число экспериментов.

Для полинома второй степени вида (4) значения указанных параметров приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения параметров для расчета коэффициентов кинетической модели

N	β	c_1	c_2	c_3
9	0,6667	0,1667	0,5	0,25

Для оценки точности полученной модели вычислялись суммы квадратов отклонений экспериментальных значений выходных переменных от расчетных, полученных по модели (S_R), и оценки дисперсий (s_R^2):

$$S_R = (y_{\text{эксн}} - y_{\text{рассч}})^2, \quad (9)$$

$$s^2 = \frac{S_R}{\varphi}, \quad (10)$$

где $\varphi = N - (k+1)$ – число степеней свободы, N – число экспериментов ($N=16$), k – число входных переменных ($k=2$).

Оценка значимости коэффициентов модели проводилась на основе критерия:

$$|a_i| \geq t_{\text{кр}} s_i, \quad (11)$$

где $t_{\text{кр}}$ – критическое значение распределения Стьюдента для доверительной вероятностью 95 % и числа степеней свободы $\varphi=13$, s – среднее квадратическое отклонение, определяемое из формулы (10).

Полученная математическая модель, описывающее влияние соотношения Al/Mg и температуры на жидкотекучесть Al-Mg сплава, имеет вид:

$$y_i = 255 - 8,835x_1 + 94,352x_2 - 5,325(x_1^2 - 0,6667) - 16,825(x_2^2 - 0,6667) + 4,25x_1x_2. \quad (12)$$

На рис. 1 представлена поверхность отклика, описываемая уравнение (12).

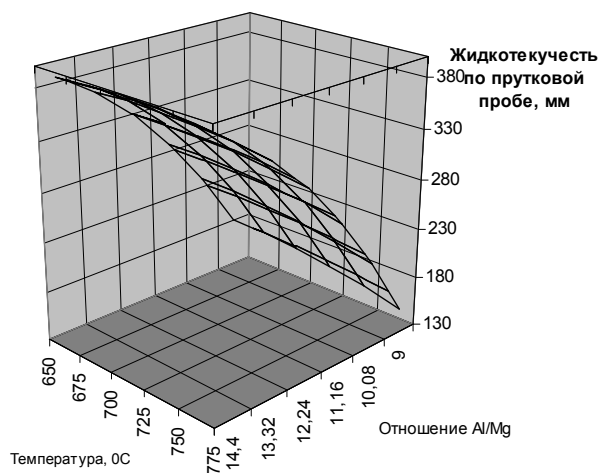


Рис. 1 – Поверхность отклика, описывающая влияние соотношения Al/Mg и температуры на жидкотекучесть Al-Mg сплава

Обсуждение результатов. Для нахождения оптимальных технологических режимов – соотношения Al/Mg и температуры – по критерию максимума жидкотекучести Al-Mg сплава можно воспользоваться методами гребневого анализа поверхности отклика, описанного в работе [17]. Решение оптимизационной задачи в параметрическом виде при этом выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} x^*(\lambda) = (\lambda I - A)^{-1} a, \\ r(\lambda) = \sqrt{x^* x^*}, \\ y^*(\lambda) = a_0 + 2a'x^* + x^* Ax^*, \end{cases} \quad (13)$$

где $a_0=155$, $a = \begin{pmatrix} -4,4175 \\ 47,176 \end{pmatrix}$, $A = \begin{pmatrix} -5,325 & 2,125 \\ 2,125 & -16,825 \end{pmatrix}$ – коэффициенты модели (1), λ – собственные числа матрицы A , $x^*(\lambda)$ – оптимальные значения входных переменных, $r(\lambda)$ – радиус цилиндра, вводимого для поиска граничных условий и определения положения оптимальной точки с координатами (x_1^*, x_2^*) на указанной границе факторного пространства, задаваемой вторым уравнением параметрического описания (13), $y^*(\lambda)$ – оптимальные значения выходной переменной (жидкотекучесть по прутковой пробе, мм).

Решение уравнения $|A - \lambda I| = 0$ дает два значения собственных чисел λ из диапазона $-\infty < \lambda < +\infty$, обеспечивающие оптимальные значения выходной переменной. Исследование характера функции $y^*(\lambda)$ в найденных четырех диапазонах входной переменной, разделенной полюсами λ_1 и λ_2 дает возможность найти оптимальные значения выходной переменной и обеспечивающие ее значения входных переменных на границе исследованной области планирования. Именно эти значения входных переменных и являются субоптимальными, обеспечивающими возможность получения высоких показателей жидкотекучести соответствующим подбором технологических режимов – соотношения Al/Mg и температуры Al-Mg сплава для ЛНД

Выводы. Получено адекватное уравнение регрессии, описывающего влияние соотношения Al/Mg и температуры на жидкотекучесть Al-Mg сплава для литья под низким давлением. Показано, что такое влияние может быть описано уравнением регрессии в факторном пространстве 2^2 , которое получено на основе реализации центрального ортогонального композиционного плана (ОЦКП) второго порядка. Проанализирована возможность исследования полученной поверхности отклика для выявления оптимальных значений входных переменных, выступающих главными технологическими режимами литья под низким давлением. В частности, для этого могут быть использованы методы гребневого анализа.

Список литературы:

1. Хорошилов, О. Н. Повышение качества непрерывнолитых заготовок из медных сплавов [Текст] / О. Н. Хорошилов, О. И. Пономаренко, А. В. Кипенский, В. В. Наний // *Металлургия машиностроения*. – 2012. – № 12. – С. 29–31.
2. Бреславский, Д. В. Управление качеством непрерывно литых заготовок [Текст] / Д. В. Бреславский, О. Н. Хорошилов, О. И. Пономаренко // *Вестник ДДМА*. – 2010. – № 3 (20). – С. 41–46.
3. Дёмин, Д. А. Управление качеством в литейном производстве: технологические аспекты в выборе оптимальных стратегий технического перевооружения [Текст] / Д. А. Дёмин // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – 2014. – № 7 (1050). – С. 42–52.
4. Лысенко, Т. В. Адаптивное автоматизированное синхронизирующее проектирование системы "отливка-песчаная форма" [Текст] / Т. В. Лысенко, А. Л. Становский // *Теория и практика процессов измельчения, разделения, смешивания и уплотнения*. – 2008. – С. 82–88.
5. Лысенко, Т. В. Методы самосинхронизации динамических процессов САПР литейного производства [Текст] / Т. В. Лысенко, Г. В. Кострова, А. А. Бондарь // *Труды Одесского политехнического университета*. – 2009. – № 2 (32). – С. 7–10.
6. Доценко, Ю. В. Влияние комплексной технологии на свойства отливок из сплава АК7ч с повышенным содержанием железа [Текст] / Ю. В. Доценко, В. Ю. Селиверстов // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2011. – № 6/5 (54). – С. 45–48. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2282>
7. Доценко, Ю. В. Особенности затвердевания отливок из алюминиевых сплавов при нарастающем давлении и модифицировании [Текст] / Ю. В. Доценко, В. Ю. Селиверстов // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – № 1/5 (55). – С. 18–22. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3378>.
8. Доценко, Ю. В. Затвердевание отливок из сплава АК5М при комплексном воздействии на расплав [Текст] / Ю. В. Доценко, В. Ю. Селиверстов // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. – 2012. – № 1 – С. 3–8.
9. Доценко, Ю. В. Особенности оценки эффективности получения отливок способом литья под высоким давлением [Текст]: зб. наук. пр. / Ю. В. Доценко, В. Ю. Селиверстов, В. В. Мацийчук, С. В. Малых // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2012. – № 9. – С. 21–29.
10. Доценко, Ю. В. Анализ эффективности комплексных технологических решений по повышению качества литейных алюминиевых сплавов с повышенным содержанием железа [Текст] / Ю. В. Доценко, В. Ю. Селиверстов, К. В. Шейдаев // *XIII International scientific conference. New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering. A collective monograph edited by Henryk Duja, Anna Kawalek*, 2012. – P. 211–216.
11. Родионов, Е. М. Технология литья под низким давлением [Текст] / Е. М. Родионов. – М.: НИИмаш, 1984. – 56 с.
12. Чибичик, О. А. Анализ технологического процесса заливки роторов электродвигателя и возможные пути его совершенствования [Текст] / О. А. Чибичик // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2007. – № 6/1 (30). – С. 55–60.

13. Акимов, О. В. [Совершенствование технологических процессов изготовления литых деталей роторов для повышения эксплуатационных характеристик тягового электропривода](#) [Текст] / О. В. Акимов, О. А. Чибичик, А. В. Редькина // Проблемы машиностроения. – 2013. – Т. 16, № 5. – С. 7–12.
14. Демин, Д. А. Типизация математического описания в задачах синтеза оптимального регулятора технологических параметров литейного производства [Текст] / Д. А. Демин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 1/4 (67). – С. 43–56. Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/21203/19147>
15. Демин, Д. А. Методология формирования функционала для задачи оптимального управления электроплавкой [Текст] / Д. А. Демин // Технологический аудит и резервы производства. – 2011. – № 1. – С. 15–24. doi: [10.15587/2312-8372.2011.4082](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2011.4082)
16. Mohanad, M. K. Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding [Text] / M. K. Mohanad, V. Kostyk, D. Demin, K. Kostyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 2/5 (80). – P. 45–49. doi: [10.15587/1729-4061.2016.65454](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65454)
17. Демин, Д. А. Адаптивное моделирование в задаче поиска оптимального управления термовременной обработкой чугуна [Текст] / Д. А. Демин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 6/4 (66). – С. 31–37. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/19453/17110>
1. Horoshilov, O. N., Ponomarenko, O. I., Kipenskiy, A. V., Naniy, V. V. (2012). Povyshenie kachestva nepreryvnolityh zagotovok iz mednyh splavov. Metallurgiya mashinostroeniya, 12, 29–31.
2. Breslavskiy, D. V., Horoshilov, O. N., Ponomarenko, O. I. (2010). Upravlenie kachestvom nepreryvno lityh zagotovok. Vestnik DDMA, 3 (20), 41–46.
3. Demin, D. A. (2014). Upravlenie kachestvom v litynom proizvodstve: tehnologicheskie aspekty v vybere optimal'nyh strategiy tehnikeskogo perevoorzheniya. Vestnik NTU «HP», 7 (1050), 42–52.
4. Lysenko, T. V., Stanovskiy, A. L. (2008). Adaptivnoe avtomatizirovanoe sinhroniziruyushhee proektirovanie sistemy "otlivkapeschanaya forma". Teoriya i praktika processov izmel'cheniya, razdeleniya, smeshivaniya i uplotneniya, 82–88
5. Lysenko, T. V., Kostrova, G. V., Bondar, A. A. (2009). Metody samosinhronizatsii dinamicheskikh processov SAPR litynogo proizvodstva. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta, 2 (32), 7–10.
6. Docenko, Ju. V., Seliverstov, V. Ju. (2011). Vliyanie kompleksnoj tehnologii na svoystva otlivok iz splava AK7ch s povyshennym sodержaniem zheleza. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (5 (54)), 45–48. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2282>
7. Docenko, Ju. V., Seliverstov, V. Ju. (2012). Osobennosti zatverdevaniya otlivok iz aljuminievyh splavov pri narastajushhem davlenii i modifitsirovanii. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1, 5 (55), 18–22. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3378>
8. Docenko, Ju. V., Seliverstov, V. Ju., Macijchuk, V. V., Malyh, S. V. (2012). Osobennosti ocenki jeffektivnosti poluchenija otlivok sposobom lit'ja pod vysokim davleniem. Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universiteta «HP». Tematicnij vipusk: Novi rishennja v suchasniyh tehnologijah, 9, 21–29.
9. Docenko, Ju. V., Seliverstov, V. Ju., Shejdaev, K. V. (2012). Analiz jeffektivnosti kompleksnyh tehnologicheskikh reshenij po povysheniju kachestva litynyh aljuminievyh splavov s povyshennym sodержaniem zheleza. XIII International scientific conference. New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering. A collective monograph edited by Henryk Dyja, Anna Kawalek, 211–216.
10. Rodionov, E. M. (1984). Tehnologija lit'ja pod nizkim davleniem. Moscow: NIlmash, 56.
11. Chibichik, O. A. (2007). Analiz tehnologicheskogo processa zalivki rotorov jelektrodvigatelja i vozmozhnye puti ego usovershenstvovaniya. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (1 (30)) 55–60.
12. Akimov, O. V., Chibichik, O. A., Red'kina, A. V. (2013). Sovershenstvovanie tehnologicheskikh processov izgotovleniya lityh detalей rotorov dlja povysheniya jekspluatatsionnyh harakteristik tjagovogo jelektroprivoda. Problemy mashinostroeniya, 16 (5) 7–12.
13. Demin, D. A. (2014). Tipizacija matematicheskogo opisaniya v zadachah sinteza optimal'nogo reguljatora tehnologicheskikh parametrov litynogo proizvodstva. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (4 (67)), 43–56. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/21203/19147>
14. Demin, D. A. (2011). Methodology of forming functional in the optimal control electric smelting. Technology Audit and Production Reserves, 1 (1 (1)), 15–24. doi: [10.15587/2312-8372.2011.4082](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2011.4082)
15. Mohanad, M. K., Kostyk, V., Domin, D., Kostyk, K. (2016). Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (5 (80)), 45–49. doi: [10.15587/1729-4061.2016.65454](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65454)
16. Demin, D. A. (2013). Adaptivnoe modelirovanie v zadache poiska optimal'nogo upravleniya termovremennoj obrabotkoj chuguna. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (4 (66)), 31–37. – Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/19453/17110>

Поступила (received) 06.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оптимизация технологических режимов литья под низким давлением al-mg сплава по критерию максимума жидкотекучести/ О. А. Чибичик, Р. Н. Степаненко, А. Н. Горощенко, Д. В. Гриценко, Л. А. Салтыков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – No 16(1238). – С. 106–109. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-5459.

Оптимізація технологічних режимів литья під низьким тиском al-mg сплаву за критерієм рідкотікучості/ О. А. Чибічик, Р. М. Степаненко, О. М. Горощенко, Д. В. Гриценко, Л. О. Салтыков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – No 16(1238). – С.106–109. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-5459.

Optimization of technological modes of low-pressure casting of the al-mg alloy on the castability maximum criterion/ O. Hchibichik, R. Stepanenko, O. Horoshchenko, D. Hrytsenko, L. Saltykov // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P. 106–109. – Bibliogr.: 16. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чибічик Ольга Анатоліївна – асистент кафедри ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна; e-mail: litv011@kpi.kharkov.ua

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

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

Гриценко Дмитро Вікторович – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

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

Макаренко Дмитро Миколайович – старший викладач, Кафедра хімії, екології та експертних технологій, Національний Аерокосмічний Університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», вул. Чкалова, 17, м. Харків, Україна, 61070; e-mail: d.makarenko@khai.edu

Чибичик Ольга Анатольевна – асистент кафедри литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua

Степаненко Руслан Николаевич – магістр, Кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, г. Харьков, Украина, 61002.

Горощенко Олександр Николаевич – магістр, Кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, г. Харьков, Украина, 61002.

Гриценко Дмитрій Вікторович – магістр, Кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, г. Харьков, Украина, 61002.

Салтыков Леонид Александрович – магістр, Кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, г. Харьков, Украина, 61002.

Макаренко Дмитрій Николаевич – старший преподаватель, Кафедра химии, экологии и экспертизных технологий, Национальный Аэрокосмический Университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», ул. Чкалова, 17, Украина, 61070; e-mail: d.makarenko@khai.edu

Чибичик Ольга – Assistant department of Foundry, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпичова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002; Contacttel.: (057) 707-68-54; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua

Stepanenko Ruslan – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпичова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Horoshchenko Olexsandr – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпичова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Hrytsenko Dmytro – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпичова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

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

Makarenko Dmytro – Senior lecturer, Department of Chemistry, ecology and expertise technologies, National Aerospace University «Kharkiv Aviation institute», Chkalova str., 17, Kharkiv, Ukraine, 61070.

УДК 533.24.083

Л. П. ШУМСЬКА

ПОРИСТА ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЯ НА ОСНОВІ ГЛИНОЗЕМУ

Запропоновано детальний опис способу отримання пористого теплоізоляційного матеріалу на основі глинозему методом низькотемпературної поризації легкоплавкої сировини при мінімальних енергетичних затратах. У роботі досліджені основні теплофізичні процеси, що протікають в сировинній суміші при її нагріванні і спучуванні, завдяки чому можна прогнозувати основні структурні показники готового теплоізоляційного матеріалу, а також передбачити його теплофізичні властивості. Новий пористий теплоізоляційний матеріал можна використовувати для теплового захисту поверхонь у широкому діапазоні температур і вологості.

Ключові слова: теплоізоляційні пористі вироби, термічне спучування, вологовміст, тепломасообмін, теплопровідність, енерговитрати.

Предложено подробное описание способа получения пористого теплоизоляционного материала на основе глинозема методом низкотемпературной поризации легкоплавкого сырья при минимальных энергетических затратах. В работе исследованы основные теплофизические процессы, протекающие в сырьевой смеси при ее нагревании и вспучивании, благодаря чему можно прогнозировать основные структурные показатели готового теплоизоляционного материала, а также предусмотреть его теплофизические свойства. Новый пористый теплоизоляционный материал можно использовать для тепловой защиты поверхностей в широком диапазоне температур и влажности.

Ключевые слова: теплоизоляционные пористые изделия, термическое вспучивание, тепломассообмен, влагосодержание, теплопроводность, энергозатраты.

Insulation porous products based on silicates and silica belong to the most effective materials for protective elements of various purposes. Low density, fire resistance, low thermal conductivity, however, sufficiently high strength structural allow to consider the pore ceramic materials one of the most promising materials for construction.

The article describes a detailed method for the production of a porous insulating material based on alumina by the method of low-temperature porosity of low-melting light-weight raw materials at minimum energy intensity. With the help of differential thermal analysis, the modes of heat treatment have been studied; the rational parameters of thermal bloating have been defined that allows implementing the process with minimal energy consumption with predicted thermal properties of obtained materials.

The result of the study is the establishment of the temperature boundaries of the physicochemical processes in the raw mixtures during heating and the relationship between the composition of the mixture, the heating temperature, and the structure of the material. New porous insulating material can be used for thermal protection of surfaces in a wide range of temperatures and humidity.

Keywords: porous insulation materials, thermal bloating, water content, thermal conductivity, heat-and-mass transfer, moisture content, energy intensity

© Л. П. Шумська. 2017

Вступ. Теплоізоляційні пористі вироби належать до найбільш ефективних матеріалів для захисних елементів різного призначення. Низька густина, вогнестійкість, мала теплопровідність, разом з тим достатньо висока конструктивна міцність дозволяють вважати пористокерамічний матеріал одним із найбільш перспективних матеріалів для будівництва. Тому проблема створення нових пористих теплоізоляційних матеріалів і технологій їх виробництва є надзвичайно актуальною.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Питання отримання пористих матеріалів з прогнозованими теплофізичними характеристиками аналізується у наукових працях вітчизняних дослідників [1]. Так, у роботах [2-4] розглядаються проблеми встановлення раціональних термодинамічних умов гідротермічного спучування гідросилікатів, що дозволяють знизити енерговитрати у виробництві теплоізоляційних пористих матеріалів.

Існує три групи технологій [5-7], що охоплюють усі відомі способи отримання пористої структури. У першій групі технологій пориста структура створюється за допомогою штучних чи природних пороутворюючих матеріалів та легкоплавких глин способом об'ємного чи контактного омонолічування – керамопор; у другій – поризацією шлікерної маси різними способами піноутворення, сухої мінералізації піни, аерування, низькотемпературного газоутворення – пектокераміка; у третій – високотемпературною поризацією легкоплавкої сировини.

Ціль та задачі дослідження. Метою даної роботи є розгляд третього способу структуроутворення,

що відбувається при гідrataції сировинної композиції. На відміну від існуючих робіт [8-10] у наших дослідженнях пропонується за рахунок підбору раціонального співвідношення кількості компонентів сировинної суміші та режимів спучування встановити таке їх співвідношення, при якому можна отримати пористий матеріал із заданими теплофізичними властивостями при мінімальних витратах енергії. Планується виконати такі дослідження за допомогою диференційно-термічного аналізу.

Практичні дослідження

Для виконання практичних досліджень до сировинної маси додавали шамотну глину або чисту будівельну глину, склад яких наведений у табл. 1.

Завданням дослідження є визначення оптимального співвідношення мас добавок за показниками енерговитрат на реалізацію процесу термічного спучування, міцності отриманого матеріалу, пористості й теплопровідності. Очевидно, що теплопровідність та енерговитрати повинні бути мінімальними.

Дослідження виконувались із застосуванням диференційно-термічного аналізу (ДТА) процесу термічного спучування сировинної суміші.

Випробування проводять при постійному підйомі температур, записуючи різницю температур на діаграмному папері як функцію температури. У результаті отримують криву ДТА (рис. 1-4). При обробці результатів експерименту горизонтальну вісь градуують за температурою. За положенням піка ендотермічного процесу можна знайти температурний інтервал фазових переходів.

Таблиця 1 – Хімічний склад вогнетривких глин

№	Глина	Вміст оксидів, %									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	ППП
1	Будівельна глина	44,59-54,14	27,13-35,85	1,48-2,47	1,14-1,97	0,38-0,81	0,23-0,42	0,21-0,60	0,25-0,45	1,34-3,62	11,48-13,86
2	Шамотна глина	46,80	36,80	1,58	--	0,20	0,76	0,34	0,18	--	13,6

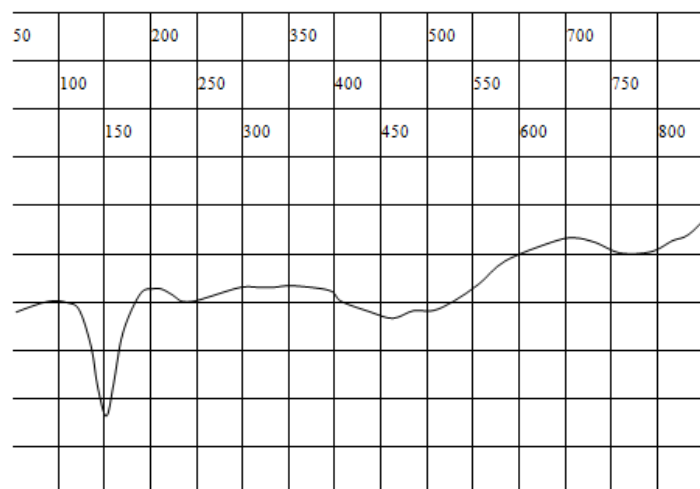


Рис. 1 – ДТА сировинної суміші з вмістом 75 мас. частин глини № 1 (табл. 1)

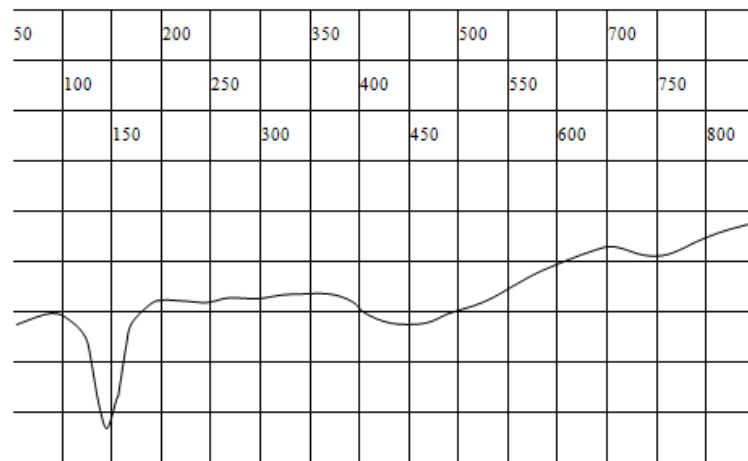


Рис. 2 – ДТА сировинної суміші з вмістом 75 мас. частин глини № 2 (табл. 1)

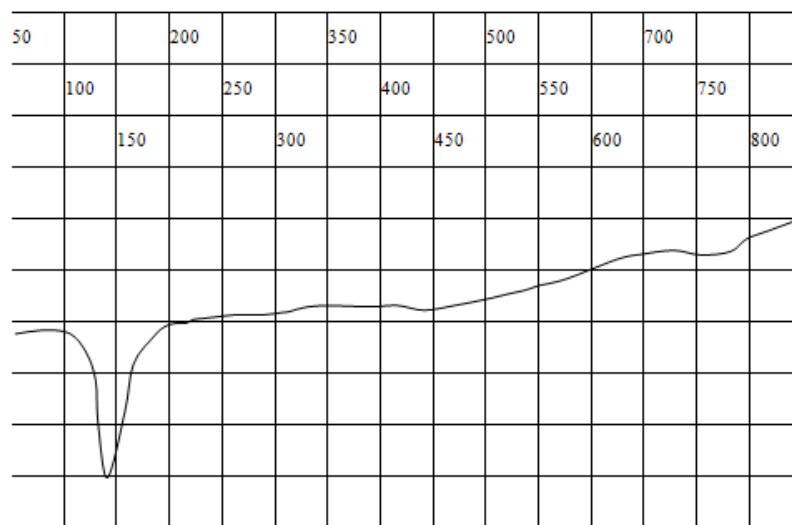


Рис. 3 – ДТА сировинної суміші з вмістом 160 мас. частин глини № 1 (табл. 1)

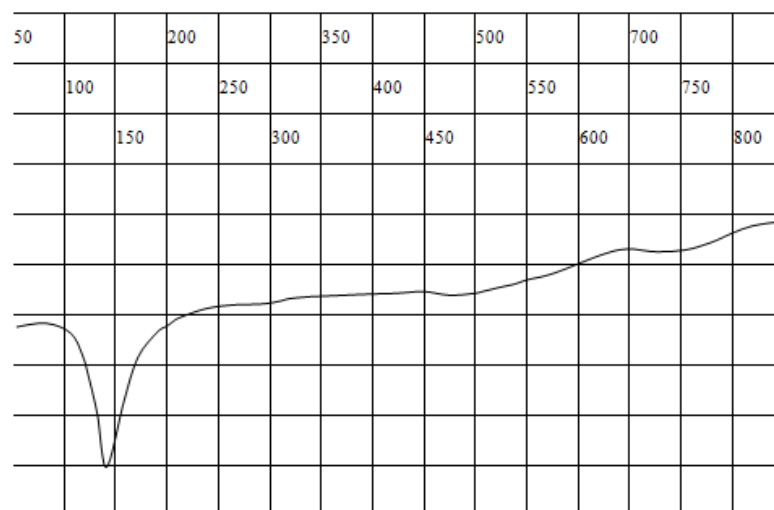


Рис. 4 – ДТА сировинної суміші з вмістом 160 мас. частин глини № 2 (табл. 1)

Для зразків глин № 1 і № 2 на діаграмах немає суттєвої різниці у термічних показниках фазових перетворень. Але при збільшенні вмісту глинозему екзотерма видалення води має більший мінімум, що є наслідком більшого водонасичення сировинної суміші.

На кривих ДТА реєструється низькотемпературний ендотермічний пік 146°C, обумовлений видаленням сорбованої води; присутність останньої пов'язана з високою питомою поверхнею часток, яка знаходиться у прямій залежності від розупорядкованості суміші.

Зміни, які відбуваються при нагріванні, показали три ендотермічні ефекти: 146, 500 і 720 (середні температури інтервалів на рис. 1–4). Великий ендотермічний ефект унаслідок видалення поглиненої води відзначається при 146 °С, а сходинка на кривій, що спостерігається при 300 °С, свідчить про видалення конституційної води (зв'язаної у вигляді ОН). Ендотермічний ефект при 720 °С пояснює видалення іонів ОН. Як свідчать дані діаграми, оптимальний температурний інтервал дегідратації суміші в межах 146–720 °С. Залишається встановити зв'язок інтервалів температур зі структурою спученого матеріалу, а, відповідно, і зі споживчими властивостями (міцність, теплопровідність, термостійкість, водопоглинання). Для цього, змінюючи склад вихідної суміші, повторюють вимірювання за наведеною вище методикою.

На отриманих кривих ДТА для всіх експериментальних зразків у досліджуваному інтервалі температур спостерігається ряд явищ, пов'язаних з тепловими ефектами:

1) до 100 °С — випаровування хімічно незв'язаної води;

2) 100...170 °С — різка втрата у масі і яскраво виражений ендотермічний ефект, котрий пов'язаний з частковою дегідратацією гелю і фаз різноманітного складу;

3) 450...550 °С — ендотермічний ефект, котрий відповідає розкладанню портландіта з виділенням парів води;

4) 700...900 °С — незначна втрата у масі і слабкий ендотермічний ефект, котрий пов'язаний із розкладанням карбонатних матеріалів (кальциту, доломіту), а також з останньою стадією дегідратації гелю і гідралюмініатів.

Дослідження порової структури. Морфологія і пористість зразків визначались оптичними методами. За даною методикою визначаються макроскопічні параметри пористості всередині метричного інтервалу з нижньою межею 10 мкм і верхньою 5 мм. Зазначений інтервал характеризує міцнісні параметри речовини і параметри тепло- і масоперенесення.

Для аналізу структури виготовляли шліф спученого матеріалу й проводили попередній аналіз на установці, що складається з проекційної оптичної системи, телевізійної камери, комп'ютера з інтерфейсом сполучення. При 10-кратному збільшенні реєстрували загальний вигляд шліфа у видимому світлі в сірих тонах з 256-ма градаціями сірого. Візуалізація пор відбувалась за допомогою методів тінювого контрастування, котрий заснований на застосуванні системи освітлення поверхні зразка, що складається з освітлювачів, спрямованих під малими кутами до поверхні. При використанні методу люмінесцентного контрастування на поверхню шліфа було нанесено шар люмінофора. Крупність люмінофора попередньо нормується методом водної седиментації з виділенням часток люмінофора субмікронного розміру. Надлишок люмінофора видаляється з поверхні обдуванням, після чого на поверхню накладається спеціалізована плівка для видалення частинок люмінофора, що залишилися. Поверхня зразка контролювалась на бінокулярному мікроскопі. У площині гранул та міжгранульних площинах реєструвались пори з мінімальним розмі-

ром 150 мкм. Формується маркерний план об'єкта, що визначається контурами частинок обпалених гранул. Отриманий кадр аналізується з визначенням розмірів (рис. 5–10).

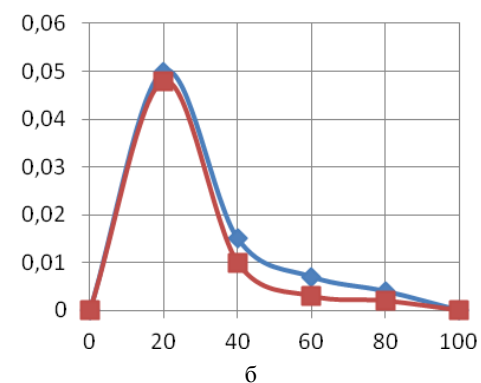
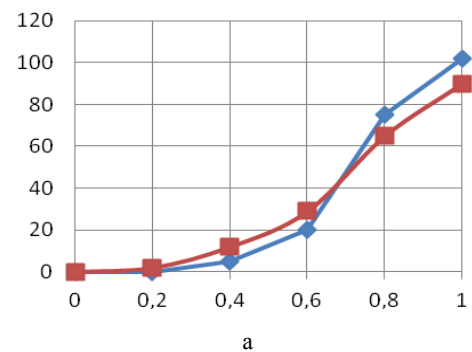


Рис. 5 – Параметри загальної пористості зразків №1 і №2 (75 мас. часток), спучених при температурі 160 °С (перший ендотермічний мінімум): а – Інтервал фактора форми; б – Розподіл пор за розмірами

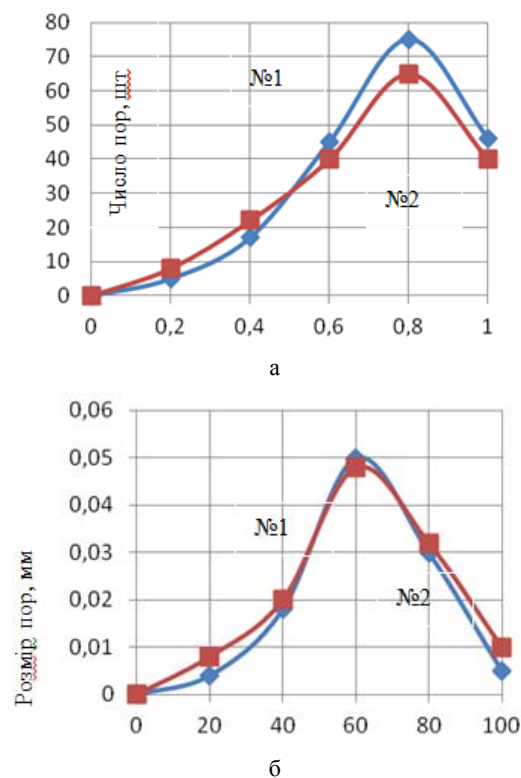


Рис. 6 – Параметри загальної пористості зразків №1 і №2 (75 мас. часток), спучених при температурі 300 °С (другий ендотермічний мінімум): а – Інтервал фактора форми; б – Розподіл пор за розмірами

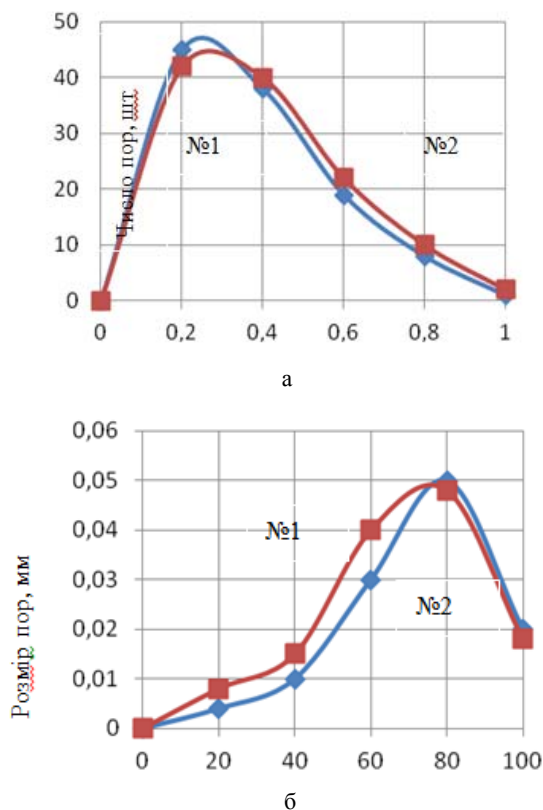


Рис. 7 – Параметри загальної пористості зразків №1 і №2 (75 мас. часток), спучених при температурі 700 °С (третій ендотермічний мінімум): а – Інтервал фактора форми; б – Розподіл пор за розмірами

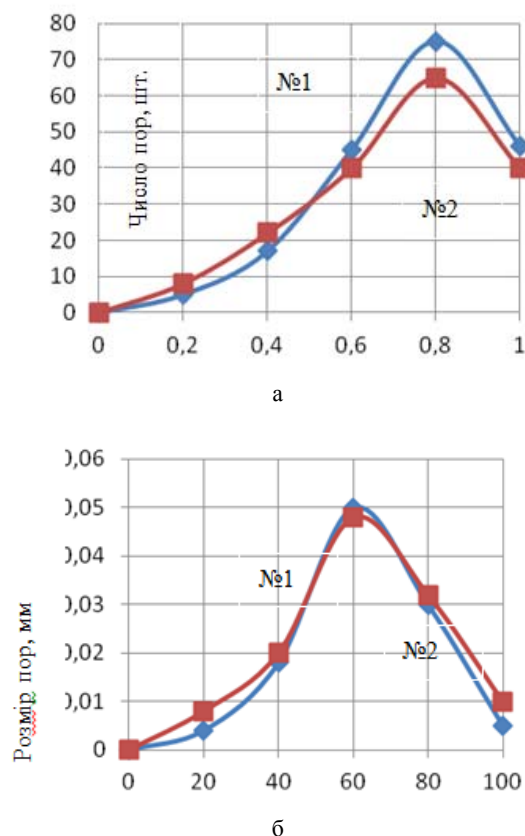


Рис. 9 – Параметри загальної пористості зразків №1 і №2 (160 мас. часток), спучених при температурі 300 °С (другий ендотермічний мінімум): а – Інтервал фактора форми; б – Розподіл пор за розмірами

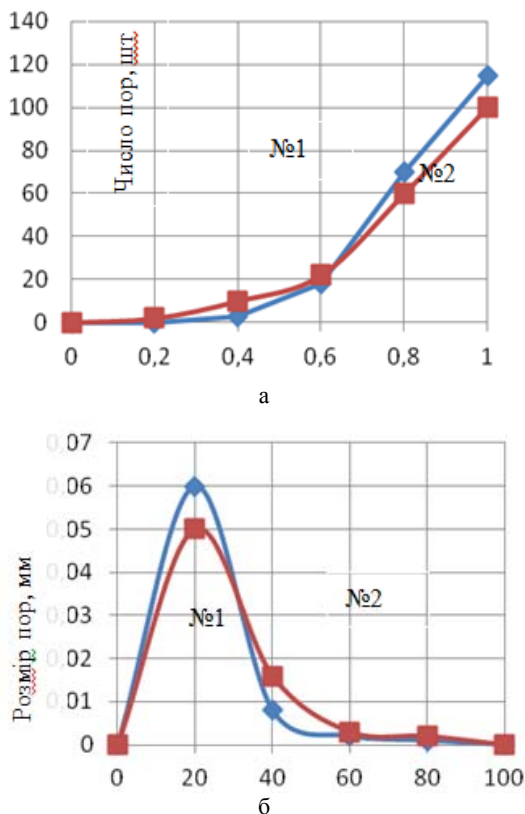


Рис. 8 – Параметри загальної пористості зразків №1 і №2 160 мас. часток), спучених при температурі 160 °С (перший ендотермічний мінімум): а – Інтервал фактора форми; б – Розподіл пор за розмірами

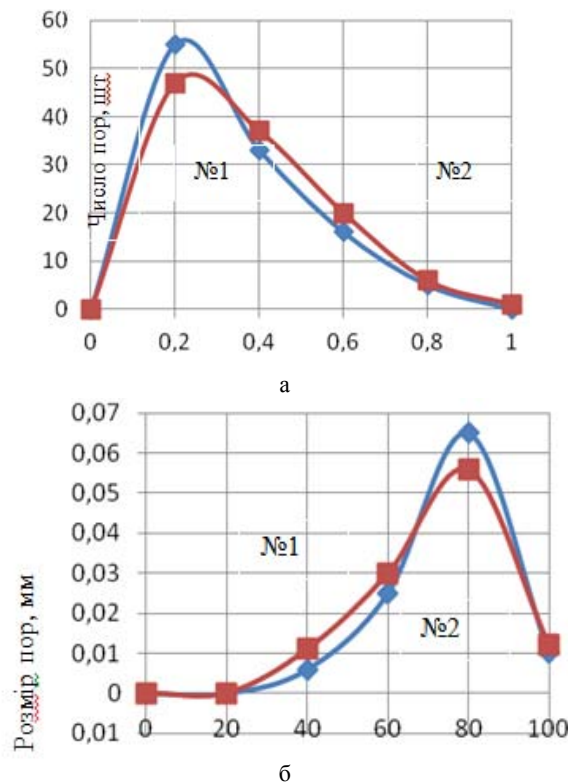


Рис. 10. Параметри загальної пористості зразків №1 і №2 (160 мас. часток), спучених при температурі 700 °С (третій ендотермічний мінімум): а – Інтервал фактора форми; б – Розподіл пор за розмірами

На рис. 5–10 наведені параметри пористості зразків № 1 і № 2 для суміші з різним вмістом 75 і 160 масових часток. Характерною ознакою отриманих даних є те, що графіки для різних типів глин практично збігаються. Суттєві відмінності є в показниках для різних температурних мінімумів. Так, для першого ендотермічного мінімуму ми отримали спучений матеріал з дрібними, практично сферичними порами. Більша їх частина мала мінімальні розміри. Спучування сировинної суміші у другому ендотермічному мінімумі дає змішану пористість (сферичну, комірчасту і каналну). Матеріал стає менш міцним. При спучуванні в умовах третього ендотермічного мінімуму формується переважно канална пористість. Такий матеріал має найменшу міцність. Слід очікувати зниження коефіцієнта теплопровідності з підвищенням температури спучування.

Висновки. Вирішення проблеми створення нових пористих теплоізоляційних матеріалів і технологій їх виробництва нероздільно пов'язане з науковими дослідженнями в галузі енергоперенесення у пористій структурі на етапах спучування, затвердіння і сушіння за умови забезпечення найбільш низької теплопровідності і щільності.

Зазначені властивості матеріалів визначаються величиною їх пористості, співвідношенням мікро- та макропористості, властивостями міжпорового матеріалу, що утворюють своєрідний несучий каркас, котрий, у свою чергу, визначається технологією виробництва, видом сировинних матеріалів і умовами їх підготовки. Усе вище перелічене ставить особливі вимоги до формування структури матеріалу з метою забезпечення при цьому відносно високої міцності і довговічності.

За допомогою диференційно-термічного аналізу досліджені режими термообробки, встановлені раціональні температурні параметри спучування, що дозволяють реалізувати даний процес при мінімальних енергетичних затратах з прогнозованими теплофізичними властивостями отриманих матеріалів.

Список літератури:

1. Соколовская, И. Е. Получение пористых материалов с прогнозируемыми теплофизическими характеристиками [Текст] / И. Е. Соколовская, А. В. Кошляк, А. М. Павленко // Сборник научных трудов ДГТУ. – 2007. – № 8. – С. 122–126.
2. Кошляк, Г. В. Теоретичні та технологічні основи розробки пористих матеріалів з заданими теплофізичними характеристиками [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. В. Кошляк. – Ін-т проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України. – Харків, 2009. – 21 с.
3. Боднарєва, Л. Поведение легкого керамзита, бетона, подверженных воздействию высоких температур [Текст] / Л. Боднарєва, Р. Гела, М. Губертова, И. Новакова // Международный журнал гражданского, экологического, структурного строительства и архитектурного проектирования. – 2014. – № 8. – С. 1205–1208.
4. Nimmo, J. R. Porosity and pore-size distribution [Text] / J. R. Nimmo // Encyclopedia of Soils in the Environment. – 2005. – P. 295–303. doi: [10.1016/b0-12-348530-4/00404-5](https://doi.org/10.1016/b0-12-348530-4/00404-5)
5. Шпак, А. П. Кластерные и наноструктурные материалы. Т. 3: Пористость как особое состояние самоорганизованной структуры в твердотельных наноматериалах [Текст] / А. П. Шпак, П. Г. Черемской, Ю. А. Куницкий, О. В. Соболев // Пористость

- как особое состояние структуры в твердотельных наноматериалах. – Киев: Академперіодика, 2005. – 516 с.
6. Komissarchuk, O. Pore structure and mechanical properties of directionally solidified porous aluminum alloys [Text] / O. Komissarchuk, Z. Xu, H. Hao // China Foundry. – 2014. – Vol. 11, № 1. – P. 1–7. – Available at: <http://www.foundryworld.com/uploadfile/2014022661057541.pdf>
7. Bajare, D. Lightweight Concrete with Aggregates Made by Using Industrial Waste [Text] / D. Bajare, J. Kazjonovs, A. Korjakins // Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering. – 2013. – Vol. 4, № 5. – doi: [10.5755/j01.sace.4.5.4188](https://doi.org/10.5755/j01.sace.4.5.4188)
8. Lopez-Pamies, O. Effects of internal pore pressure on closed-cell elastomeric foams [Text] / O. P. Lopez-Pamies, P. Castañeda, M. I. Idiart // International Journal of Solids and Structures. – 2012. – № 49 (19-20). – P. 2793–2798. doi: [10.1016/j.ijsolstr.2012.02.024](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.02.024)
9. Aboudi, J. Micromechanics of Composite Materials: A Generalized Multiscale Analysis Approach [Text] / J. Aboudi, S. Arnold, B. Bednarczyk. – Butterworth-Heinemann, 2012. – 1006 p.
10. Братута, Е. Г. Пористі теплоізоляційні матеріали [Текст]: монографія / Е. Г. Братута, А. М. Павленко, А. В. Кошляк, О. В. Кружляков. – Х.: ТОВ «ЕДЕНА», 2010. – 107 с.
11. Павленко, А. М. Peculiarities control the forming of the porous structure [Text] / А. М. Павленко, Н. В. Косляк, В. О. Усенко // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 6. – P. 92–95.
12. Вукалович, М. П. Термодинамика [Текст] / М. П. Вукалович, И. И. Новиков. – Москва: Машиностроение, 1972. – 672 с.

Bibliography (transliterated):

1. Sokolovskaia, Y. E., Koshlak, A. V., Pavlenko, A. M. (2007). Poluchenye porystykh materialov s prognozyruemymy teplofizycheskymy kharakterystykamy. Sbornyk nauch. trudov DHTU, 8, 122–126.
2. Koshlak, H. V. (2009). Teoretychni ta tekhnolohichni osnovy rozrobky porystykh materialiv z zadanyimi teplofizychnymy kharakterystykamy. In-t problem mashynobuduvannia im. A. M. Pidhornoho NAN Ukrainy, Kharkiv, 21.
3. Bodnareva, L. (2014). Povedenye lehkoho keramzyta, betona, podverzhennykh vozdeistviyu vysokikh temperature. Mezhdunarodnyi zhurnal hrazhdanskoho, ekologicheskoho, struktornoho stroitelstva y arkhytektornoho proektyrovaniya, 8, 1205–1208.
4. Nimmo, J. R. (2005). POROSITY AND PORE-SIZE DISTRIBUTION. Encyclopedia of Soils in the Environment, 295–303. doi: [10.1016/b0-12-348530-4/00404-5](https://doi.org/10.1016/b0-12-348530-4/00404-5)
5. Shpak, A. P., Cheremskoi, P. H., Kunytskyi, Yu. A., Sobol, O. V. (2005). Klasternye i nanostrukturnye materialy. T. 3: Poristost' kak osoboe sostojanie samoorganizovannoy struktury v tverdotel'nykh nanomaterialah. Porystost' kak osoboe sostoianye struktury v tverdotel'nykh nanomaterialakh, Kyev: Akademperryodyka, 516.
6. Komissarchuk, O., Xu, Z., Hao, H. (2014). Pore structure and mechanical properties of directionally solidified porous aluminum alloys. China Foundry, 11, 1, 1–7. Available at: <http://www.foundryworld.com/uploadfile/2014022661057541.pdf>
7. Bajare, D., Kazjonovs, J., Korjakins, A. (2013). Lightweight Concrete with Aggregates Made by Using Industrial Waste. Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering, 4 (5). doi: [10.5755/j01.sace.4.5.4188](https://doi.org/10.5755/j01.sace.4.5.4188)
8. Lopez-Pamies, O., Castañeda, P. P., Idiart, M. I. (2012). Effects of internal pore pressure on closed-cell elastomeric foams. International Journal of Solids and Structures, 49 (19-20), 2793–2798. doi: [10.1016/j.ijsolstr.2012.02.024](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.02.024)
9. Aboudi, J., Arnold, S., Bednarczyk, B. (2012). Micromechanics of Composite Materials: A Generalized Multiscale Analysis Approach. Butterworth-Heinemann, 1006.
10. Bratuta, E. H., Pavlenko, A. M., Koshlak, A. V., Krugljakov, O. V. (2010). Porysti teploizoliatsiini materialy. Kharkiv: TOV «EDENA», 107.
11. Pavlenko, A. M., Koshlak, H. V., Usenko, B. O. (2014). Peculiarities control the forming of the porous structure. Metallurgical and Mining Industry, 6, 92–95.
12. Vukalovich, M. P., Novykov, Y. Y. (1972). Termodynamika. Moscow: Mashynostroeniye, 672.

Надійшла (received) 27.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Пориста теплоізоляція на основі глинозему/ Л. П. Шумська // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.110–116. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Пористая теплоизоляция на основе глинозема/ Л. П. Шумская // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С. 110–116.– Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

The porous thermal insulation based on alumina/ L. Shumska //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 110–116. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шумська Любов Петрівна – директор Полтавського коледжу нафти і газу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, здобувач кафедри тепlopостачання, вентиляції та теплоенергетики Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка; Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, Україна, 36011; e-mail: schumska@gmail.com.

Шумская Любовь Петровна – директор Полтавского колледжа нефти и газа Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка, соискатель кафедры теплоснабжения, вентиляции и теплоэнергетики Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка; Першотравневый проспект, 24, г. Полтава, Украина, 36011; te-mail: schumska@gmail.com.

Shumska Lyubov – Director of Poltava Oil and Gas College of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, aspirant of Department of Heat and gas supply, ventilation and heat power engineering of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University; Pershotravnevyyi avenue, 24, Poltava, Ukraine 36011; e-mail: schumska@gmail.com.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

УДК 543.1; 535.016

Д. Г. РАДОВ, В. П. МАСЛОВ, Г. В. ДОРОЖИНСЬКИЙ

ВИЯВЛЕННЯ ОТРУЙНИХ ДОМІШОК В ЕТАНОЛІ МЕТОДОМ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСУ

Основною причиною смертності від алкоголю в Україні є присутність в ньому отруйних домішок таких як метанол. Існуючі методи контролю якості етанолу, як основної складової алкоголю, є коштовними та потребують спеціалізованого обладнання високої вартості, допоміжних реагентів та кваліфікованого персоналу. Альтернативним є метод на основі явища поверхневого плазмонного резонансу, котрий дозволяє визначати менші концентрації шкідливих домішок у етанолі (0,00202% об.) за регламентовані стандартом України (0,005% об.). Експериментально показано, що такі концентрації не детектуються методами кондуктометричним та ІЧ-спектроскопії. Результати досліджень можуть бути використані для вдосконалення існуючих та створення нових методик контролю домішок в етанолі.

Ключові слова: етанол, метанол, отруйні органічні речовини, ІЧ-спектроскопія, поверхневий плазмонний резонанс.

Основной причиной смертности от алкоголя в Украине является присутствие в нем ядовитых примесей таких как метанол. Существующие методы контроля качества этанола, как основной составляющей алкоголя, являются дорогостоящими и требуют специализированного оборудования высокой стоимости, вспомогательных реагентов и квалифицированного персонала. Альтернативным является метод на основе явления поверхностного плазмонного резонанса, который позволяет определять концентрации вредных примесей в этаноле (0,00202% об.), которые меньше установленных стандартом Украины (0,005% об.). Экспериментально показано, что такие концентрации не детектируются методами кондуктометрическим и ИК-спектроскопии. Результаты исследований могут быть использованы для совершенствования существующих и создания новых методик контроля примесей в этаноле.

Ключевые слова: этанол, метанол, ядовитые органические вещества, ИК-спектроскопия, поверхностного плазмонного резонанс.

Every year by low quality alcohol poisoning in Ukraine 10 thousand citizens died, and in 2017 the projected number of deaths can grow significantly. The main cause poisoning and death are in the presence of alcoholic beverages contaminants, fusel oils, esters, toxic alcohols (eg, methanol, isopropanol, pentanol), aldehydes. To control the quality of ethanol mainly used chromatographic method, which is expensive, require specialized equipment of high value ancillary reagents and qualified personnel. An alternative method may be based on the phenomenon of surface plasmon resonance (SPR), which allows for rapid analysis (measurement of length less than 10 sec.) And can be less expensive for existing methods. Diagnosing devices that are based on the phenomenon of surface plasmon resonance, have high sensitivity to low concentrations (0.01-2 mg/kg) of liquid and gaseous substances and are characterized by high accuracy measurements. allows you to define a smaller concentration of contaminants in ethanol (0.00202% vol.) for the regulated standard of Ukraine (0.005% vol.). Shown experimentally that such concentration is not detected by conductometry and IR spectrometry. The research results can be used to improve existing and create new methods for monitoring toxic contaminants in ethanol.

Keywords: Ethanol, methanol, toxic organic substances, IR spectrometry, surface plasmon resonance.

Вступ. За даними Всесвітньої організації з охорони здоров'я (ВОЗ), щорічно від отруєння сурогатним алкоголем в Україні помирає 10 тисяч громадян, а в 2017 році за прогнозами кількість загиблих від фальсифікату може вирости в рази. Основною причиною отруєнь і смертності є присутність в алкогольних напоях окрім етанолу та дистильованої води, як основних складових, шкідливих домішок: сивушних масел, ефірів, метанолу, альдегідів, тощо. Наявність на алкогольному ринку України фальсифікату пов'язана у першу чергу з відсутністю доступних, високоточних, дешевих та експресних методів контролю якості горілчаних виробів, в тому числі і їх вихідної речовини – етилового спирту. Для контролю якості етилового спирту переважно застосовують хроматографічний метод, котрий є коштовним, потребує спеціалізованого обладнання високої вартості, допоміжних реагентів (водень) та кваліфікований персонал. Тому перспективним напрямом виявлення отруйних речовин в етанолі та його водних розчинах є розробка альтернативного методу контролю їх наявності, який дозволить проводити експрес аналіз і буде менш коштовним за існуючі методи, матиме високу точність вимірювання і високу чутливість до малих концентрацій шкідливих домішок.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. В Україні споживання алкоголю на одну людину віком понад 15 років протягом 2016 року ста-

новило 13,9 л чистого етанолу, що відповідає шостому місцю серед 188 країн світу, наприклад, в США – 9,2 л [1]. Така кількість споживання алкоголю перевищує верхню межу допустимої дози (11 л). Допустима доза споживання алкоголю за добу для дорослої людини, котра не страждає на хронічні захворювання, не повинна перевищувати 30 мл чистого етилового спирту [2]. Серед найпоширеніших причин смерті від нещасних випадків невиробничого характеру за даними Держстату України у 2014 році, випадкове отруєння алкоголем займало 4-те місце (8,4 %) поступаючись ушкодженням раптового і навмисного характеру (40 %) та транспортним нещасним випадкам (13,6 %) [3]. Смертельна доза алкоголю становить від 4 до 12 г чистого етилового спирту на 1 кг маси тіла [4]. Такий діапазон небезпечної дози викликаний неоднаковою здатністю у різних людей до переробки алкоголю та вихідним вмістом отруйних речовин в ньому.

Основним вітчизняним виробником етилового спирту є концерн «Укрспирт» [5], який виробляє чотири марки харчового етилового спирту (таб.1). Якість етилового спирту регламентується стандартом ДСТУ 4221:2003 [6], згідно до якого основними домішками у етанолі є альдегіди, сивушні масла, ефіри та метанол. При цьому масова частка метанолу є найбільшою серед домішок і складає приблизно 14 мкг/мл у перерахунку з об'ємної частки для чистого спирту. Загальна масова частка домішок складає 19,5 мкг/мл.

© Д. Г. Радов, В. П. Маслов, Г. В. Дорожінський. 2017

Таблиця 1 – Вимоги до етанолу згідно до ДСТУ 4221:2003

Марка спирту	Об'ємна частка, %		Гранична концентрація, мкг/мл		
	Етанол	Метанол	Альдегіди	Сивушні масла	Ефіри
Пшенична сльоза	96,3	0,005	2,00	2,00	1,50
Люкс	96,3	0,01	2,00	2,00	2,00
Екстра	96,3	0,02	2,00	3,00	3,00
Вищої очистки	96,0	0,03	4,00	4,00	5,00

Аналіз публікацій показав, що основним методом контролю наявності шкідливих домішок в етиловому спирті та його водних розчинах є: хроматографічний, спектральний та хімічні методи [7, 8]. Найбільш точним (0,0001 %об.) та уживаним є хроматографічний метод. Для калібрування газових хроматографів підприємством ГП «Укрметрестандарт» розроблено стандартні 40 %-і водні розчини етилового спирту з отруйними спиртами (в тому числі з метанолом 0,00202 %об.) та ефірами.

Основними недоліками існуючих методів визначення домішок у етиловому спирті є потреба у пробо підготовці, велика вага та висока вартість аналітичного обладнання, потреба у висококваліфікованому персоналі. Загальна витрата часу на контроль якості етанолу хроматографічним методом, згідно ДСТУ 4222, становить понад 10 хвилин робочого часу і потребує додатково об'ємні витрати повітря, водню та гелію, котрі є коштовними і при роботі з ними необхідно забезпечувати підвищені вимоги до охорони праці та пожежної безпеки. Альтернативою може бути метод на основі явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР), котрий дозволяє проводити експрес аналіз (тривалість виміру менше 10 сек.) та може бути менш коштовним за існуючі методи. Діагностуючі пристрої, що працюють на основі явища ППР, мають високу чутливість до малих концентрацій (0,01–2 мкг/кг) рідких і газоподібних речовин [9, 10] і характеризуються високою точністю вимірювань [11].

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення можливості виявлення отруйних спиртів та ефірів у 40 %-му розчині етанолу за допомогою методу ППР та порівняння ефективності цього методу з методом ІЧ-спектрометрії.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

1. Виконати визначення методом ППР зміни ПЗ 40 %-го водного розчину етанолу при наявності в ньому отруйних домішок спиртів та ефірів, а також 96 %-го етанолу з домішками метанолу.

2. Виміряти та порівняти спектри поглинання 40 %-го водного розчину етанолу при наявності в ньому отруйних домішок спиртів та ефірів.

3. Провести аналіз та узагальнення результатів експериментів.

Матеріали та методи виявлення отруйних спиртів та ефірів в етанолі методом поверхневого плазмонного резонансу. Досліджувані матеріали:

1. Спирт етиловий (етанол) 96±1 %;
2. Водний розчин етанолу 40±2 %об.
3. Спирт метиловий (метанол) 100 %;
4. Розчин 7-ми спиртів у 40 %-му етанолі з вмістом метанолу 6,4±0,07 мкг/мл (0,00202 %об.) та інших спир

тів 2±0,07 мкг/мл (зразок 3.4_UMTS_TIAP_03м3/2 ГП «Укрметрестандарт»);

5. Розчин ефірів у 40 %-му етанолі з вмістом ефірів 2,23±0,07 мкг/мл (зразок 3.4_UMTS_TIAP_04м3/2 ГП «Укрметрестандарт»);

Методичною основою виконання комплексних досліджень є:

1. Чисельний аналіз різниці ПЗ зразків чистого 40 %-го етанолу та з домішками спиртів та ефірів, а також 96 %-го етанолу з домішками метанолу. Значення різниці ПЗ (зсуву мінімуму ППР) вимірювали приладом «Аква-Поляритон» з діапазоном вимірювання від 0...0,012 (0... 1 кут. град.) з похибкою вимірювання $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ (± 15 кут.сек.).

2. Дослідження спектрів поглинання зразків чистого 40 %-го етанолу та з домішками спиртів та ефірів. Спектри поглинання вимірювали на Фурє-спектрометрі Infracum FT-801 з діапазоном вимірювання 500... 5000 см^{-1} (відповідно 2... 20 мкм) з похибкою вимірювання $\pm 2 \text{ см}^{-1}$.

3. Аналіз зміни електричної провідності зразків чистого 96 %-го етанолу та з домішками метанолу. Провідність вимірювали на кондуктометрі ___ з діапазоном вимірювання від 0 до 9000 мкСм/см з похибкою вимірювання $\pm 2 \text{ мкСм/см}$.

Малогабаритний спеціалізований рефрактометр «Аква-Поляритон» заснований на явищі ППР. Явище ППР – це порушення повного внутрішнього відбиття (ПВВ) монохроматичного р-поляризованого світла на межі двох середовищ з різними ПЗ: скляної призми та досліджуваної речовини (аналіту) між якими розташована тонка (10...100 нм) металева плівка. Обертаючи призму, змінюють кут падіння світла на її робочу грань з металевою плівкою і одночасно вимірюють характеристику відбиття – залежність нормованої інтенсивності відбитого світла (коефіцієнта відбиття R) від кута його падіння (рис. 1).

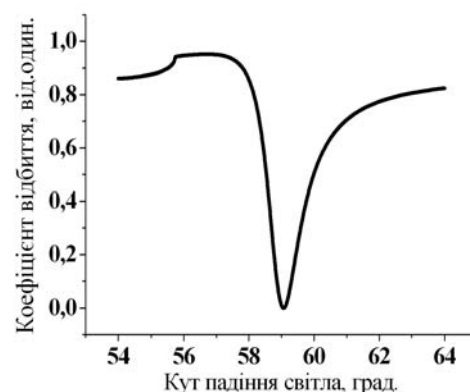


Рис. 1 – Залежність нормованої інтенсивності відбитого світла (коефіцієнта відбиття) від кута його падіння

Вимірний зсув кутового положення мінімуму характеристики відбиття визначає абсолютне значення та відносну зміну ПЗ аналіту.

Об'єктом дослідження є процес визначення домішок спиртів та ефірів у водному розчині етанолу методами поверхневого плазмонного резонансу, ІЧ-спектроскопії та кондуктометрії.

Предметом дослідження є кутовий зсув мінімуму характеристики відбиття за умови поверхневого плазмонного резонансу, зміна ІЧ-спектрів поглинання та провідності водного розчину етанолу при наявності в ньому домішок спиртів та ефірів.

Методика дослідження:

Так як прямим вимірюванням неможливо визначити концентрації відповідних домішок у етанолі методом ППР, оскільки відсутні компліментарні пари до цих речовин, котрі будуть селективно з ними взаємодіяти на поверхні металевого шару чутливого елементу ППР-рефрактометра. Тому для визначення наявності домішок використовували порівняльний метод, суть якого полягала у почерговому вимірюванні кутового зсуву мінімуму характеристики відбиття для 40%об. розчину етанолу у дистильованій воді (порівняльний зразок) і 40%об. розчину етанолу у дистильованій з домішками, а потім визначали різницю між результатами вимірювання. Вимірювання виконували ППР-рефрактометром в режимі Multiple. Через вимірювальну кювету рефрактометра прокачували перистальтичним насосом спочатку 40 % об. розчин етанолу, 40 %об. розчин етанолу зі 7-ми спиртами (зразок 1), а потім знов порівняльний зразок. Процедуру повторювали для 40%об. розчину етанолу з 5-ма ефірами (зразок 2). Для зменшення похибки вимірювання ПЗ викликані зміною тиску у вимірювальній кюветі прокачували аналіти зі швидкістю 20 мкл/хв., а для мінімізації температурної похибки рефрактометр і ємності зі зразками розміщували в термобоксі при температурі робочої камери $+20\pm 1$ °С.

Для визначення спектрів поглинання водних розчинів етанолу з домішками було досліджено чотири зразки: 96 %-етанол, 40 %-етанол та 40 %-етанол з домішками спиртів та ефірів. Для зменшення поглинання зразком та кюветою ІЧ-випромінювання досліджувані зразки розміщували у кюветах з довжиною оптичного шляху 52 ± 5 мкм з матеріалу КРС.

Додатково було проведено дослідження можливості визначення вмісту метанолу в 96 %-му етиловому спирті кондуктометричним методом [12]. Для цього було приготовлено 4 зразки з різною концентрацією метанолу: 0 %об., $0,04\pm 0,01$ %об., $0,29\pm 0,01$ %об., $1,00\pm 0,01$ %об., $5,00\pm 0,01$ %об. Для порівняння зразки вимірювали методом ППР відповідно до вище наведеної методики замінюючи етанол досліджуваними зразками. Кондуктометричним методом вимірювали додатково, для порівняння, дистильовану воду.

Результати виявлення отруйних спиртів та ефірів в етанолі методом поверхневого плазмонного резонансу. В результаті проведених досліджень було встановлено, що спектральний та кондуктометричний методи не є ефективними для визначення наявності отруйних спиртів та ефірів у етанолі та його водному розчині, оскільки не можуть виявити їх (рис. 2, 5).

Спектри поглинання чистого етанолу (рис. 2, графік 1) та етанолу з домішками спиртів (рис. 2, графік 2) та ефірів (рис. 2, графік 3) є практично ідентичними з відсутніми смугами поглинання в діапазоні довжин хвиль 1750... 2250 нм характерними, наприклад, для метанолу у порівнянні з спектром поглинання етанолу (рис. 3).

На рис. 4 представлено виміряні кінетичні залежності кутового зсуву мінімуму характеристики відбиття при ППР для 40 %об. розчину етанолу зі 7-ми спиртами (1) та 40 %об. розчину етанолу з 5-ма ефірами (2). В табл. 1 наведено виміряні значення кутового зсуву мінімуму характеристики відбиття при ППР для відповідних розчинів.

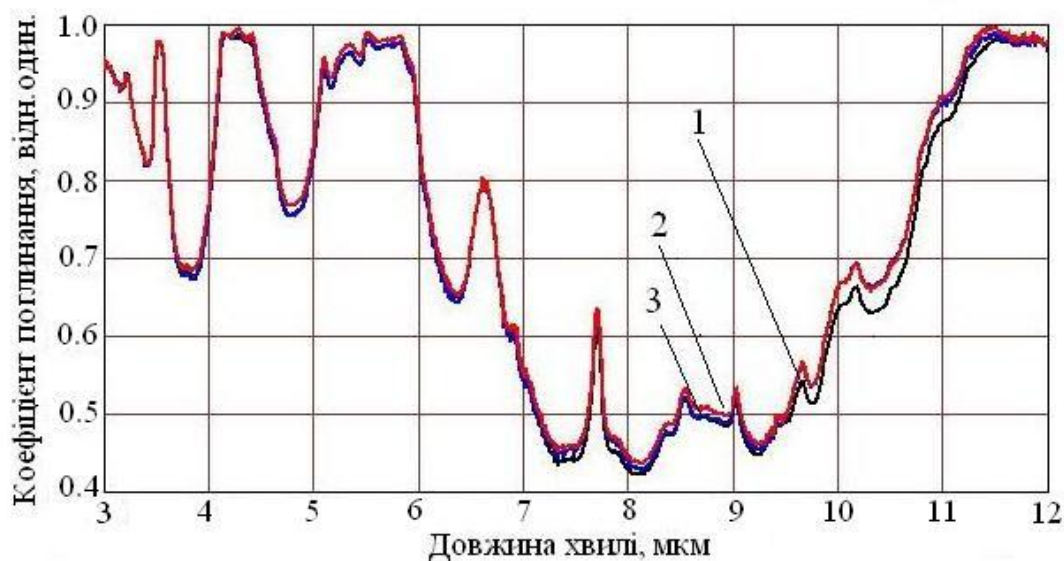


Рис. 2 – Виміряні спектри поглинання для 96 %-го водного розчину етанолу (1), 40 %-го водного розчину етанолу зі 7-ми спиртами (2) та з 5-ма ефірами (3) без смуг поглинання води

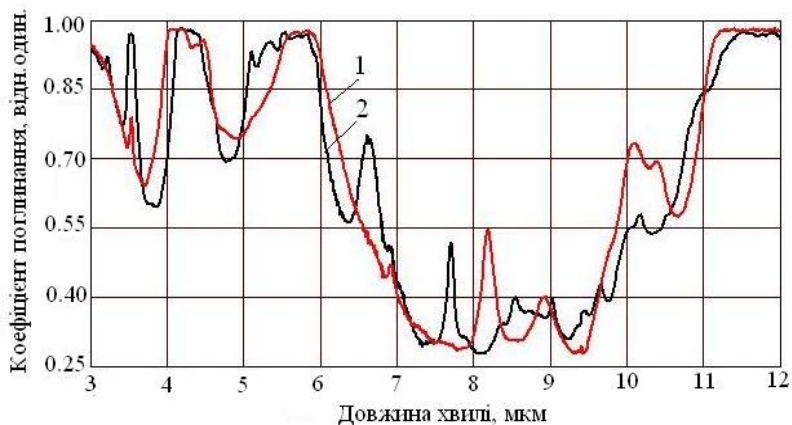


Рис. 3 – Виміряні спектри поглинання в ІЧ-діапазоні довжин хвиль для 100 % метанолу (1) та 96 % етанолу (2)

Таблиця 2 – Виміряні показники ППР для зразків розчину етанолу

№ п.п	Домішки у 40%об. етанолі	Концентрація домішок, мкг/см ³	Відносний зсув мінімуму ППР, кут. секунди (зміна ПЗ, $\cdot 10^{-5}$)
1	7 спиртів	8,4±0,07	360±15 (120±5)
2	5 ефірів	2,23±0,07	234±15 (78±5)

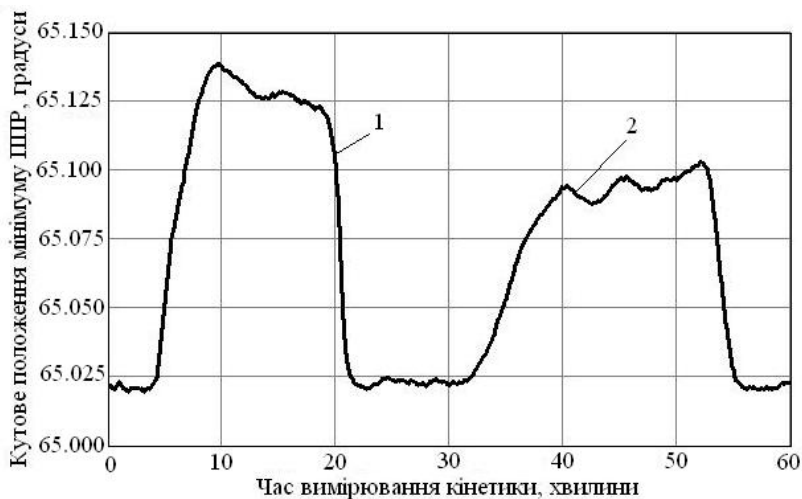


Рис. 4 – Виміряні кінетичні залежності кутового зсуву мінімуму характеристики відбиття при ППР для 40%об. розчину етанолу зі 7-ми спиртами (1) та 40%об. розчину етанолу з 5-ма ефірами (2)

З табл. 4 видно, що відносні зсуви мінімуму ППР при заміщенні розчину етанолу у дистильованій воді на розчин етанолу з 7-ми спиртами та розчин етанолу з 5-ма ефірами на порядок більші за похибку вимірювання ППР-рефрактометра «Аква-Поляритон» (15 кутових секунд).

Результати дослідження етанолу-96% з домішками метанолу показали, що кондуктометричним методом неможливо визначити органічні домішки ні в етанолі, ні у воді. Для всіх зразків виміряне значення кондуктометром становило 3 ± 2 мкСм/см. При цьому значення виміряної зміни показника заломлення приладом «Аква-Поляритон» мало залежність близьку до лінійної (рис. 5).

Виміряна залежність добре апроксимується лінійною функцією $Y(X) = k \cdot X + B$ для $k = 19,88 \pm 5,02$, $B = 33,19 \pm 1,96$ з параметром узгодження $R^2 = 0,997$.

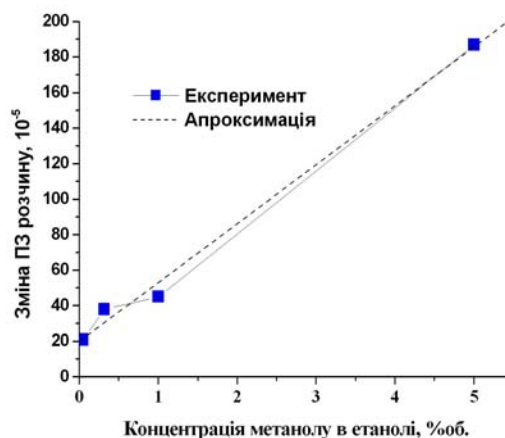


Рис. 5 – Експериментальна залежність зміни ПЗ розчину метанолу в етанолі 96%об

Обговорення результатів дослідження процесу додаткового очищення питної води методом поверхневого плазмонного резонансу. Враховуючи значне поглинання води у діапазоні вимірювання довжин хвиль була застосована процедура компенсації, яка полягала у вилученні спектру поглинання води зі спектру поглинання водного розчину етанолу. Така процедура дозволила за результатами вимірювання отримати більш інформативні спектри поглинання та зменшити апаратну похибку викликану інтенсивним поглинанням води. Незначна різниця у профілях спектрів (максимальне відхилення $\pm 0,02$ відн.один.) поглинання викликана похибкою геометричних розмірів вимірювальної кювети, а також не паралельністю її стінок.

За величиною абсолютного значення вимірюваного відгуку ППР-сенсора можна зробити висновок, що методом ППР можливо визначити і концентрації домішок у 40 %об. розчині етанолу менші, ніж визначені стандартами. Різниця у профілях кінетик досліджуваних зразків викликана різною в'язкістю та гідрофобністю вихідних речовин.

Кондуктометричним методом органічні домішки не можуть бути виявлені у етанолі, його водних розчинах та воді, оскільки вони не дисоціюють і не утворюють іонів провідності.

Висновки

1. Наявність на алкогольному ринку України неякісного алкоголю пов'язана з відсутністю доступних, високоточних, дешевих та експресних методів контролю якості горілчаних виробів, в тому числі і їх вихідної речовини – етилового спирту. Для контролю якості етилового спирту переважно застосовують хроматографічний метод, котрий потребує спеціалізованого обладнання високої вартості та кваліфікований персонал. Тому перспективним напрямом виявлення отруйних речовин в етанолі та його водних розчинах є розробка альтернативного методу контролю на основі явища поверхневого плазмонного резонансу.

2. Експериментально показана можливість визначення методом поверхневого плазмонного резонансу домішок у 40%об. розчині етанолу з концентраціями меншими (8,4 мкг/мл.) за визначені стандартами якості України (19,5 мкг/мл.). Дослідження проведено з використанням спеціалізованого обладнання «Аква-Поляритон» та методики виконання експерименту.

3. Виявлено переваги методу поверхневого плазмонного резонансу у порівнянні з існуючим методом ІЧ-спектроскопії. Експериментально показано неможливість визначення спектрометричним методом домішок у 40%об. розчині етанолу з концентраціями меншими 19,5 мкг/мл.

4. Експериментально показано, що кондуктометричний метод не може бути застосований для визначення органічних домішок у етанолі, його водних розчинах та воді, оскільки для всіх зразків виміряне значення кондуктометром становить одне й те саме значення 3 ± 2 мкСм/см.

Список літератури:

1. Дорогой, А. П. Алкогольна кардіоміопатія і алкогольна хвороба печінки: проблеми та наслідки вживання алкоголю [Текст] / А. П. Дорогой // Український кардіологічний журнал. – 2016. – № 1. – С. 22–31.
2. Poikolainen, K. Nature of questionnaire options affects estimates of alcohol intake [Text] / K. Poikolainen, P. Kärkkäinen // Journal of Studies on Alcohol. – 1985. – № 46 (3). – P. 219–222. doi: [10.15288/jsa.1985.46.219](https://doi.org/10.15288/jsa.1985.46.219)
3. Щорічна доповідь про стан здоров'я населення, санітарно-епідемічну ситуацію та результати діяльності системи охорони здоров'я України 2014 рік [Текст] / ред. О. Квіташвілі. – К., 2015. – 460 с. Режим доступу: <http://www.uiph.kiev.ua/download/Vidavnicтво/Shchorichna%20dopovid/%D0%A9%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B0%20%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D1%8C.2015.pdf>
4. Bellentani, S. Drinking habits as cofactors of risk for alcohol induced liver damage [Text] / S. Bellentani, G. Saccocio, G. Costa et al. // Gut. – 1997. – Vol. 41. № 6. – P. 845–850. doi: [10.1136/gut.41.6.845](https://doi.org/10.1136/gut.41.6.845)
5. Спирт етиловий [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrspirt.com/cms/production/etilovii.html>
6. ДСТУ 4221:2003. Спирт етиловий ректифікований [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://dnaop.com/html/33940/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_4221_2003
7. ДСТУ 4222:2003. Горілки, спирт етиловий та водно-спиртові розчини. Газохроматографічний метод визначення вмісту мікрокомпонентів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=67811
8. ДСТУ 4181:2003. Спирт етиловий ректифікований і спирт етиловий — сирець. Правила приймання і методи випробування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=67798
9. Shalabney, A. Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors [Text] / A. Shalabney, I. Abdulhalim // Laser Photonics Rev. – 2011. – Vol. 5, No. 4. – P. 571–606. doi: [10.1002/lpor.201000009](https://doi.org/10.1002/lpor.201000009)
10. Дорожинський, Г. В. Обнаружение паров метанола методом поверхностного плазмонного резонанса [Текст] / Г. В. Дорожинський, М. В. Лобанов, В. П. Маслов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 4/5 (76). – С. 4–7. doi: [10.15587/1729-4061.2015.47079](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47079)
11. Дорожинський, Г. В. Сенсорні прилади на основі поверхневого плазмонного резонансу [Текст] / Г. В. Дорожинський, В. П. Маслов, Ю. В. Ушенін. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 264 с.
12. Dorozinska H. Scientific, technical and economic aspects of water treatment in conditions of transformation of socio-economic systems [Text]: Monograph / H. Dorozinska, V. Maslov // Social and economic changes of contemporary society. – 2017. – № 2.3. – P. 84–92.

Bibliography (transliterated):

1. Dorohoj A. P. (2016). Alkoholna kardiomiopatiya i alkoholna khvoroba pechinky: problemy ta naslidky vzhivannya alkoholyu. Ukrayinskyj kardiologichnyj zhurnal, 1, 22–31.
2. Poikolainen, K., Kärkkäinen, P. (1985). Nature of questionnaire options affects estimates of alcohol intake. Journal of Studies on Alcohol, 46 (3), 219–222. doi: [10.15288/jsa.1985.46.219](https://doi.org/10.15288/jsa.1985.46.219)
3. Kvitashvili, O. (Ed.) (2015). Shhorichna dopovid pro stan zdorovyia naseleennyia, sanitarno-epidemichnu situaciyu ta rezultaty diyalnosti systemy okhorony zdorovyia Ukrainy 2014 rik. Kyiv, 460.
4. Bellentani S., Saccocio G., Costa G. et al. (1997). Drinking habits as cofactors of risk for alcohol induced liver damage. Gut 41, 6, 845–850. doi: [10.1136/gut.41.6.845](https://doi.org/10.1136/gut.41.6.845)
5. Ethanol alcohol. Available at: <http://www.ukrspirt.com/cms/production/etilovii.html>
6. DSTU 4221:2003. Spirt etylovij rektyfikovanyj. Texnichni umovy. Available at: http://dnaop.com/html/33940/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_4221_2003
7. DSTU 4222:2003. Horilky, spirt etylovij ta vodno-spirtovi rozchyny. Hazokhromatografichnyj metod vyznachannya vmistu mikrokomponentiv. Available at: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=67811
8. DSTU 4181:2003. Spirt etylovij rektyfikovanyj i spirt etylovij

- syrec". Pravyla pryjmannya i metody vyprovovuvannya. Available at: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=67798
9. Shalabney, A., Abdulhalim, I. (2011). Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors. *Laser & Photonics Reviews*, 5 (4), 571–606. doi: [10.1002/lpor.201000009](https://doi.org/10.1002/lpor.201000009)
 10. Dorozhinskij, G. V., Lobanov, M. V., Maslov, V. P. (2015). Detection of methanol vapor by surface plasmon resonance method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(5(76)), 4–7. doi: [10.15587/1729-4061.2015.47079](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47079)
 11. Dorozhynskiy, H. V., Maslov, V. P., Ushenin, Iu. V. (2016). Sensorni pryklady na osnovi poverkhnevoho plazmonnoho rezonansu. Kyiv: NTUU «KPI», 264.
 12. Dorozinska H., Maslov V. (2017). Scientific, technical and economic aspects of water treatment in conditions of transformation of socio-economic systems. *Social and economic changes of contemporary society*, 2.3, 84–92.

Надійшла (received) 18.01.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Виявлення отруйних домішок в етанолі методом поверхневого плазмонного резонансу/ Д. Г. Радов, В. П. Маслов, Г. В. Дорожинский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 117–122.– Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Выявление ядовитых примесей в этаноле методом поверхностного плазмонного резонанса/ Д. Г. Радов, В. П. Маслов, Г. В. Дорожинский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 117–122.– Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Detection toxic impurities in ethanol by surface plasmon resonance method/ D. Radov, V. Maslov, G. Dorozinsky //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P.117–122. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Радов Денис Георгійович – працівник ДК «Укроборонпром»; вул. Дегтярівська, 36, м. Київ, Україна, 04119; e-mail: Denis.Radov@ukroboronprom.com.

Радов Денис Георгиевич – работник ГК «Укроборонпром»; ул. Дегтярёвская, 36, г. Киев, Украина, 04119; e-mail: Denis.Radov@ukroboronprom.com.

Radov Denys – engineer SC “Ukroboronprom”; 36 Dehtiarivska str., Kyiv, Ukraine, 04119; e-mail: Denis.Radov@ukroboronprom.com.

Маслов Володимир Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу фізико-технологічних основ сенсорного матеріалознавства, Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарєва НАН України; пр. Науки, 41, м. Київ, Україна, 03028; e-mail: vpmaslov@ukr.net.

Маслов Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом физико-технологических основ сенсорного материаловедения, Институт физики полупроводников имени В. Е. Лашкарёва НАН; пр. Науки, 41, г. Киев, Украина, 03028; e-mail: vpmaslov@ukr.net.

Maslov Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Professor, head of department of physical and technological bases of sensory materials, V. Ye. Lashkaryov Institute of semiconductor physics NAS of Ukraine; 41 pr. Nauky, Kyiv, Ukraine, 03028; e-mail: vpmaslov@ukr.net.

Дорожинський Гліб Вячеславович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу фізико-технологічних основ сенсорного матеріалознавства, Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарєва НАН України; пр. Науки, 41, м. Київ, Україна, 03028; e-mail: gvdorozinsky@ukr.net.

Дорожинский Глеб Вячеславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела физико-технологических основ сенсорного материаловедения, Институт физики полупроводников имени В. Е. Лашкарёва НАН; пр. Науки, 41, г. Киев, Украина, 03028; тел.: 098-281-90-10; e-mail: gvdorozinsky@ukr.net.

Dorozinsky Glib – PhD, senior researcher of department of physical and technological bases of sensory materials, V. Ye. Lashkaryov Institute of semiconductor physics NAS of Ukraine; 41 pr. Nauky, Kyiv, Ukraine, 03028; e-mail: gvdorozinsky@ukr.net.

УДК 543.271.3

В. М. ІВАСЕНКО, Т. О. ВИННИЧЕНКО**ОЦІНКА ВПЛИВУ АВТОЗАПРАВНИХ СТАНЦІЙ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ**

В даній роботі представлена методика для визначення просторового впливу автозаправних станцій на їх оточення. Метод заснований на тому факті, що відношення концентрацій ароматичних і ациклічних вуглеводнів в повітрі автозаправних станцій (в основному визначається викидами бензину з резервуарів та паливо заправних пістолетів) відрізняється від знайденого в міському повітрі (в основному визначається вихлопними газами автотранспортних засобів). Ця методика повинна допомогти створити «пояс» навколо заправних станцій, де буде обмежено вплив на населення, школи і лікарні.

Ключові слова: автозаправні станції, викиди, вплив, вуглеводні, навколишнє середовище, концентрації шкідливих речовин, бензол, н-гексан.

В данной работе представлена методика для определения пространственного воздействия автозаправочных станций на их окружение. Метод основан на том факте, что отношение концентраций ароматических и ациклических углеводородов в воздухе автозаправочных станций (в основном определяется выбросами бензина из резервуаров и топливо заправочных пистолетов) отличается от найденного в городском воздухе (в основном определяется выхлопными газами автотранспортных средств). Эта методика должна помочь создать «пояс» вокруг заправочных станций, где будет ограничено влияние на население, школы и больницы.

Ключевые слова: автозаправочные станции, выбросы, влияние, углеводороды, окружающая среда, концентрации вредных веществ, бензол, н-гексан.

In hired methodology is presented for determination of spatial influence of the filling stations on their surroundings. A method is based on circumstance that relation of concentrations of aromatic and acyclic hydrocarbons in mid air the filling stations (mainly determined by the extrass of petrol from reservoirs and fuel of filling pistols) differs from found in municipal air (mainly determined by the exhaust-gass of vehicles). On the basis of it, by a border from the filling station there is the first point influence of petrol in the distance from the station, where correlation becomes equal to the value of background in city. Application of this method, includes the multidrop measuring of concentrations at the investigated filling station and adherent territory, processing of data programmatic facilities. This methodology must help to create a "belt" round the filling stations, where influence will be restrictedly on a population, schools and hospitals.

Keywords: gas stations, emissions, impact, hydrocarbons, environment, concentration of pollutants, benzene, n-hexane.

Вступ. Леткі органічні сполуки (ЛОС) належать до групи хімічних речовин, що характеризуються їх відносно високим тиском пари. Вплив цих сполук може призвести до ряду неприємних наслідків для здоров'я людини, включаючи астму, головний біль, ураження слизової оболонки, а в деяких випадках (наприклад викиди бензолу) підвищує ризик розвитку раку [1].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У міських районах основним джерелом ЛОС, як правило є рух транспорту [2]. Також додатковими джерелами ЛОС є автозаправні станції (АЗС) та підприємства малої промисловості, які використовують органічні сполуки як розчинники. Автозаправні станції в якості джерела викидів ЛОС були предметом серйозних досліджень [3–6], особливий інтерес стосувався: розробка і оцінка управліннь по зменшенню викидів, які пов'язані з їх впливом на працівників [7]. Зростання кількості автомобілів призводить до того, що багато АЗС будуються в міських районах, поблизу житлових будинків. Це призводить до постійних суперечок між міськими жителями та владою, що відповідала за управління земельними ресурсами. Очікується що відповідно до розпорядження КМУ від 17 вересня 2014 р. № 847-р [8] з 2018 року в Україні набуде чинності Директива 2008/50/ЄС [9], що визначатиме стандарти якості атмосферного повітря, і єдиною речовиною з ЛОС, що підлягатиме регулюванню буде бензол.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення просторового впливу автозаправних станцій на їх оточення.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Проведення багатоточкових вимірювань концентрацій ЛОС на автозаправній станції та навколишньої території,

2. Розробка метод оцінки впливу автозаправних станцій на їх околиці на основі порівняння вимірних концентрацій в місті і на заправній станції.

Експериментальний розділ. Дослідження проводились в Дарницькому районі міста Київ. Місто Київ характеризується середньою кількістю опадів за рік (близько 620 мм), середня температура літніх місяців – близько +19°C, зимових – близько –5°C. Найнижча зафіксована температура –36°C, найвища близько +40°C у тіні.

Предметом дослідження було відносна концентрація ЛОС в повітрі міста на площі приблизно 48 000 м², навколо автозаправної станції «КЛЮ».

Ця АЗС розташована в центральній частині міста, не обладнана системою рекуперації парів палива (повернення ЛОС-насичених об'ємів повітря) з резервуару, що заповнюється в резервуар з якого заповнюють. АЗС складається з чотирьох паливно-роздавальних колонок для бензину та дизельного пального, а також чотирьох підземних резервуарів для зберігання палива, обладнаних дихальними клапанами. З заходу (просп. Юрія Гагаріна) та півночі (бульв. Верховної Ради) автозаправна станція межує з широкою дорогою, таке розташування є зручним для вільного доступу автомобілів. Крім того на півночі через дорогу знаходиться будівля навчального закладу. Зі сходу від станції знаходиться будівля супермаркету та офісні будівлі. З півдня на відстані понад 50 м, знаходяться декілька житлових будинків. Цепояснює, чому була вибрана саме ця АЗС: південна сторона знаходиться біля забудованої частини міста, в той час як північна практично не розвинута (рис. 1).

© В. М. Івасенко, Т. О. Винниченко. 2017

Відбір проб. У зв'язку з тим, що умови руху в місті змінюється протягом усього тижня, кількість транспорту в робочі дні (з понеділка 08:00 год до 22:00 год п'ятниці) відрізняється від кількості у вихідні дні (п'ятниця з 22:00 год до 08:00 год понеділка). З цієї причини дослідження було проведено в двох різних операціях з відбору проб: понеділок-п'ятниця (з 15.08.16 до 19.08.16 і з 29.08.16 до 02.09.16) із загальним часом експозиції в кожній операції 110 годин. Для вимірювання летких органічних сполук в міській місцевості було використано 105 пасивних пробовідбірників (Radiello RAD120 Diffusive Bodie) [10].

Для проведення вимірювання використовувалось, п'ятнадцять пасивних пробовідбірників Radiello,

які були розміщені в районі розташування автозаправної станції. При цьому три з них розміщувались на самій автозаправній станції, поряд з паливороздавальними колонками та дихальними клапанами, інші були розміщені в радіусі 100м. Варто зазначити, що остаточне розміщення визначало наявність місць для кріплення. Розміщення пасивних пробовідбірників навколо заправної станції зображено на рис. 1.

Температура, швидкість і напрямок вітру вимірювалися щогодини, протягом двох кампаній по відбору проб, на найближчому посту спостереження ПСЗ №3 (вул. Попудренка, 50).

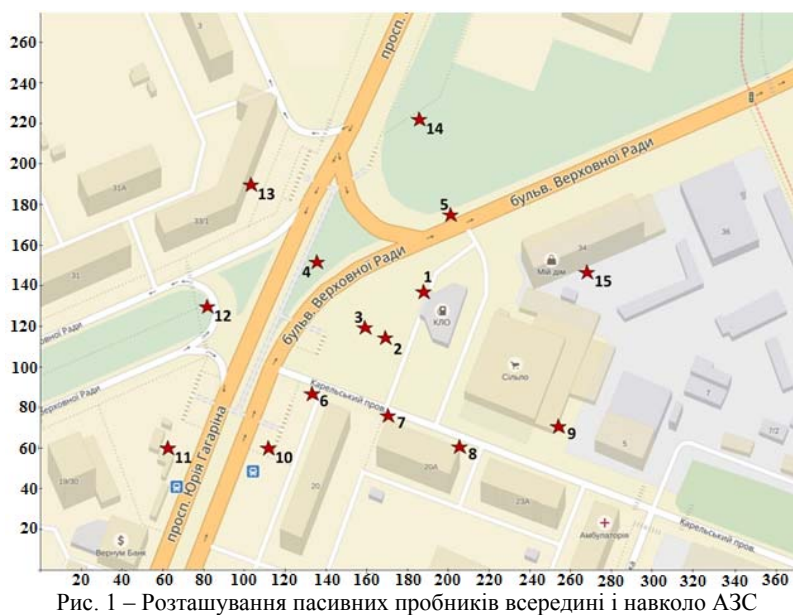


Рис. 1 – Розташування пасивних пробників всередині і навколо АЗС

★ – пробовідбірники.

Аналіз і розрахунки концентрацій. Леткі органічні сполуки: бензол, н-гексан і циклогексан, були вибрані для аналізу протягом двох різних операцій з понеділка по п'ятницю, так як вони є репрезентативними для ароматичних з'єднань, парафінів і ациклічних вуглеводнів, відповідно. Для проведення десорбції вуглеводнів з активованого вугілля пасивного пробовідбірника використовували сірковуглець. Для кількісної оцінки використовувалася газовий хроматограф HP 6890 з полум'яно-іонізаційним детектором і каплярною колонкою DB-5 (довжиною 50м, внутрішнім діаметром 0,32 мм, товщина шару фази 1 мкм). Температура в печі була запрограмована від 50°C (0 хв) при 10°C/хв до 80°C (10 хв) і на 10°C/хв до 200°C (10 хв). Форсунка і детектор мали температуру 250 і 350°C відповідно, швидкість потоку газу-носія (N₂) становила 40 мл/хв. Після того, як маса m_i , кожного вуглеводню була відома, розраховувалась концентрація C_i , використовуючи наступне рівняння:

$$C_i = m_s / (SR_i \cdot t), \quad (1)$$

де SR_i - частота відбору проби дифузійного пробовідбірника Radiello для i -го компоненту ($8,0 \cdot 10^{-5}$ м³/хв для бензолу, $6,6 \cdot 10^{-5}$ м³/хв для н-гексан і $5,4 \cdot 10^{-5}$ м³/хв

для циклогексана) отримано згідно з [10]; t – час експозиції.

Обробка даних. По-перше, були виконані лінійні кореляції між різними вимірами вуглеводнів в кожній операції. Ми використовували регресивний аналіз, щоб отримати рівняння регресії і коефіцієнти Пірсона. Було виділено два види типових точок; точки, які були нетиповими для всіх забруднюючих речовин (поведінка, яка спостерігалася тільки в одній операції) були упущені, тому що вони були, ймовірно, викликані аналітичними помилками. А точки, які були нетиповими тільки для одного або деяких з забруднюючих речовин, або які показали нетипову поведінку більше ніж в одній операції не були видалені, так як могли бути викликані іншими джерелами впливу, крім інтенсивності руху автомобілів. Відсоток видалених точок в міській вибірці склав близько 5%, в той час як інші дані, що отримані поблизу автозаправної станції не були виключені. Після цього використовувалася статичний аналіз для визначення розподілу концентрацій забруднюючих речовин. Ці концентрації показали логнормальний розподіл, при цьому розподіл концентрацій забруднюючих речовин відповідає нормальному розподілу з довірчою імовірністю 95%.

З порівняння вимірювань в місті і на заправній станції, були визначений метод оцінки впливу автозаправних станцій на їх околиці. Метод був оснований на тому факті, що вплив певних летких органічних сполук відрізняється в загальному атмосферному повітрі міста від повітря автозаправних станцій. Для кожної пари співвідношень концентрацій вуглеводнів, були розраховані наступні параметри: МІСТО (N), визначається як середнє значення в міській зоні N коефіцієнтів (105), отриманих для кожної пари забруднюючих речовин, і АЗС (3), визначається як середнє значення з 3-х коефіцієнтів, отриманих для кожної пари забруднюючих речовин в межах автозаправної станції. Наприклад, МІСТО (N) і АЗС (3) для бензолу і н-гексану, були обчислені з рівняннями (2) і (3), відповідно.

$$(Benz / nHex)_{URB(N)} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} (Benz / nHex)}{N} \quad (2)$$

$$(Benz / nHex)_{PS(3)} = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} (Benz / nHex)}{3} \quad (3)$$

При цьому відносна різниця D, між значеннями отриманими для кожного середнього співвідношення забруднюючих речовин, в міській місцевості і на заправній станції, розраховували, взявши більш низьке значення кожної пари, яке збігалось зі значенням в міській місцевості, рівняння (4).

$$D = \frac{[(Benz / nHex)_{PS(3)} - (Benz / nHex)_{URB(N)}]}{(Benz / nHex)_{URB(N)}} \times 100 \quad (4)$$

Наступним кроком було намалювати криві концентрацій двох вуглеводнів з найбільшою відносною різницею в співвідношеннях, що викидається за автозаправної станції за допомогою програмного забезпечення SURFER 12.0. В якості вхідних даних використовувались концентрації пасивних пробовідбірників, розташованих в середині (3 точки) та навколо автозаправної станції (12 точок). Ці графіки дозволяють отримати значення концентрації забруднюючих речовин на різних відстанях від автозаправної станції в кожному напрямку (Пн, Пд, Зх, Сх).

Результати дослідження. Метеорологічні дані.

Середня температура в кожній операції становить 24°C і 20,6°C відповідно. Середнє значення швидкості вітру становить 2,0 м/с, в той час як в другій операції швидкість становило 1,5 м/с. Під час обох операцій, спостерігалась аналогічна швидкість вітру. Напрямок вітру був західний, північно-західний, впродовж 30% і 40% часу першої і другої операції, відповідно. Коли швидкість вітру була <3 м/с ніякого переважаючого напрямку не було показано.

Дані концентрацій в місті. Статистичний аналіз поширення концентрацій, критеріями Колмогорова-Смірнова показав, що просторові концентрації в районі автозаправної станції і міста можуть бути придатні до логарифмічно нормальних розподілів для рівня значень 0,05. Співвідношення концентрацій також перевірили на критерій нормальності з тим же рівнем значення. Середні значення концентрації логарифмів

для н-гексану, бензолу і циклогексану (і їх стандартні відхилення в дужках) були 0,583 (0,178), 0,517 (0,194) і 0,492 (0,191) для першої пробної операції і 0,548 (0,183), 0,494 (0,202) і 0,554 (0,209) для другої відповідно. Дисперсний аналіз показав, що в результатах, які отримані для міської зони із самого початку до другої операції, в 95 % рівнях довіри не було ніяких істотних статистичних відмінностей. Знайдений результат мав дуже хорошу лінійну кореляцію ($R^2 > 0,9$) між різними парами забруднювачів в місті.

Беручи бензол як еталон, отримані коефіцієнти кореляції Пірсона, для н-гексану і циклогексану відносно бензолу, склали 0,946 і 0,954, відповідно, для першої операції, і 0,970 і 0,928, для другої операції (після усунення незвичайних спостережень, близько 5 %).

На рис. 2, суцільними лініями зображено співвідношення між н-гексаном і бензолом в місті для двох операцій. З рис. 2, можна зробити висновок:

1. Концентрації бензолу і н-гексану в Києві (далеко від інших джерел, таких як заправні станції), надходять в основному від транспортних засобів, так як існує чітка лінійна тенденція, показана суцільними лініями на рис. 2. Будь-яка точка, що знаходиться за межами цієї тенденції, є показником іншого джерела забруднення, крім автотранспорту. В нашому випадку, це концентрації, що виміряні всередині автозаправної станції (зображено пунктирними лініями).

2. Розрахунок невизначеності нахилів суцільних ліній (рис. 2) показали, що знайдені в них невеликі відмінності, знаходяться всередині змін нахилів для довірчого інтервалу 95 %. Проте, значні відмінності між операціями полягають в тому, що склад бензину і дизельного палива не є постійним протягом тривалого часу. Погодні умови, щільність руху та забудова місцевості не впливають на співвідношення, але істотно впливають на зміни концентрації обох сполук в повітрі. Тобто чим інтенсивніший транспортний рух, тим вища буде концентрація н-гексану та бензолу, однак співвідношення, як видно на рис. 2 залишиться сталим.

3. Беручи до уваги два попередні пункти, повітря в місті Києві в інших подібних по структурі викидів містах, може бути визначено за допомогою прямих ліній, які пов'язують концентрації органічних сполук, що викидаються автотранспортом. Але за умови, що відсутності інші важливі джерела викидів, крім автотранспорту.

Розрахунок впливу автозаправних станцій.

Концентрації н-гексану та бензолу були виміряні навколо автозаправної станції і занесена в табл. 1. №1-№15 номера дифузійних пробовідбірників. №1-№3 були розташовані всередині АЗС, а решта зовні, як описано в розділі «Відбір проб». Більш високі концентрації в №1-№3, що отримані під час першої операції, можливо були спричинені більш високою температурою навколишнього середовища. Хоча вони також можуть бути більшими через більшу активність на АЗС автомобільних засобів, але на жаль, ми не маємо ніякої інформації відносно кількості проданого бензину і дизельного палива впродовж пробовідбірних операцій.

Як видно з табл. 1, найбільш низькі концентрації знаходяться в напрямку сходу. Для цього є кілька причин. По-перше ніякі значні антропогенні викиди

не присутні в цьому напрямку, тоді як в інших напрямках значний вплив становлять автомобільні дороги. Наявність будівель також ускладнює розсіювання шкідливих речовин, що спричиняє більш високі концентрації між ними і автозаправними станціями. Вітер, що дме з північного-сходу, має більш сильніший вплив на рівень забруднюючих речовин від автозаправної станції в південно-західному напрямку.

Це можна перевірити на рис. 2, звідки видно, що концентрація н-гексану і бензолу, що виміряна на АЗС (точки №1-№3) має іншу поведінку (пунктирна лінія), відмінну від значень концентрацій виміряних у місті (суцільна лінія), на різних відстанях.

На рис. 2, точка №1 відсутня через високу концентрацією, але її було прийнято до уваги в лінійній регресії. Ці високі концентрації були, ймовірно, через близьке розташування пробовідбірника до джерела викиду (резервуари, колонки), разом з, можливо, більш високою кількістю бензину/дизельного пального, що продавалось під час цієї операції при більш високих температурах.

Виходячи з вище згаданого, можна зробити висновки про те, що повітря на АЗС не має такої ж пропорції летких органічних сполук як повітря в місті. Ймовірно є область, що близька до заправної станції, де концентрація летких органічних сполук змінюється під впливом руху автомобілів. Чим далі віддалятися від цієї площі, концентрація ЛОС становиться ближчою до значень знайдених в повітрі міста загалом.

Відповідно методу, що описана в розділі «**Обробка даних**», кращою парою забруднювачів в двох операціях є н-гексан і бензол, оскільки їх співвідношення мало найвищу відносну різницю між АЗС і іншими частинами міста. Відмінності для кожної операції показано в табл. 2.

У обох випадках, найвищі відхилення були отримані, порівнюючи н-гексан (неароматичний вуглеводень) з бензолом (ароматичний) в той час як аромати-

чні-ароматичні порівняння, показали більш низькі відхилення.

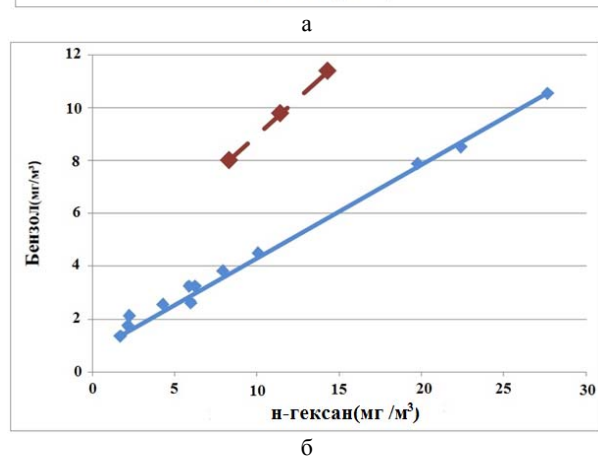
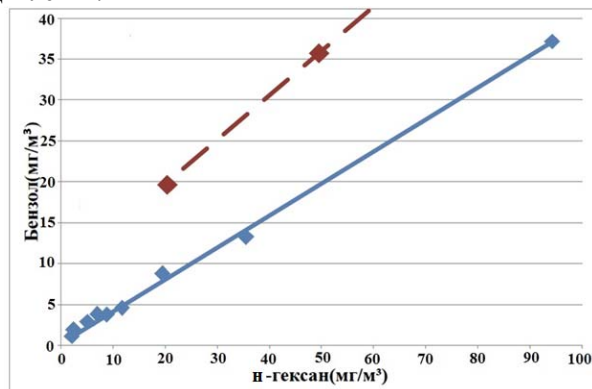


Рис. 2 – Відношення концентрацій н-гексану до бензолу в місті (суцільні лінії) і на АЗС (пунктирні лінії): а – перша операція відбору, б – друга операція відбору

Пробовідбірники №1–3 були розміщені всередині АЗС. Пробовідбірники №4–15 розміщувались в межах максимальної радіальної відстані 100 м. Їх орієнтація по відношенню до автозаправної станції також вказується.

Таблиця 1 – Виміряні концентрації (мг/м³) н-гексану, бензолу і циклогексану навколо заправної станції

Номер пробовідбірника	Орієнтація на місцевості	1-а операція			2-а операція		
		н-гексан	бензол	цикло-гексан	н-гексан	бензол	цикло-гексан
1	Центр	13,5	5,34	13,2	20,7	8,02	15,1
2	Центр	41,6	15,6	34,1	23,5	7,14	16,2
3	Центр	99,1	39,4	100,3	28,4	11,7	25,2
4	Північ	20,4	9,73	24,1	10,3	6,19	7,23
5	Північ	9,13	5,26	9,24	8,52	4,84	4,86
6	Південь	5,36	2,34	3,21	3,03	2,42	3,21
7	Південний захід	3,45	2,76	3,91	3,21	3,08	2,31
8	Південний схід	3,57	2,79	2,35	2,77	1,46	2,03
9	Південний схід	2,13	2,17	2,64	1,41	1,38	1,59
10	Південь	2,17	2,04	4,25	3,12	3,21	3,14
11	Південний схід	7,25	7,15	5,36	7,12	3,12	6,13
12	Захід	7,11	4,45	7,63	5,43	3,85	5,51
13	Північний захід	5,13	5,72	6,31	4,41	4,52	4,15
14	Північ	5,21	5,35	6,19	6,13	5,28	4,14
15	Північний схід	2,15	2,41	5,41	2,55	1,47	2,62

Криві розподілу обраних забруднюючих речовин (н-гексан і бензол) для кожної операції були отримані за допомогою SURFER 12.0, при виборі «multiquadric» інтерполяції (рис. 3 і 4 відповідно), ви-

користовуючи в якості вхідних даних концентраційні з 15 пасивних пробовідбірників, що розміщувались всередині і поблизу заправної станції (рис. 1).

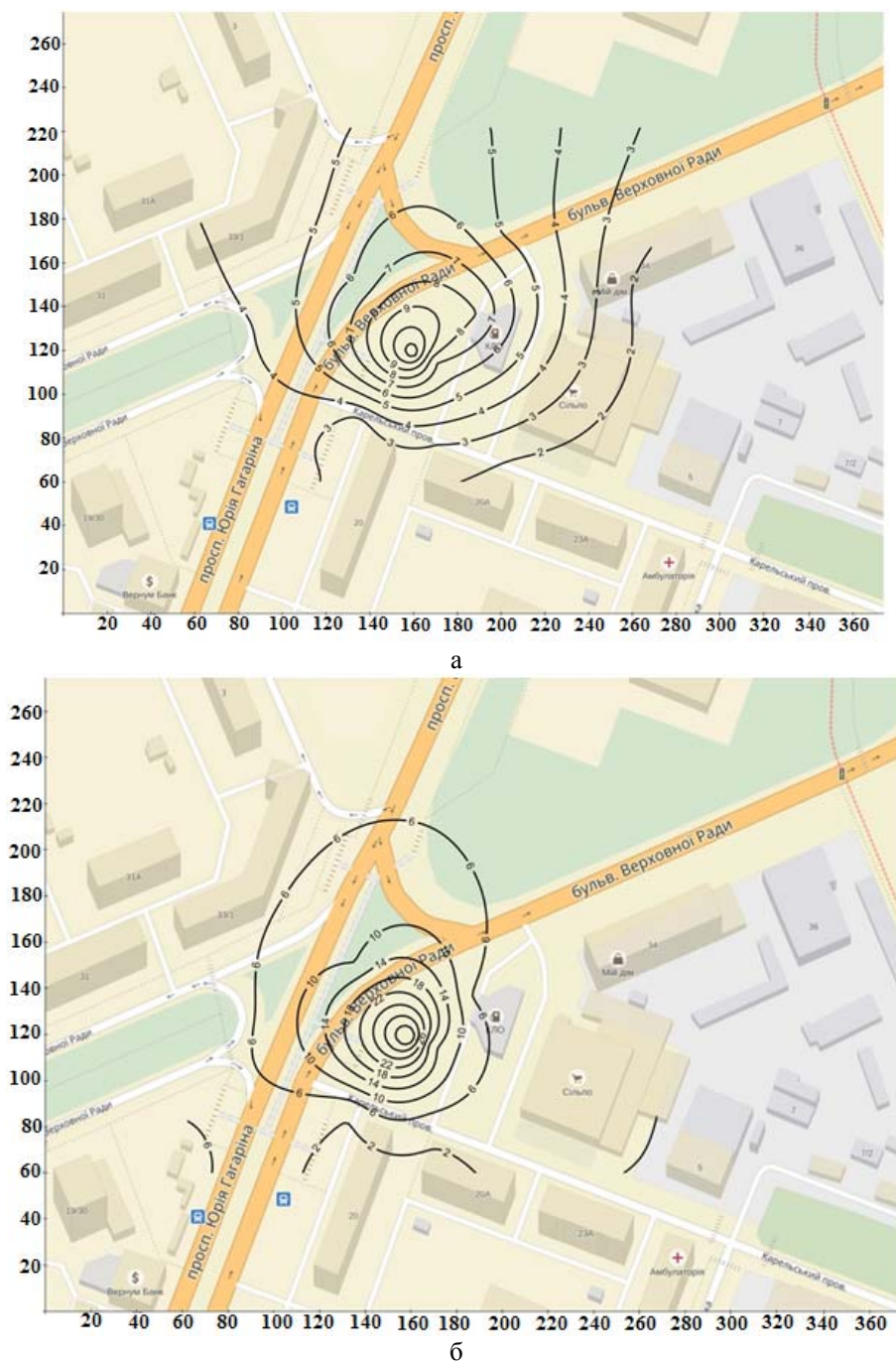


Рис. 3 – Карта кривих розподілу концентрацій $\text{мг}/\text{м}^3$ в першій операції відбору: а – бензолу, і б – н-гексан

За допомогою вузла сітки із згаданого вище програмного забезпечення, були отримані концентрації обраних сполук на різних відстанях від центру автозаправної станції, в кожному географічному напрямку.

Співвідношення між н-гексаном і бензолом та різних відстанях від АЗС для кожної операції представлено на рис. 5. Горизонтальна суцільна лінія являє собою середнє співвідношення н-гексану і бензолу в міському повітрі під час першої операції. 95 % довірчий інтервал цього середнього значення показано пунктирними лініями.

Як показано на рис. 5, чим більше ми віддаляємось від АЗС, відношення концентрацій стає ближчим до значень міського повітря, яке характеризується в основному викидами з транспортних засобів. Виходячи з рис. 5, вплив автозаправної станції в кожного

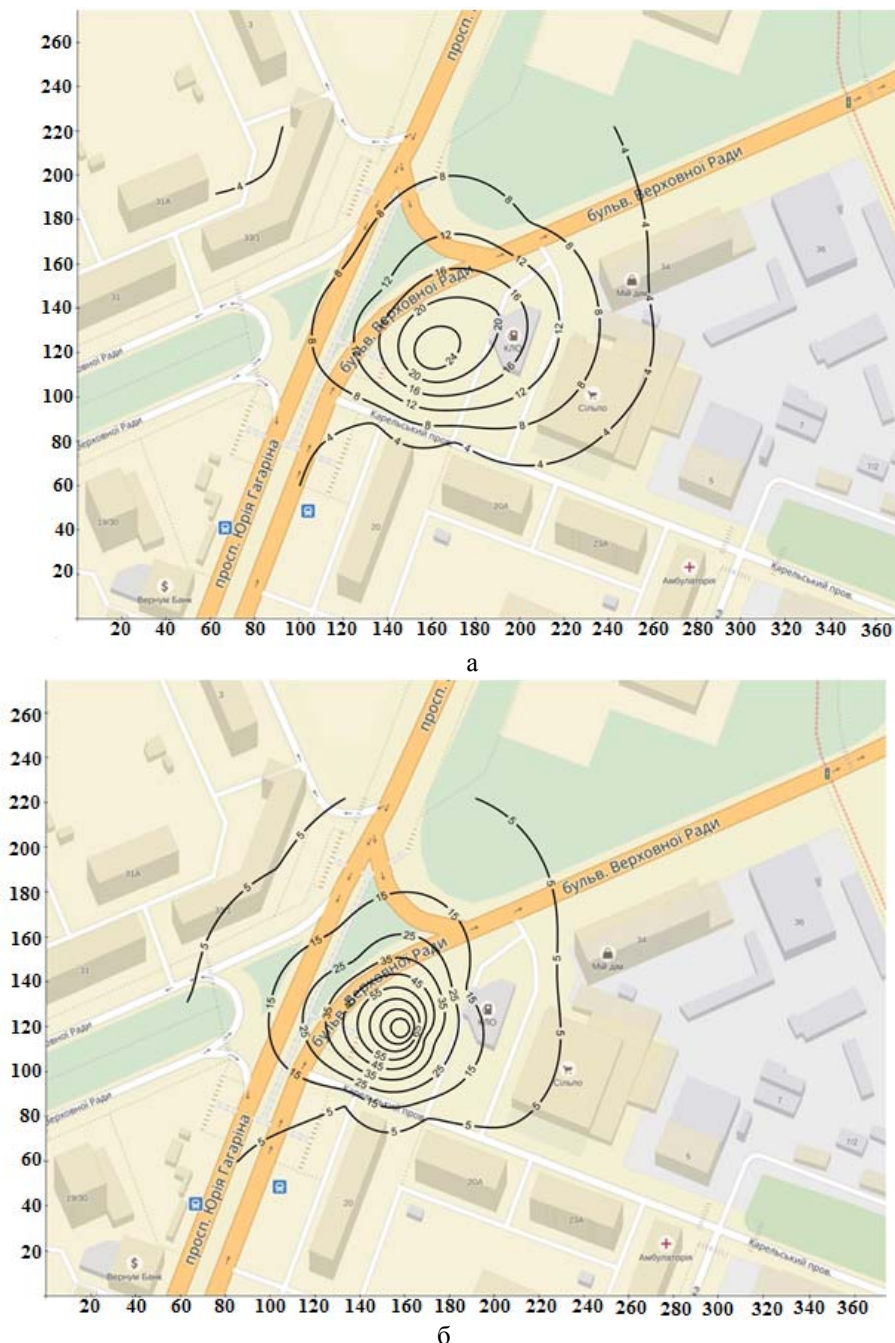
напрямку може бути визначена як точка де відношення н-гексану і бензолу потрапляє в область 95% довірчого інтервалу середнього співвідношення міського повітря. У табл. 3 наведені відстані, отримані в обох операціях.

Порівняння відстаней, отриманих в обох операціях показує більший вплив АЗС в другій операції, ймовірно через більш високу температуру, що була зареєстрована при цьому. Вихлопні гази автомобілів і автотранспортних засобів являє собою основне джерело інтенсивних викидів летких органічних сполук на дорозі.

Висока температура сприяє збільшенню випаровувань від АЗС, проте відстань впливу АЗС в обох операціях були однаковими, і становили нижче або дорівнювала 75 м.

Таблиця 2 – Середні коефіцієнти концентрації в місті МІСТО (N) на АЗС «КЛО», АЗС (3) і відносних різниць D_2 для двох операцій відбору

МІСТО (N)	1-а операція			2-а операція		
	н-гексан/бензол	н-гексан	бензол	н-гексан/бензол	н-гексан	бензол
АЗС (3)	2,63	1,06	2,49	2,59	1,34	1,93
$D_2\%$	139	10,4	118	123	8,94	103

Рис. 4 – Карта кривих розподілу концентрацій mg/m^3 в другій операції відбору: а – бензолу, б – н-гексану

Варто також зазначити, що в обох операціях відбору проб, більшому піддалися впливу температури Пн. та Сх. напрямки, в той час як меншого впливу зазнав Зх. напрямок. Це можна пояснити наступним чином: АЗС знаходиться в межах міського периметра. Дорожній рух розділяє область на дві частини: перший зі значно високим рівнем руху (західна половина), і другий значною мірою незаселений (східна половина).

Чим вище інтенсивність руху транспорту поблизу автозаправної станції, тим вище концентрація забруднюючих речовин і транспорту тому співвідношення будь-яких парів ароматичних і парафінових вуглеводнів будуть перевищувати в районі руху транспорту ніж на АЗС. Крім того наявність будівель в західному напрямку діє як бар'єр від забруднюючих речовин, що надходять з заправної станції і головної дороги.

Це означає, що відстані між будівлями і автозаправною станцією будуть піддаватися максимальному впливу, але якщо відходити далі концентрації будуть ставати ближчими до міського фону. Ці результати підкреслюють той факт, що вплив автозаправних станцій залежить від характеристики околиці, в основному щільність руху транспорту. Проте, спеціальне розташування АЗС, що досліджувалось, довело, що

дія АЗС малих і середніх розмірів буде, приблизно в межах радіуса 100 м.

Проте, було б доцільно застосовувати цю методику, щоб з більшою точністю встановити вплив автозаправних станцій на їх навколишнє середовище для того, щоб здійснювати більш ефективне управління земельними ресурсами.

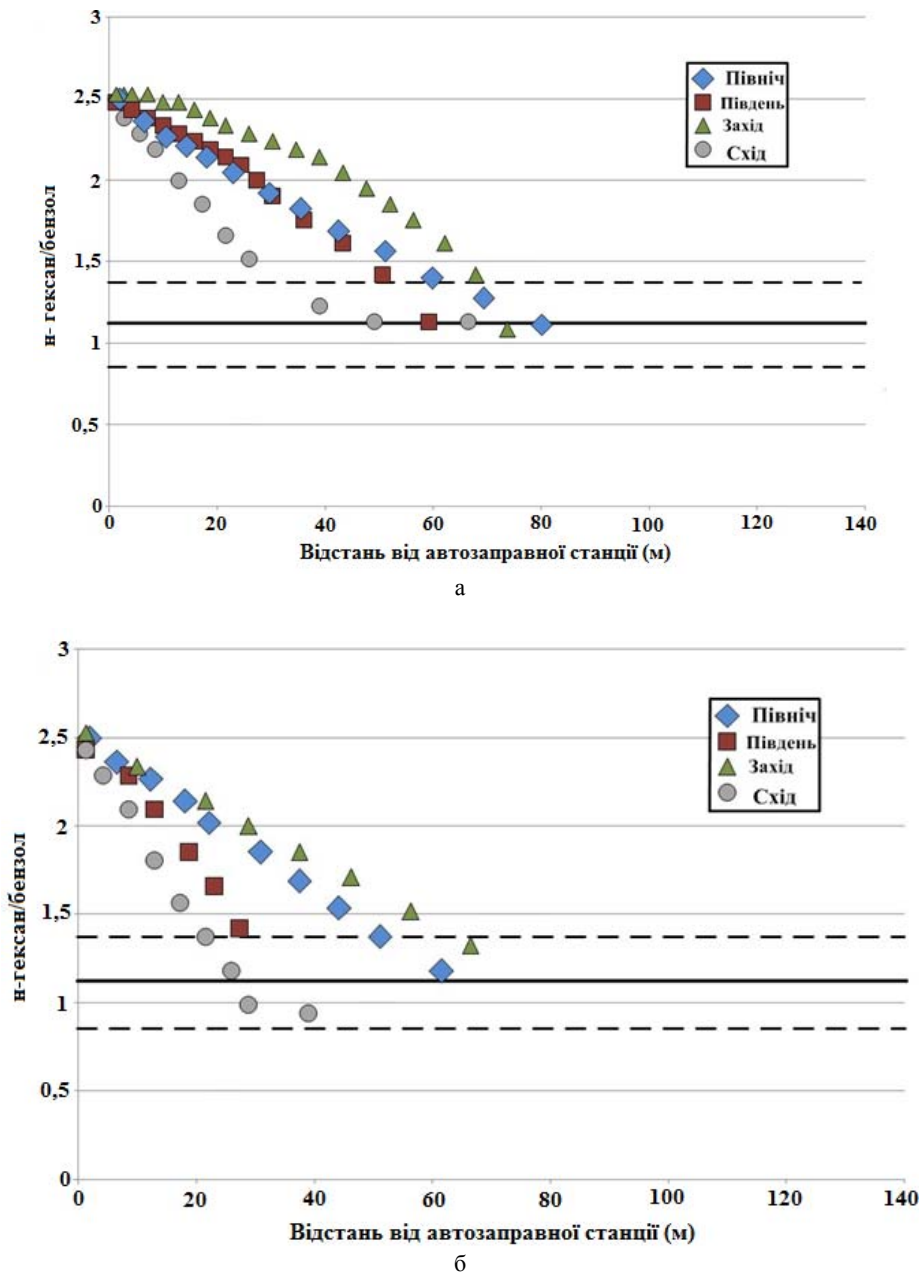


Рис. 5 – Залежність відношення н-гексан і бензолу на різних відстанях від автозаправної станції: а – перша операція відбору, б – друга операція відбору

Таблиця 3 – Максимальні відстані просторового впливу АЗС «КЛЮ» за дві операції відбору

Напрямок	1-а операція	2-а операція
Північ	80	65
Південь	59	25
Схід	65	40
Захід	39	25
Середній	60	38

Хочеться зауважити, що потрібно прагнути уникати впливу будь-якого основного типу джерела забруднення на населення. Як було показано вище, в напрямку Зх., вплив АЗС було нижчим, тому що інше джерело забруднення мало більший шкідливий вплив на населення ніж АЗС. Зменшення концентрацій шкідливих хімічних речовин, незалежно від їх джерел, є необхідною умовою для ефективної охорони здоров'я.

Висновки. В даній роботі представлена методика для визначення просторового впливу автозаправних станцій на їх оточення, заснований на тому, що співвідношення концентрації н-гексану і бензолу в повітрі АЗС (в основному визначається викидами бензину з резервуарів та паливо заправних пістолетів) відрізняється від знайденого в міському повітрі (в основному визначається автотранспортних вихлопних газів автомобілів).

В обох операціях, було відмічено зниження впливу АЗС в напрямках де спостерігався високий рівень руху автотранспорту (Зх і Пн), в той час як напрямком Сх, без доріг, показав більш високий вплив. Це можна пояснити наступним чином: коли АЗС знаходиться в оточенні доріг з інтенсивним рухом, викиди від автозаправної станції не так важливі, як викиди, що надходять від транспортних засобів. Якщо викиди заправних станцій змішуються з відносно чистим повітрям, співвідношення концентрацій н-гексану і бензолу від цих станцій змінюється повільніше. Виходячи з цих результатів, можна зробити висновок, що автозаправні станції впливають на рівень забруднюючих речовин, але їх вплив не перевищує відстані більше, ніж 75 м.

Імовірно, малі і середні АЗС матимуть аналогічне вплив на їх оточення, як і АЗС, що розглянута в даній роботі. Проте, рекомендується, щоб ця методика застосовується для визначення їх впливу з більшою точністю. Ця методика допоможе створити «пояс» навколо заправних станцій, де буде обмежено вплив на населення, школи і лікарні. Нарешті, ми повинні пам'ятати, що мінімізація концентрації забруднюючих речовин, незалежно від їх джерел, є необхідною умовою для ефективної охорони здоров'я. Для цієї мети, повинні бути застосовані або розроблені аналогічні або інші методики для оцінки просторових меж впливу джерел забруднення.

Список літератури:

1. Франчук, Г. М. Аналіз даних про токсичність паливно-мастильних матеріалів для людини [Текст] / Г. М. Франчук, М. М. Николая // Вісник Національного Авіаційного Університету. – 2007. – Т. 33, № 3-4. – С. 117–120.
2. Протокол об ограничении выбросов летучих органических соединений или их трансграничных потоков к конвенции 1979 года о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/airpoll.pdf
3. Івасенко, В. М. Розрахункова модель випаровувань автозаправних станцій [Текст] / В. М. Івасенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2014. – № 40 (1083). – С. 59–66.

4. Івасенко, В. М. Особливості інвентаризації і виміру викидів АЗС [Текст]: XI Міжн. наук.-тех. конф. / В. М. Івасенко, В. П. Приміський // Приладобудування: стан і перспективи. – Київ, 2012. – С. 142–143.
5. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17 вересня 2014 р. № 847-р «Про імplementацію Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/847-2014-%D1%80>
6. Директива 2008/50/ЕС Європейського Парламенту і Ради від 21.05.2008 р. про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/994_950
7. Красногорская, Н. Н. Оценка экологической опасности «больших дыханий» резервуаров автозаправочных станций крупного города [Текст] / Н. Н. Красногорская и др. // Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – № 6. – С. 34–38.
8. Соколова, Е. В. К оценке экологической опасности выбросов автозаправочных станций (АЗС) для воздушного бассейна городских комплексов [Текст] / Е. В. Соколова // Вестник северо-кавказского федерального университета. – 2012. – № 1 (30). – С. 64–68.
9. Соколова, Е. В. Оценка факторов воздействия выбросов АЗС на воздушную среду их рабочей зоны и прилегающей территории [Текст] / Е. В. Соколова и др. // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2011. – № 25 (44). – С. 392–397.
10. Radiello RAD120 Diffusive Bodie [Electronic resource]. – Available at: <http://www.radiello.com>

Bibliography (transliterated):

1. Franchuk, H. M. Nykoliak M. M. (2007). Analiz danykh pro toksychnist palyvno-mastylnykh materialiv dlia liudyny. Visnyk Natsionalnoho Aviatsiinoho Universytetu 33 (3-4), 117–120.
2. Protokol ob ogranitenii vybrosov letuchih organicheskikh soedinenij ili ih transgranichnih potokov k konvencii 1979 goda o transgranichnom zagrjaznenii vozduha na bol'shie rasstojanija. Available at: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/airpoll.pdf
3. Ivashenko, V. M. (2014). Rozrakhunkova model vyparovuvan avtozapravnykh stantsii. Visnyk NTU «KHP». Seriya: Mekhaniko-tehnolohichni systemy ta komplekxy, 40 (1083), 59–66.
4. Ivashenko, V. M., Prymskyi, V. P. (2012). Osoblyvosti inventaryzatsii i vymiru vykydiv AZS. Pryladobuduvannia: stan i perspektyvy, Kyiv, 142–143.
5. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 17 veresnia 2014 r. № 847-r «Pro implementatsiiu Uhody pro asotsiatsiiu mizh Ukrainoiu, z odniiei storony, ta Yevropeiskym Soiuzom, Yevropeiskym Spivtovarystvom z atomnoi enerhii i yikhnyimi derzhavamy-chlenamy, z inshoi storony». Available at: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/847-2014-%D1%80>
6. Dyrektyva 2008/50/EC Yevropeiskoho Parla- mentu i Rady vid 21.05.2008 r. pro yakist atmosferneho povi- tria ta chystishe povitria dlia Yevropy. Available at: http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/994_950
7. Krasnogorskaja, N. N. et al. (2009). Ocenka jekologicheskoy opasnosti «bol'shikh dyhaniy» rezervuarov avtozapravochnykh stancij krupnogo goroda. Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti, 6, 34–38.
8. Sokolova, E. V. (2012). K ocenke jekologicheskoy opasnosti vybrosov avtozapravochnykh stancij (AZS) dlja vozdushnogo bassejna gorodskih kompleksov. Vestnik severo-kavkazskogo federal'nogo universiteta, 1 (30), 64–68.
9. Sokolova, E. V. (2011). Ocenka faktorov vozdejstvija vybrosov AZS na vozdushnuju sredu ih rabochej zony i priliegajushhej territorii. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturm- stroitel'nogo universiteta. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura, 25 (44), 392–397.
10. Radiello RAD120 Diffusive Bodie. Available at: <http://www.radiello.com>

Надійшла (received) 11.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оцінка впливу автозаправних станцій на навколишнє середовище/ В. М. Івасенко, Т. О. Винниченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 123–131. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Оценка влияния автозаправочных станций на окружающую среду/ В. М. Ивасенко, Т. О. Винниченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С.123–131. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Evaluation of petrol stations on the environment/ V. Ivashenko , T. Vynnychenko //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 123–131. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Івасенко Віталій Михайлович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», асистент кафедри "Наукових аналітичних та екологічних приладів та систем"; пр. Перемоги 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: ivashenko-vitaliy@ukr.net.

Винниченко Тетяна Олександрівна – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедра "Наукових аналітичних та екологічних приладів та систем", пр. Перемоги 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: tania.vinnichenko26@gmail.com.

Івасенко Віталій Михайлович – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», ассистент кафедры "Научных аналитических и экологических приборов и систем"; пр. Победы 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: ivashenko-vitaliy@ukr.net.

Винниченко Татьяна Александровна – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», кафедра "Научных аналитических и экологических приборов и систем", пр. Победы 37, г. Киев, Украина, 03056, e-mail: tania.vinnichenko26@gmail.com.

Ivashenko Vitaliy – PhD, Assistant, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Department of Environmental Analytical Instruments and Systems, ave. Peremogy, 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: ivashenko-vitaliy@ukr.net.

Vynnychenko Tetiana – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Department of Environmental Analytical Instruments and Systems; ave. Peremogy, 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: tania.vinnichenko26@gmail.com.

УДК 631.371

И. И. БОРОДАЙ

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛОДАХ ФРУКТОВ

Рассмотрена возможность замедления процессов дыхания растительных клеток с помощью высокочастотного электромагнитного излучения. Для замедления процессов дыхания и увеличения сроков хранения плодовоовощной продукции был рассмотрен процесс переноса ионов и протонов через мембрану клетки. Полученное выражение для плотности тока через мембрану клетки позволило определить частоту электромагнитного излучения и наведенный потенциал на мембране, которые приводят к блокировке дыхания плодов в процессе их длительного хранения.

Ключевые слова: мембрана, движение ионов, электромагнитное поле, блокировка дыхания плодов.

Розглянуто можливість уповільнення процесів дихання рослинних клітин за допомогою високочастотного електромагнітного випромінювання. Для уповільнення процесів дихання і збільшення термінів зберігання плодовоовочевої продукції було розглянуто процес перенесення іонів і протонів через мембрану клітини. Отриманий вираз для щільності струму через мембрану клітини дозволив визначити частоту електромагнітного випромінювання і наведений потенціал на мембрані, які призводять до блокування дихання плодів в процесі їх тривалого зберігання.

Ключові слова: мембрана, рух іонів, електромагнітне поле, блокування дихання плодів.

Subject of this article is the possibility of slowing the respiration of plant cells by high-frequency electromagnetic radiation. To achieve that, studies were focused on the ions and protons transfer through the cell membrane. The obtained equation for the current density through the cell membrane has made it possible to calculate the frequency of electromagnetic radiation and the induced potential on the membrane, which lead to the blocking of the respiration of the fruits during their long-term storage.

Keywords: membrane, movement of ions, electromagnetic field, blocking of respiration of fruits.

© И. И. Бородай. 2017

Введение. Одним из важных вопросов обеспечения населения высококачественными продуктами питания является организация длительного хранения фруктов и овощей. Одна из основных причин снижения качества и развития многих заболеваний плодов и овощей при хранении - избыточное накопление этилена. Этилен синтезируется плодами, активизирует их созревание. Накопление этилена в камерах с регулируемой атмосферой оказывает влияние на отдельные процессы обмена веществ, повышая активность некоторых ферментов углеводного, жирового и белкового обменов, увеличивает интенсивность дыхания, вызывает развитие разного рода болезней фруктов [1].

Значительная доля потерь плодов (до 40 %) в период хранения приходится на поражение их физиологическими расстройствами и болезнями [2].

Длительное хранение плодовоовощной продукции возможно в результате эффективного ингибирования синтеза этилена и его биологического действия [1].

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Длительное хранение плодовоовощной продукции можно достигнуть за счет замедления окислительного распада органических веществ и образования химически активных метаболитов. Дело в том, что данный процесс сопровождается освобождением энергии, которая используется клетками для процессов жизнедеятельности. Присоединение кислорода к субстрату приводит к медленно текущему горению питательных веществ в живом организме и, соответственно, снижению качества овощей и фруктов в процессе их хранения. Очевидно, что решение данной задачи лежит в плоскости контроля механизма дыхания [3]. Данная цель может быть достигнута с помощью замедления транспорта ионов и протонов через мембрану растительной клетки. Обычно данная задача решается с помощью создания соответствующего температурного режима в хранилище либо с помощью использования в нем смеси нейтральных газов, тормозящих данный процесс, либо одновременного применения того и другого [4].

Однако заслуживает интереса принципиально другой способ решения данной задачи. Создание соответствующих электрических полей может противодействовать указанному транспорту вплоть до закрытия каналов, по которым этот транспорт осуществляется. Очевидно, что замедление процесса дыхания, а, следовательно, увеличение срока хранения фруктов может быть достигнуто за счет изменения проницаемости мембран клетки. Этого можно достигнуть, уменьшая величину тока наружу и внутрь клетки, чему может способствовать именно высокочастотное электромагнитное воздействие на плодовоовощную продукцию [5, 6].

Влияние внешних электромагнитных полей на процессы жизнедеятельности растений объясняется тем, что основной электрической характеристикой растительной клетки является ее мембранный потенциал, который соответствует состоянию клетки во время физиологического покоя, когда обмен веществ находится в равновесном состоянии [7]. Живые структуры всегда имеют отрицательный заряд по отношению к окружающей среде. Мембранный потен-

циал определяет все типы электрической активности живых организмов, в том числе и процесс дыхания и обмена веществ [8].

Интенсивность дыхания и, следовательно, длительность сохранности фруктов зависит от того, насколько активно происходит перенос ионов и протонов через мембрану клетки. Возможность регуляции этого переноса, а именно его торможение, должно привести к большим срокам хранения фруктов без существенной потери их свойств [5].

На обширном фоне исследований по воздействию электрических и электромагнитных полей с различными характеристиками на биологические мембраны практически неизвестны данные о воздействии электромагнитных полей на биологические клетки с целью не ускорения, а замедления протекающих в них процессов, в том числе и их дыхания [7, 8]. В связи с чем, проведение исследований по данному вопросу является актуальной задачей.

Объект, цель и задачи исследования. *Объект исследования.* Процесс влияния высокочастотных электромагнитных излучений на дыхание фруктоплодов в процессе их длительного хранения.

Целью работы является определение частоты электромагнитного излучения и величины наведенного потенциала на мембране клеток плодов яблонь для ингибирования синтеза этилена в процессе их длительного хранения.

Для достижения поставленной цели необходимо было выполнить следующие задачи:

1. Рассмотреть процесс переноса ионов и протонов через мембрану клетки и получить выражение для плотности тока.
2. Определить частоту электромагнитного излучения и наведенный потенциал на мембране клетки для блокировки дыхания плодов.

Теоретический анализ влияния высокочастотного излучения на плотность тока через мембрану клетки. Будем рассматривать клетку в виде сферы, имеющей диэлектрическую оболочку. Частотно-зависимая составляющая индуцируемого дипольного момента для такой сферической частицы записывается в виде [5]:

$$D = \frac{\omega^2 \varepsilon_m^2 \varepsilon_0^2 A_1 + j \omega \varepsilon_m \varepsilon_0 B_1 + C_1}{\omega^2 \varepsilon_m^2 \varepsilon_0^2 A_2 + j \omega \varepsilon_m \varepsilon_0 B_2 + C_2}, \quad (1)$$

где ε_m – относительная диэлектрическая проницаемость мембраны клетки; ε_0 – диэлектрическая постоянная; j – мнимая единица; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота. Параметры A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 и C_2 определяются независимыми от частоты значениями проводимости и диэлектрической проницаемости наружной и внутренней сред и разделяющей оболочки.

Из анализа выражения (1) следует, что в случае воздействия низкочастотного поля мембрана представляет собой хороший изолятор, и ток идет в обход клетки по проводящей среде. Индуцированные заряды увеличивают напряженность поля внутри частицы. Такое распределение индуцированных зарядов соответствует антипараллельной ориентации дипольного

момента частицы относительно внешнего поля. При воздействии высокочастотного поля проводимость мембраны высока; и так как электропроводность внутриклеточной среды выше электропроводности бессолевого внеклеточной среды, ток протекает преимущественно через клетку. В этих условиях распределение индуцированных зарядов на поверхности частиц соответствует параллельной ориентации дипольного момента по отношению к внешнему полю.

Очевидно, что замедление процесса дыхания, а, следовательно, увеличение срока хранения фруктов может быть достигнуто за счет уменьшения проницаемости мембран митохондрий. Это можно получить, уменьшая величину тока внутри клетки, который присутствует именно при высокочастотном электромагнитном воздействии на плод.

Для простоты рассматривалась клетка в виде объекта, имеющего сферическую форму. Предполагалось, что среда, заполняющая внутреннюю часть клетки, характеризуется диэлектрической и магнитной проницаемостями ε и μ , которые, при наличии неоднородности, могут являться функциями радиуса сферы. Внешнее по отношению к рассеивателю пространство предполагается однородным. Оно характеризуется постоянными электромагнитными проницаемостями ε_1 и μ_1 .

Найдены компоненты электрической составляющей поля внутри клетки, поскольку именно она влияет на процесс движения ионов через мембрану:

$$E_r = 3\sqrt{\frac{\pi}{2}}E_0 b_1 \frac{J_{\frac{3}{2}}(kr)}{(kr)^{\frac{3}{2}}} \sin\theta \cos\phi; \quad (2)$$

$$E_\phi = -j\frac{3}{2}E_0\sqrt{\frac{\pi}{2kr}}\left(a_1 J_{\frac{3}{2}}(kr)\cos\theta\sin\phi - j\frac{b_1}{2}\left[\frac{J_{\frac{3}{2}}(kr)}{kr} + \left(J_{\frac{1}{2}}(kr) - J_{\frac{5}{2}}(kr)\right)\right]\sin\phi\right); \quad (3)$$

$$E_\theta = j\frac{3}{2}E_0\sqrt{\frac{\pi}{kr}}\left(a_1 J_{\frac{3}{2}}(kr)\cos\phi - j\frac{b_1}{2}\left[\frac{J_{\frac{3}{2}}(kr)}{kr} + \left(J_{\frac{1}{2}}(kr) - J_{\frac{5}{2}}(kr)\right)\right]\cos\theta\cos\phi\right). \quad (4)$$

Мембрана не является однородной фазой для движения ионов, поскольку перенос ионов через мембрану осуществляется через специализированные участки – ионные каналы, представляющие собой липопротеиновые комплексы сложной структуры. В узких каналах невозможна независимая диффузия, а допустимо только одностороннее движение ионов. Вследствие узости поры в канале могут происходить сильные ион-ионные взаимодействия.

Естественно предположить, что повышение скорости движения ионов через канал, вызванное увеличением силы внутриклеточного тока, будет иметь последствия, аналогичные повышению концентрации электролита в цитоплазме фруктов. Ионы, находящиеся в канале, не будут успевать проходить через энергетические барьеры, существующие при входе и выходе из мембраны, а также через барьер внутри канала, что будет тормозить процесс их движения [5].

При движении через канал ион достаточно долго задерживается в каждой потенциальной яме. Перескок возможен только в пустую яму. Второй ион не может попасть в занятую потенциальную яму из-за электростатического взаимодействия с уже находящимся там ионом. Поскольку скорость поступления ионов в канал зависит от силы внутриклеточного тока, связанного с внешним электромагнитным полем, то вероятность перескока зависит от приложенного электрического поля. Следовательно, транспорт ионов следует рассматривать как серию последовательных перескоков через энергетические барьеры в канале.

Рассмотрим случай, когда профиль электрического потенциала в мембране с толщиной h линейен, а на него накладывается внешнее переменное электромагнитное поле $\vec{E}_{\text{вн}}$, существующее внутри плодов фруктов благодаря их облучению ЭМП СВЧ. В этом случае уравнение Нернста—Планка, описывающее электродиффузию, приобретает вид неоднородного линейного дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dc}{dr} + \frac{czF}{RT}(E_m + E_{\text{вн}}) = -\frac{J}{uRT}, \quad (5)$$

где u – подвижность ионов; z – валентность иона; T – абсолютная температура; R – газовая постоянная; F – число Фарадея; c – концентрация ионов; ϕ – электрический потенциал на мембране; $E_m = \phi/h$ – напряженность электрического поля, создаваемого на мембране внутриклеточными процессами; J – суммарная интенсивность потока. В нашем случае $E_{\text{вн}} = |\vec{E}| = \sqrt{|E_r|^2 + |E_\phi|^2 + |E_\theta|^2}$, что определяется выражениями (2)-(4).

Решение уравнения (5) дает концентрацию ионов, движущихся через мембрану митохондрий:

$$c = e^{-\frac{zF}{RT}(E_m r + \int |\vec{E}| dr)} \left(K - \frac{J}{uRT} \int e^{\frac{zF}{RT}(E_m r + \int |\vec{E}| dr)} dr \right), \quad (6)$$

где K – произвольная константа.

Подставляя в выражение (6) значения концентраций ионов c на краях мембраны в плоскостях $r = r_0$ и $r = r_0 + h$, а также воспользовавшись свойством интегралов о среднем, приводим выражение (6) к виду:

$$c = K e^{-\frac{zF}{RT}(E_m r + |\bar{E}(r_0)|r)} - \frac{J}{uzFE_m}, \quad (7)$$

где r_0 – радиальная координата середины мембраны относительно центра сохраняемого фрукта.

Полагая, что концентрация ионов на внутренней стороне мембраны равна c' , а на внешней – c'' , из равенства (7) можно найти выражение для величины интенсивности потока ионов сквозь мембрану, вызванного наличием приложенного внешнего ЭМП СВЧ.

Согласно А.Ходжкину и Б.Катцу [10] концентрации ионов на краях мембраны (c' для $r = r_0$ и c'' для $r = r_0 + h$) пропорциональны соответственно концентрациям в наружном и внутреннем омывающих растворах c_0 и c_i :

$$c' = \gamma c_0, \quad c'' = \gamma c_i. \quad (8)$$

Данное утверждение позволяет вычислить суммарную интенсивность потока ионов через мембрану:

$$J = uzFE_m \gamma \frac{c_0 - c_i e^{\frac{zF}{RT}(E_m + |\bar{E}(r_0)|)h}}{1 - e^{\frac{zF}{RT}(E_m + |\bar{E}(r_0)|)h}}. \quad (9)$$

Вводя в выражение (9) проницаемость мембраны

$$P = \frac{uRT\gamma}{h} \text{ окончательно получаем}$$

$$J = \frac{zF\varphi P c_0 - c_i e^{\frac{zF}{RT}(E_m + |\bar{E}(r_0)|)h}}{RT} \frac{1 - e^{\frac{zF}{RT}(E_m + |\bar{E}(r_0)|)h}}{1 - e^{\frac{zF}{RT}(E_m + |\bar{E}(r_0)|)h}}. \quad (10)$$

Тогда значение плотности тока I , переносимого данным видом ионов, равно $I = zFJ$. Уравнение (10) позволяет рассчитать пассивный поток ионов, если известны их концентрация в растворах по обе стороны мембраны, естественная разность потенциалов на мембране, разность потенциалов, наведенная внешним ЭМП, и проницаемость мембраны для данного вида ионов. При наложении сверхвысокочастотного электромагнитного поля концентрация токопереносящих ионов в мембране повышается, что приводит соответственно к повышению их взаимодействия и возможному запиранию канала.

Особенности взаимодействия иона с молекулярными группами канала учитываются соответствующими профилями потенциальной энергии иона в канале, который представляется рядом последовательных потенциальных ям и барьеров. Ион достаточно долго задерживается в каждой потенциальной яме. Перескок возможен только в пустую яму. Второй ион не может попасть в занятую потенциальную яму из-за электростатического взаимодействия с уже находящимся там ионом.

В работе [9] на основании Марковского процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем исследованы вероятностные процессы во время движение ионов через мембрану митохондрий и, соответственно, дыхание фруктов без воздействия внешнего электромагнитного поля, а также при его

наличии. Скорость транспорта в канале будет зависеть от вероятности заполнения ионами участков связывания на границах мембраны, что может приводить к заполнению обоих мест связывания и блокировке канала при высоких концентрациях электролита или при повышении интенсивности перемещения ионов под воздействием внешнего сверхвысокочастотного электромагнитного поля.

Рассмотрены четыре состояния канала, между которыми возможны переходы. Состояние 1 – левый участок занят, а правый свободен (1 0); состояние 2 – правый участок занят, а левый свободен (0 1); состояние 3 – оба участка заняты (1 1); состояние 4 – оба участка свободны (0 0). Каждое состояние описывается своей вероятностью. Для нахождения соответствующих вероятностей составлена и решена система дифференциальных уравнений Колмогорова [10].

Полученные результаты показали, что при отсутствии внешнего наложенного электромагнитного поля система переходит в стационарное состояние. При этом она с вероятностью порядка 0,3 будет находиться или в состоянии (1 0) или (0 1). Иначе говоря, с вероятностью порядка 0,6 будет занят только один выход из канала движения ионов. Вероятность состояния (0 0) (оба выхода из канала дыхания свободны) становится также порядка 0,3. Следовательно, это свидетельствует о низкой вероятности отсутствия перемещения ионов по каналу в обе стороны, если на них воздействует только электрохимический потенциал клетки, а в самом канале для них нет препятствий. Открытое состояние одного из концов канала позволяет беспрепятственно перемещаться иону сквозь канал и выходить из него наружу. Данный результат говорит о том, что процесс дыхания с большой вероятностью порядка 0,9 проходит без блокировки.

При наложении на мембраны клетки внешнего электромагнитного поля с частотой 33,5...36 ГГц и искусственно создаваемого потенциала на мембране величиной 120 мВ ситуация принципиально меняется.

В данном случае вероятности состояний (1 0) или (0 1) со временем становятся порядка 0,1, то есть в сумме порядка 0,2. Вероятность состояния (0 0), когда канал открыт с обоих концов, меньше 0,1. Таким образом, суммарная вероятность свободного движения ионов по каналам равна примерно 0,3. В то же время вероятность блокировки каналов, то есть вероятность P_3 состояния (1 1), возрастает до 0,7. Следовательно, при наложении на хранящиеся фрукты внешнего электромагнитного поля СВЧ диапазона с указанными выше параметрами вероятность возможной блокировки каналов движения ионов возрастает практически в семь раз. Соответственно в семь раз будет замедляться и обмен веществ на уровне мембран клетки и процесс их дыхания, что естественно скажется на сроках хранения фруктов.

Выводы. Таким образом, рассмотрена возможность влияния на процесс переноса ионов через мембраны растительных клеток, что определяет интенсивность их дыхания и длительность хранения, с помощью внешних сверхвысокочастотных электромагнитных полей. С этой целью получены выражения

для этих полей внутри клеток. Движение ионов сквозь каналы в мембранах представлено как однорядный поток, который может тормозиться потенциальными барьерами, создаваемыми не вышедшими из каналов ионами. С помощью системы уравнений Колмогорова, которые описывают рассматриваемый Марковский процесс, получены вероятностные характеристики свободного и замедленного переноса ионов.

Список литературы:

1. *Бородай, И. И.* Биохимические и биофизические основы хранения плодов [Текст] / *И. И. Бородай* // Вестник Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. П. Василенко «Проблемы энергообеспечения и энергосбережения в АПК Украины». – 2016. – № 176. – С. 84–87.
2. *Гудковский, В. А.* Прогрессивные технологии хранения плодов [Текст] / *В. А. Гудковский, А. А. Кладь, Л. В. Кожина, А. Е. Балакирев, Ю. Б. Назаров* // Достижения науки и техники. АПК. – 2009. – № 2. – С. 66–68.
3. *Бородай, И. И.* Анализ методов и устройств контроля дыхания плодов при воздействии на них электромагнитного излучения [Текст] / *И. И. Бородай, Н. П. Кунденко* // Вестник Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. П. Василенко «Проблемы энергообеспечения и энергосбережения в АПК Украины». – 2016. – № 175. – С. 166–168.
4. *Гудковский, В. А.* Эффективность модифицированной атмосферы и ингибитора биосинтеза этилена для хранения плодов, ягод и овощей [Текст] / *В. А. Гудковский, Л. В. Кожина, А. Е. Балакирев, Ю. Б. Назаров* // Вестник МичГАУ. – 2009. – № 1. – С. 53–64.
5. *Бородай, И. И.* Моделирование процесса переноса ионов через мембраны клеток под воздействием внешнего электромагнитного поля [Текст] / *И. И. Бородай* // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Системный анализ, управление и информационные технологии. – 2016. – № 45. – С. 18–21.
6. *Konstantinov, I. S.* Theoretical Analysis of Electromagnetic Field Electric Tension Distribution in the Seeds of Cereals [Text] / *I. S. Konstantinov, A. V. Mamatov, V. A. Sapryka, A. D. Cherenkov, A. V. Sapryka, N. G. Kosulina* // Research journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2015. – № 6 (6). – P. 1686–1694.
7. *Рубин, А. Б.* Биофизика. Том 1. Теоретическая биофизика [Текст] / *А. Б. Рубин*. – М.: МГУ, 1999. – 448 с.
8. *Konstantinov, I. S.* Decision alqoritm of near-field microwave soundinq [Text] / *I. S. Konstantinov, A. V. Mamatov, V. A. Sapryka, A. D. Cherenkov, A. V. Sapryka A. E. Poedinchuk* // International Journal jf Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10. – P. 45186–45189.
9. *Дынкин, Е. Б.* Марковские процессы [Текст] / *Е. Б. Дынкин*. – М.: Физматлит, 1963. – 860 с.
10. *Волькенштейн, М. В.* Биофизика [Текст] / *М. В. Волькенштейн*. – М.: Наука, 1988. – 592 с.

Bibliography (transliterated):

1. *Borodaj, I. I.* (2016). Biohimicheskie i biofizicheskie osnovy hranenija plodov. Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo tehniceskogo universiteta sel'skogo hozjajstva im. P. Vasilenko «Problemy jenergoobespechenija i jenergosberezhenija v APK Ukrainy», 176, 84–87.
2. *Gudkovskij, V. A., Klad', A. A., Kozhina, L. V., Balakirev, A. E., Nazarov, Ju. B.* (2009). Progressivnye tehnologii hranenija plodov. Dostizhenija nauki i tehniki. APK, 2, 66–68.
3. *Borodaj, I. I., Kundenko, N. P.* (2016). Analiz metodov i ustrojstv kontrolja dyhanija plodov pri vozdejstvii na nih jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo tehniceskogo universiteta sel'skogo hozjajstva im. P. Vasilenko «Problemy jenergoobespechenija i jenergosberezhenija v APK Ukrainy», 175, 166–168.
4. *Gudkovskij, V. A., Kozhina, L. V., Balakirev, A. E., Nazarov, Ju. B.* (2009). Jefferktivnost' modifitsirovannoj atmosfery i ingibitora biosinteza jetilena dlja hranenija plodov, jagod i ovoshhej. Vestnik MichGAU, 1, 53–64.
5. *Borodaj, I. I.* (2016). Modelirovanie processa perenosa ionov cherez membrany kletok pod vozdejstviem vneshnego jelektromagnitnogo polja. Vestnik NTU "HPI". Serija: Sistemnyj analiz, upravlenie i informacionnye tehnologii, 45, 18–21.
6. *Konstantinov, I. S., Mamatov, A. V., Sapryka, V. A., Cherenkov, A. D., Sapryka, A. V., Kosulina, N. G.* (2015). Theoretical Analysis of Electromagnetic Field Electric Tension Distribution in the Seeds of Cereals. Research journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, 6 (6), 1686–1694.
7. *Rubin, A. B.* (1999). Biofizika. Tom 1. Teoreticheskaja biofizika. Moscow: MGU, 448.
8. *Konstantinov, I. S., Mamatov, A. V., Sapryka, V. A., Cherenkov, A. D., Sapryka, A. V., Poedinchuk, A. E.* (2015). Decision alqoritm of near-field microwave soundinq. International Journal jf Applied Engineering Research, 10, 45186–45189.
9. *Dynkin, E. B.* (1963). Markovskie process. Moscow: Fizmatlit, 860.
10. *Vol'kenshtejn, M. V.* (1988). Biofizika. Moscow: Nauka, 592.

Поступила (received) 21.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Влияние внешнего электромагнитного поля на обменные процессы в плодах фруктов/ И. И. Бородай // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 131–135.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Вплив зовнішнього електромагнітного поля на обмінні процеси в плодах фруктів/ І. І. Бородай // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 131–135.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Influence of external electromagnetic field on metabolic processes in fruits of fruit/ I. Boroday //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 131–135. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бородай Ирина Ивановна – аспірант, Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. П. Василенко, ул. Алчевских, 44, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: tte_nniekt@ukr.net.

Бородай Ирина Іванівна – аспірантка, Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенко, вул. Алчевських, 44, г. Харьков, Україна, 61002; e-mail: tte_nniekt@ukr.net.

Boroday Irina – postgraduate student, Kharkiv National Technical University of Agriculture of P. Vasilenko, str. Alchevsky, 44, Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: tte_nniekt@ukr.net.

УДК 628.3:519.2

О. О. ДУПЕНКО, А. І. ТРИКІЛО

ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯННЯ РЕГРЕСІЇ ОЧИЩЕННЯ ФЕНОЛЬНИХ СТІЧНИХ ВОД З ДОДАВАННЯМ БІОГЕНОЇ ДОБАВКИ КАРБАМІДУ

Визначено рівняння регресії другого порядку, яке описує процес очищення фенольних стічних вод при зміні параметрів: часу проведення очищення (часу аерації), початкового вмісту фенолів, дози активного мулу та доза біогенної добавки – карбаміду. В результаті математичної обробки експериментальних даних отримано графіки залежностей залишкового вмісту фенолів від вхідних параметрів у формі поверхонь відгуку, які характеризують процес очищення. Результати досліджень можуть бути використані у промисловості для встановлення оптимальних режимів технологічного процесу з визначенням мінімальних витрат на додавання карбаміду і часу аерації.

Ключові слова: феноли, очищення стічної води, карбамід, рівняння регресії, біогена добавка, аерація, поверхні відгуку.

Определено уравнение регрессии второго порядка, описывающее процесс очистки фенольных сточных вод при изменении параметров: времени проведения очистки (времени аэрации), начального содержания фенолов, дозы активного ила и доза биогенной добавки – карбамида. В результате математической обработки экспериментальных данных получены графики зависимостей остаточного содержания фенолов от входных параметров в форме поверхностей отклика, характеризующих процесс очистки. Результаты исследований могут быть использованы в промышленности для установления оптимальных режимов технологического процесса с определением минимальных затрат на добавление карбамида и времени аэрации.

Ключевые слова: фенолы, очистка сточной воды, карбамид, уравнение регрессии, биогенная добавка, аэрация, поверхности отклика.

The article discusses issues related to the determination of the regression equation of the second order describing the process of purification of phenolic waste water when changing the parameters: the time of the treatment (time of aeration), the initial phenol content, the dose of active sludge and dose of a nutrient additive – urea. The result of mathematical processing of experimental data are: regression equation for the entire array of the studied variable with defined coefficients of pair correlation and response surfaces. As a scientific novelty for the first time determined there regression equation for the cleaning process of phenolic wastewater with variable defined. The practical significance of research consists in possibility to use them in industry for determination of optimum modes of technological process with the determination of the minimum cost of adding urea and time of aeration.

Keywords: phenols, purification of wastewater, urea, regression equation, nutrient additive, aeration, surface response.

Вступ. Стічні води коксохімічних підприємств забруднені органічними та неорганічними речовинами, серед яких найбільш шкідливими є одно та багатоатомні феноли, які спричиняють негативний вплив на організм людини, а також навколишнє середовище загалом. Стічні води коксохімічних заводів використовують в основному для гасіння коксу, тому значна кількість шкідливих речовин, що залишилися у воді, при зіткненні з розпеченим коксом випаровуються і потрапляють в атмосферу. Нормативне значення вмісту фенолів у воді, що використовується для гасіння коксу, становить 1 мг/дм³ [1, 2]. Для очищення від цих сполук до нормативного значення на підприємствах застосовують біологічний метод з використанням специфічного активного мулу, що збагачений фенолруйнуючими мікроорганізмами.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Для стабільного процесу очищення фенольних вод з використанням активного мулу необхідно підтримувати умови сприятливі для життєдіяльності мікроорганізмів: температурний оптимум 28-35 °С, рН середовища 6,5–8,0; подача повітря для забезпечення дихання мікроорганізмів, а також наявність біогенних елементів таких як ортофосфати (джерело фосфору) та інші біогенні елементи [3].

Серед параметрів, які впливають на швидкість та ефективність очищення можна назвати початкову концентрацію фенолів та стан активного мулу. Як було визначено у роботі [4] порушення процесу очищення може відбуватися:

– при перевищенні нормативної концентрації фенолів у воді, яка надходить на очищення, що приводить до перевантаження системи за забруднюючої речовиною;

– при загибелі частини активного мулу в наслідок невідповідної якості забрудненої води (наднорма-

тивний вміст смолистих речовин, зниження рН нижче оптимального, тощо)

Одним із способів інтенсифікації процесу біорозкладання компонентів стічних вод є вживання біологічно активних речовин (БАР) як стимуляторів процесу росту мікроорганізмів та прискорення біорозкладання забруднень. Відомі способи біохімічної очистки стічних вод від органічних сполук, в якому активний мул попередньо обробляють хімічними реагентами – водними розчинами малеїнової або бурштинової кислоти, фталоїнжелатини тощо [5, 6].

У статті [7] авторами було показано, що використання карбаміду пришвидшує окислення фенолів, що припустимо є наслідком стимулювання росту бактерій. Завдяки тому, що карбамід включає азот в амідній формі, він легко засвоюється клітинами мікроорганізмів. Так як азот є основним елементом для будовання найважливіших кислот і білків, присутність азоту карбаміду прискорює рост клітин та синтез ферментів, що необхідні для ефективного біорозкладання фенолів.

Для обумовлення залежності між основними параметрами очищення при додаванні карбаміду та використанню отриманих даних у промисловості необхідно було визначити математичний опис процесу.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення залежності процесу очищення фенольних стічних вод при зміні параметрів: часу проведення очищення (часу аерації), початкового вмісту фенолів, дози активного мулу та доза біогенної добавки – карбаміду.

Задачею дослідження є отримати адекватне математичне рівняння, яке описує процес очищення фенольних стічних вод при зміні визначених параметрів для використання його в промисловості.

© О. О. Дупенко, А. І. Трикіло. 2017

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Обробка експериментальних даних, отриманих в результаті дослідження процесу очистки.

2. Побудова поверхонь відгуку і визначення оптимальних параметрів технологічного процесу.

Матеріали та методи дослідження. Було проведено серію експериментів з використанням фенольної води різної якості і додаванням різних доз карбаміду.

Умови проведення експерименту були наступними. Для проведення досліджень були зібрано експериментальну установку, що складається з реактору об'ємом 5 дм³ і компресору для подачі повітря. Процес біологічного очищення стічних вод в лабораторних умовах проводили наступним чином: в усереднену фенольну воду з визначеним вмістом фенолів додавали активний мул і зазначений реагент у різних дозах та аерували протягом встановленого часу. Після

чого визначали залишковий вміст фенолів за стандартною методикою [8].

За наявності широкого діапазону варіювання досліджуваних параметрів при очищенні фенольних стоків доцільно застосувати методику планування експериментів для вирішення поставленого завдання із необхідною точністю [9]. В якості факторів, від яких залежить ступінь очистки (залишкова концентрація фенолів Y , мг/дм³) обрано:

x_1 – час проведення очищення (час аерації), год.; x_2 – початковий вміст фенолів, мг/дм³; x_3 – доза карбаміду, що надана для прискорення очищення г/дм³; x_4 – доза активного мулу, мг/дм³.

Для виявлення взаємозв'язку наведених параметрів досліджуваного процесу очистки фенольних стічних вод від фенолів проведено математичну обробку отриманих експериментальних даних. Результати серії лабораторних експериментів зведені в одну базу даних (табл. 1).

Таблиця 1– Результати лабораторних досліджень і розрахунків похибки

№ досліджу	x_1	x_2	x_3	x_4	Y	Y_p	d	%
1	48	335	0,4	0,6	1,40	1,399	0,001	0,10
2	48	450	0,5	0,7	1,30	1,328	-0,028	2,16
3	48	537	0,2	0,7	1,98	2,129	-0,149	7,53
4	48	537	0,8	0,7	0,82	0,839	-0,019	2,27
5	48	537	0,1	0,8	1,99	2,267	-0,277	13,93
6	48	537	0,4	0,8	1,55	1,518	0,032	2,09
7	48	537	0,5	0,8	1,13	1,329	-0,199	17,58
8	48	537	1	0,8	0,72	0,840	-0,120	16,69
9	48	537	1	0,8	0,79	0,840	-0,050	6,35
10	72	450	0,5	0,7	0,80	0,690	0,110	13,71
11	72	537	0,2	0,7	1,77	1,452	0,318	17,94
12	72	537	0,8	0,7	0,53	0,422	0,108	20,29
13	72	537	0	0,8	1,86	1,700	0,160	8,60
14	72	537	0,1	0,8	1,67	1,433	0,237	14,20
15	72	537	0,4	0,8	1,01	0,813	0,197	19,46
16	72	537	0,5	0,8	0,55	0,668	-0,118	21,43
17	72	537	0,6	0,8	0,54	0,553	-0,013	2,36
18	72	537	1	0,8	0,52	0,397	0,123	23,75
19	72	537	1	0,8	0,54	0,397	0,143	26,57
20	96	335	0,4	0,6	0,52	0,509	0,011	2,19
21	96	450	0,5	0,7	0,49	0,538	-0,048	9,80
22	96	537	0,2	0,7	1,14	1,261	-0,121	10,65
23	96	537	0,8	0,7	0,45	0,492	-0,042	9,32
24	96	537	0	0,8	1,19	1,308	-0,118	9,90
25	96	537	0,1	0,8	1,14	1,084	0,056	4,92
26	96	537	0,4	0,8	0,69	0,595	0,095	13,79
27	96	537	0,5	0,8	0,47	0,493	-0,023	4,83
28	96	537	0,6	0,8	0,46	0,421	0,039	8,49
29	96	537	1	0,8	0,44	0,438	0,002	0,36
30	96	537	1	0,8	0,44	0,438	0,002	0,36
							Середня похибка	10,39

Результати дослідження процесу очищення фенольних вод. В результаті математичної обробки експериментальних даних [10], нами визначено коефіцієнти парної кореляції і рівняння регресії для всього масиву досліджуваних змінних (табл. 2, 3); отримано графіки залежностей вихідного параметру від вхідних у формі поверхонь відгуку.

Розраховані коефіцієнти парної кореляції, які наведені в табл. 3, дозволяють визначити значимі параметри впливу на процес.

Згідно отриманих даних до значимих параметрів віднесено: початкову концентрацію фенолів, час проведення аерації, дозу карбаміду.

Як видно з табл. 3 при збільшенні часу проведення очищення та дози карбаміду залишкова концентрація фенолів зменшується. Навпаки при збільшенні початкового вмісту фенолів зростає його залишкова концентрація.

Таблиця 2 – Натуральні значення факторів

	Мінімум	Середнє	Максимум	Ст. відхилення
X1	24,00	72,00	96,00	21,83
X2	335,00	514,83	537,00	55,58
X3	0,00	0,52	1,00	0,33
X4	0,60	0,76	0,80	0,06

Таблиця 3 – Коефіцієнти парної кореляції

	X1	X2	X3	X4	Y
X1	1,000	-0,000	-0,047	-0,000	-0,608
X2	-0,000	1,000	0,102	0,774	0,068
X3	-0,047	0,102	1,000	0,112	0,617
X4	-0,000	0,774	0,112	1,000	0,016
Y	-0,608	0,068	-0,617	0,016	1,000

(значимі на рівні $p < 0,05$ коефіцієнти парної кореляції виділені)

Визначене рівняння регресії для залишкової концентрації фенолів у очищеній воді має наступний вигляд:

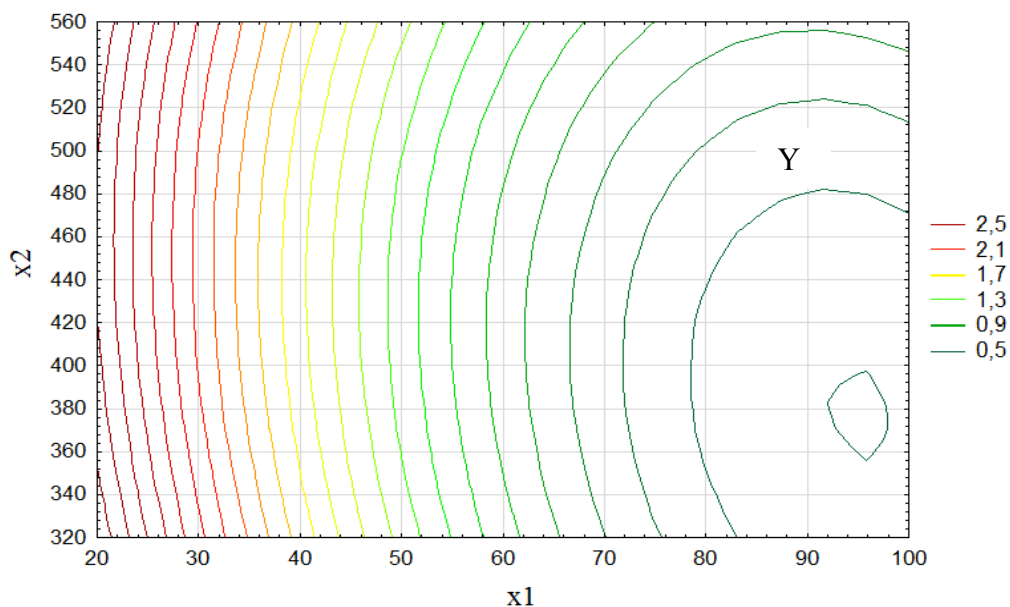
$$Y_p = -3517,6057809 - 0,0725500 \cdot x_1 - 39,9593861 \cdot x_2 + 51997,3197335 \cdot x_3 - 1784,3192545 \cdot x_4 + 0,0004215 \cdot x_1^2 + 0,0590200 \cdot x_2^2 + 1,5217499 \cdot x_3^2 - 14217,8863783 \cdot x_4^2 + 0,0000438 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0180899 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,0476586 \cdot x_1 \cdot x_4 - 96,8431137 \cdot x_2 \cdot x_3 + 43,0375948 \cdot x_2 \cdot x_4 + 4,1306164 \cdot x_3 \cdot x_4$$

Знайдено значення параметрів, при яких Y (залишкова концентрація фенолів) має мінімальне значення: $X_1=76$; $X_2=537$; $X_3=1,01$; $X_4=0,7$ при цьому $Y_p = 0,3$.

З метою наочного представлення отриманих експериментальних даних та визначення інтервалів оп-

тимальних значень (при яких досягається найвищий ступінь очистки), для значимих параметрів нами побудовані поверхні відгуку, котрі представлені на рис. 1–3. Рівняння, які описують дані поверхні, представлені перед рисунками.

$$(Y_{1,2} = 6,1244 - 0,081 \cdot x_1 - 0,0094 \cdot x_2 + 0,0004 \cdot x_1^2 + 2,1506E^{-5} \cdot x_1 \cdot x_2 + 9,8053E^{-5} \cdot x_2^2).$$

Рис. 1 – Поверхня відгуку для вихідних змінних x_1 і x_2

$$(Y_{1,3} = 5,8202 - 0,0863 \cdot x_1 - 4,2905 \cdot x_3 + 0,0004 \cdot x_1^2 + 0,0185 \cdot x_1 \cdot x_3 + 1,58 \cdot x_3^2)$$

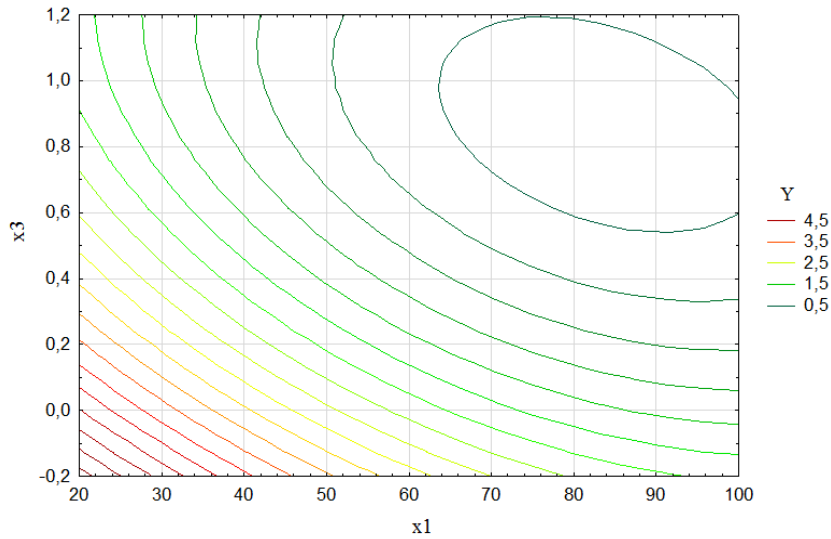


Рис. 2 – Поверхня відгуку для вихідних змінних x_1 і x_3

$$(Y_{3,4} = -3,5875 - 6,4128 \cdot x_3 + 17,463 \cdot x_4 + 0,4205 \cdot x_3^2 + 6,108 \cdot x_3 \cdot x_4 - 13,607 \cdot x_4^2)$$

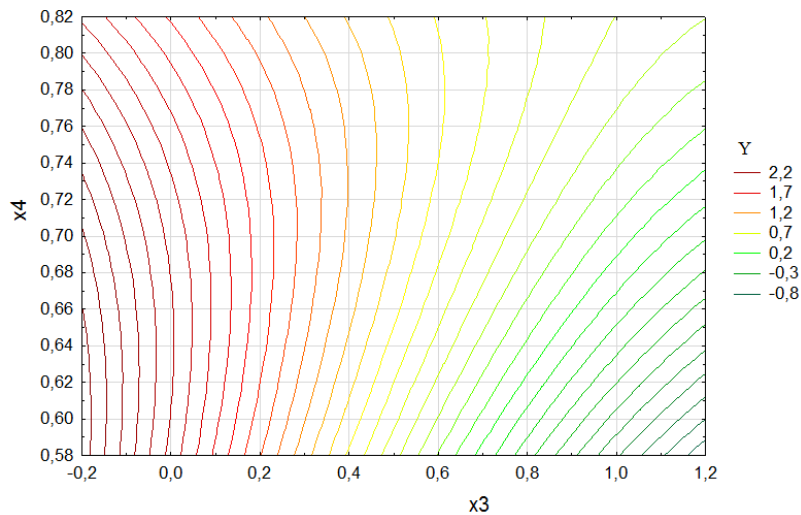


Рис. 3 – Поверхня відгуку для вихідних змінних x_3 і x_4

$$(Y_{1,4} = -0,5116 - 0,0788 \cdot x_1 + 13,1587 \cdot x_4 + 0,0004 \cdot x_1^2 + 0,0102 \cdot x_1 \cdot x_4 - 9,559 \cdot x_4^2)$$

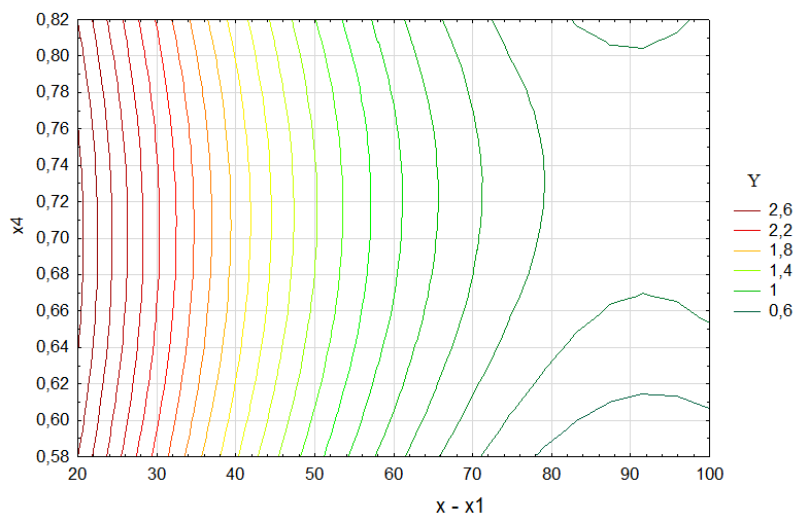


Рис. 4 – Поверхня відгуку для вихідних змінних x_1 і x_4

Обговорення результатів дослідження. Отримані поверхні відгуку дають змогу оцінити вплив кожного параметра. З рисунку 1 слідує, що нормативне значення фенолів ($1,0 \text{ мг/дм}^3$) в очищеній воді досягається при будь-якій початковій концентрації фенолів не раніше ніж за 65 годин.

З рис. 2 та 3 виходить, що додавання карбаміду у дозі $0,4 \text{ г/дм}^3$ і найбільшому часі аерації забезпечує очищення до вмісту фенолів $1,0 \text{ мг/дм}^3$. Збільшення дози карбаміду на $0,6 \text{ мг/дм}^3$ дає можливість скоротити час очищення стічної води до 55 годин.

Збільшення дози активного мулу (рис. 3, 4) позитивно впливає на процес очищення, але не має такого значного впливу як додавання карбаміду.

Необхідно відмітити, що залежність $x1$ та $x3$ є найбільш важлива. Знаючи вартість витрат на додавання карбаміду і енергетичних витрат на аерацію можливо визначити оптимальні значення даних параметрів, скоротивши таким чином витрати на очищення стічних вод.

Висновки

1. На основі експериментальних даних одержано рівняння регресії другого порядку, яке дозволяє визначити залишкову концентрацію фенолів залежно від початкового вмісту фенолів, часу аерації та дози сти- мулюючої речовини – карбаміду.

2. Виведені рівняння регресії адекватно описують результати експериментів, середня відносна похибка рівнянь лежить у прийнятних для хімічної технології межах.

3. Визначено оптимальні значення змінних параметрів для досягнення мінімального залишкового вмісту фенолів.

4. Результати роботи дозволяють визначити оптимальне співвідношення добавки карбаміду та часу аерації для забезпечення ефективної очистки фенольних стічних вод до нормативного значення 1 мг/дм^3 .

5. Визначене рівняння регресії процесу очищення з використанням карбаміду як біогенної добавки може бути використане у промисловості для ведення технологічного процесу.

Список літератури:

1. Старовойт А. Г. Природоохранная работа коксохимических предприятий Украины [Текст] / А. Г. Старовойт // Природоохранные технологии и оборудование. – 2014. – № 4. – С. 45–49.
2. Борисенко, А. Л. Регулирование выбросов загрязняющих веществ и обращение с отходами на коксохимических заводах Украины [Текст] / А. Л. Борисенко, А. С. Мальш, Е. Ю. Спирина К. Е. Герман // УглеХимический журнал. – 2015. – № 3. – С. 43–51.
3. Кагасов, В. М. Очистка сточных вод коксохимических предприятий [Текст] / В. М. Кагасов, Е. К. Дербышева. – Екатеринбург: Полиграфист, 2003. – 189 с.
4. Клименко, І. В. Розробка ефективної технології очистки фенольних стічних вод [Текст] / І. В. Клименко, Д. О. Єлан-

5. цев, А. В. Иванченко, О. О. Дупенко, М. Д. Волошин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – № 3/10 (81). – С. 29–34. doi: [10.15587/1729-4061.2016.72410](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72410)
5. Пат. № 2445275 RF. Способ интенсификации биологической очистки сточных вод МПК: C02F [Текст] / Шулаев, М. В. Фаттахов, С. Г. Хабибуллина Л. И.; патентовладелец Учреждение РАН Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова Казанского научного центра РАН. – опубл. 20.03.2012, Бюл. № 5.
6. Пат. № 2026827 RF. Способ биохимической очистки сточных вод от органических веществ МПК: C02F3/02 [Текст] / Победимский Д. Г., Ахмадуллина Ф. Ю., Хабутдинов М. С.; патентовладелец КАПО "Органический синтез" – опубл. 15.05.2010, Бюл. № 4.
7. Иванченко, А. В. Воздействие карбамида на биологическое удаление фенолов из сточных вод коксохимического предприятия [Текст] / А. В. Иванченко, О. А. Дупенко, Н. Д. Волошин // Вода и водоочистные технологии. – 2015. – № 1 (16). – С. 50–58.
8. Привалов, В. Е. Анализ сточных вод коксохимических заводов [Текст] / В. Е. Привалов, Л. И. Хлопкова, Г. И. Папков. – Москва: Металлургия. – 1976. – 120 с.
9. Барабашук, В. И. Планирование эксперимента в технике [Текст] / В. И. Барабашук, Б. П. Креденцер, В. И. Мирошниченко. – К.: Техника, 1985. – 327 с.
10. Ахназарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии [Текст] / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.

Bibliography (transliterated):

1. Starovoi, A. H. (2014). Pryrodookhrannaia rabota koksokhymicheskikh predpriyatiy Ukrainy. Pryrodookhrannnye tekhnolohy y oborudovanye, 4, 45–49.
2. Borysenko, A. L., Malys, A. S., Spyrna, E. Yu. (2015). Rehulyrovanye vybrosov zahriazniaiushchykh veshchestv y obrashchenye s otkhodamy na koksokhymicheskikh zavodakh Ukrainy. UhleKhymicheskyy zhurnal, 3, 43–51.
3. Kahasov, V. M., Derbysheva, E. K. (2003). Ochystka stochnykh vod koksokhymicheskikh predpriyatiy. Ekaterynburh: Polyhrafyst, 189.
4. Klymenko, I., Yelatontsev, D., Ivanchenko, A., Dupenko, O., Voloshyn, N. (2016). Developing of effective treatment technology of the phenolic wastewater. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (10 (81)), 29–34. doi: [10.15587/1729-4061.2016.72410](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72410)
5. Shulaev, M. V., Fattakhov, S. H., Khabybullyna L. Y. (2012). Pat. 2445275 RF. Sposob yntensyfykatsyy byolohycheskoi ochystky stochnykh vod. MPK: C02F, Patentovladelets Uchrezhdenye RAN Ynstytut orhanycheskoi y fyzycheskoi khymyy ym. A.E. Arbuzova Kazanskoho nauchnoho tsentra RAN; published: 20.03.2012, Bul. No. 5.
6. Pobedymyskiy, D. H., Akhmadullyna, F. Yu., Habutdynov, M. S. (2010). Pat. 2026827 RF. MPK: C02F3/02 Sposob byokhymicheskoi ochystky stochnykh vod ot orhanycheskykh veshchestv. Patentovladelets КАПО "Orhanycheskiy syntez"; published: 15.05.2010, Bul. No. 4.
7. Yvanchenko, A. V. Dupenko, O. O., Voloshyn, M. D. (2015). Vozdeistvye karbamida na byolohycheskoe udaleny fenolov yz stochnykh vod koksokhymicheskoho predpriyatiya. Voda i vodoochysni tekhnolohii. Naukovo-tekhnichni visti, 1 (16), 50–58.
8. Privalov, V. E., Hlopokova, L. I., Papkov, G. I. (1976). Analiz stochnykh vod koksohimicheskikh zavodov. Moscow: Metallurgija, 120.
9. Barabashchuk, V. Y., Kredentser, B. P., Myroshnychenko, V. Y. (1985). Planirovanye eksperymenta v tekhnike. Kyev: Tehnika, 327.
10. Akhnazarova, S. L., Kafarov, V. V. (1985). Metody optymyzatsyy eksperymenta v khymicheskoi tekhnolohy. Moscow: Vysshaya shkola, 327.

Надійшла (received) 07.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Визначення рівняння регресії очищення фенольних стічних вод з додаванням біогенної добавки карбаміду/ О. О. Дупенко, А. І. Трикіло // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С. 136–141. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Определение уравнения регрессии очистки фенольных сточных вод с добавлением биогенов добавки карбамида/ О. А. Дупенко, А. И. Трикило // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.136–141. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Determination of regression equations of purification of phenolic wastewater with the addition of nutrient additive – urea/ O. Dupenko, A. Trukilo // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P. 136–141. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дупенко Ольга Олександрівна – аспірант, Дніпровський державний технічний університет, Кафедра Хімічної технології неорганічних речовин, вул. Дніпробудівська, 2, м. Кам'янське, Україна, 51918;

Трикило Алік Іванович – кандидат технічних наук, Дніпровський державний технічний університет, доцент, Кафедра Електроніки, вул. Дніпробудівська, 2, м. Кам'янське, Україна, 51918;

Дупенко Ольга Александровна – аспирант, Днепропетровский государственный технический университет, Кафедра Химической технологии неорганических веществ, ул. Днепропетровская, 2, м. Каменское, Украина, 51918;

Трикило Алик Иванович – кандидат технических наук, доцент, Днепропетровский государственный технический университет, Кафедра Электроники, ул. Днепропетровская, 2, м. Каменское, Украина, 51918;

Dupenko Olga – postgraduate student, Dneprovsk State Technscal University, the department «Chemical technology of inorganic substances»; str. Dneprostroevskaya, 2, Kamenskoe, Ukraine; 51918;

Trukilo Alik – PhD, Dneprovsk State Technscal University, associate professor of the department «Electronics»; str. Dneprostroevskaya, 2, Kamenskoe, Ukraine; 51918

УДК 631.371

А. Ю. ФЕДЮШКО

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЯБЛОК СО СЛОЕМ МИКРООРГАНИЗМОВ

Решена задача по распределению электромагнитного излучения в микро-организмах на поверхности яблок. В результате теоретических исследований с использованием потенциалов Дебая и метода разделения переменных в сферической системе координат, было получено скалярное уравнение Гельмгольца для электрического потенциала Дебая. Решение уравнения позволило получить формулы для расчёта среднего значения электрического поля на поверхности яблок. Среднее значение электрического поля связано с определением биотропных параметров для уничтожения микроорганизмов.

Ключевые слова: слой микроорганизмов на поверхности яблок; распределение электрического поля в поверхностном слое яблок; биотропные параметры электромагнитного излучения.

Розв'язана задача по розподілу електромагнітного випромінювання в мікроорганізмах на поверхні яблук. В результаті теоретичних досліджень з використанням потенціалів Дебая і методу розділення змінних в сферичній системі координат, було отримано скалярне рівняння Гельмгольца для електричного потенціалу Дебая. Вирішення рівняння дозволило отримати формули для розрахунку середнього значення електричного поля на поверхні яблук. Середнє значення електричного поля пов'язано з визначенням біотропних параметрів для знищення мікроорганізмів.

Ключові слова: шар мікроорганізмів на поверхні яблук; розподіл електричного поля в поверхневому шарі яблук; біотропні параметри електромагнітного випромінювання.

Subject of this article is distribution of electromagnetic radiation in microorganisms on the surface of apples. Through theoretical studies based on Debye potentials and the method of separation of variables in a spherical coordinate system the Helmholtz scalar equation for the Debye electric potential was obtained. Solving of this equation allowed to obtain formulas for calculating the average value of the electric field on the surface of apples. The average value of the electric field is connected to the calculation of biotropic parameters for the destruction of microorganisms.

Keywords: layer of microorganisms on the surface of apples; distribution of the electric field in the surface layer of apples; biotropic parameters of electromagnetic radiation.

Введение. Обеспечение населения плодовой продукцией определяется не только уровнем производства, но и эффективной организацией хранения.

Практический опыт показывает, что для хранения плодово-ягодной продукции широкое распространение получил метод хранения плодов в холодильных камерах с регулируемой газовой средой (РГС)[1].

Существенным недостатком газовой среды является то, что избыточное содержание углекислого газа в атмосфере хранения способно вызывать нарушение обмена веществ и развитие побурения тканей пери-

карпия, даже у сортов, устойчивых к этим заболеваниям. Из-за избыточного накопления продуктов анаэробного обмена резко снижаются вкусовые качества, повышается чувствительность к низкотемпературным повреждениям, снижается устойчивость к микроорганизмам. Значительная доля потерь плодов (до 30 %) в период хранения приходится на поражение их физиологическими расстройствами и болезнями (плесень, стрептококки, грибки, споровые бактерии и др.) [1, 2].

© А. Ю. Федюшко. 2017

Анализ показывает, что современная технология хранения плодов в газовой среде является не всегда эффективной и дорогостоящей. В связи с чем возникает необходимость в разработке новых, более доступных и менее затратных технологий хранения [3].

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Основными потерями объёмов фруктов при хранении являются потери, связанные с болезнями грибкового характера; их объём трудно поддается прогнозам, но в случае массового распространения может достигать 100%. При существующих способах хранения: обычная, регулируемая, модифицированная атмосфера не обеспечивают защиту плодов яблони от физиологических и грибковых болезней, не гарантируют сохранение их исходного качества на стадиях хранения и реализации. Из всего количества полученной продукции требования высшего и первого сортов удовлетворяют не более 60% плодов [1].

Эффективная, недорогая и доступная технология хранения плодов может быть осуществлена с помощью использования низкоэнергетической электромагнитной технологии и электронных систем для уничтожения грибковых микроорганизмов на поверхности плодов яблони для их длительного хранения. Применение низкоэнергетического электромагнитного излучения связано с наименьшими затратами энергии при максимальном влиянии на процессы ингибирования жизнедеятельности микроорганизмов [4]. Однако, уничтожение грибковых микроорганизмов плодов яблони может быть получено только при оптимальном сочетании биотропных параметров воздействующего ЭМП (частота излучения, плотность потока мощности, экспозиция и др.). Таким образом, исследование и разработка низкоэнергетических электромагнитных методов и источников электромагнитного излучения для уничтожения грибковых микроорганизмов плодов яблони является актуальной задачей.

Объект, цель и задачи исследования. *Объект исследования.* Процесс влияния низкоэнергетических электромагнитных излучений на микроорганизмы, вызывающие физиологические и грибковые болезни на плодах яблони в процессе их длительного хранения.

Целью работы является определение резонансной частоты электромагнитного излучения для уничтожения грибковых микроорганизмов на поверхности плодов яблони в процессе их длительного хранения.

Для достижения поставленной цели необходимо было выполнить следующие задачи:

1. Обосновать модель поверхности яблок со слоем грибковых микроорганизмов.

2. С использованием потенциалов Дебая и метода разделения переменных

получить уравнение Гельмгольца для определения среднего значения электрического поля на поверхности яблок в зависимости от диэлектрических параметров грибковых микроорганизмов и частоты возбуждающего поля.

Распределение напряжённости электрического поля на поверхности яблок со слоем грибковых микроорганизмов. В качестве электродинамической

модели биологического объекта (яблока) будем рассматривать шар радиусом R заполненный изотропной однородной средой с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1 \varepsilon_0$ и магнитной проницаемостью μ_0 (ε_0 и μ_0 - диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума). Биообъект покрыт тонким сферическим слоем толщиной h , который моделирует слой микроорганизмов. Будем полагать, что слой имеет диэлектрическую проницаемость - $\varepsilon_2 \varepsilon_0$, а магнитную проницаемость - μ_0 .

В результате дифракции монохроматического электромагнитного излучения на биообъекте возникает вторичное электромагнитное поле (поле дифракции) с напряженностями \vec{E} и \vec{H} . Задача состоит в определении этого поля как внутри так и вне биообъекта.

Поскольку биообъект имеет сферическую симметрию, то будем рассматривать задачу о дифракции в сферической системе координат с началом в центре биообъекта (рис. 1).

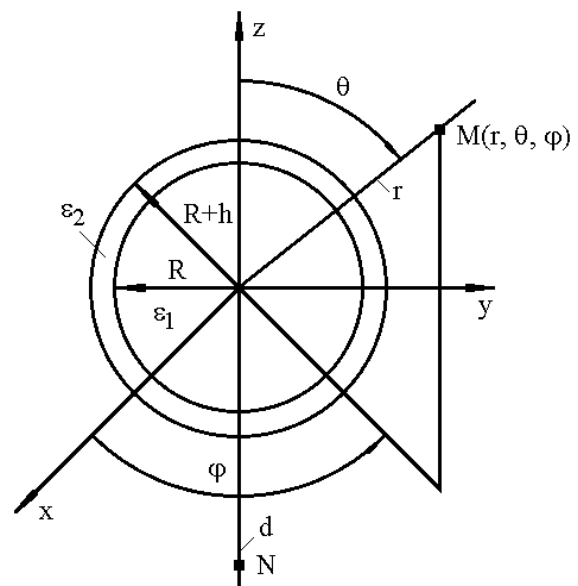


Рис. 1 – Электродинамическая модель яблок со слоем микроорганизмов

Искомое поле дифракции должно удовлетворять внутри поверхности биообъекта со слоем микроорганизмов уравнениям Максвелла [5,6]

$$\begin{aligned}
 -ik\varepsilon\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}E_r &= \frac{1}{r\sin\theta}\left[\frac{\partial}{\partial\theta}(H_\phi\sin\theta) - \frac{\partial H_\theta}{\partial\phi}\right], \\
 -ik\varepsilon\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}E_\theta &= \frac{1}{r}\left[\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial H_r}{\partial\phi} - \frac{\partial(rH_\phi)}{\partial r}\right], \\
 -ik\varepsilon\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}E_\phi &= \frac{1}{r}\left[\frac{\partial(rH_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial\theta}\right],
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
ik\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}H_r &= \frac{1}{r\sin\theta}\left[\frac{\partial}{\partial\theta}(E_\phi\sin\theta)-\frac{\partial E_\theta}{\partial\phi}\right], \\
ik\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}H_\theta &= \frac{1}{r}\left[\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial E_r}{\partial\phi}-\frac{\partial(rE_\phi)}{\partial r}\right], \\
ik\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}H_\phi &= \frac{1}{r}\left[\frac{\partial(rE_\theta)}{\partial r}-\frac{\partial E_r}{\partial\theta}\right], \\
\frac{\partial(r^2\varepsilon E_r)}{\partial r} + \frac{r}{\sin\theta}\frac{\partial(\varepsilon E_\phi)}{\partial\phi} + \frac{r}{\sin\theta}\frac{\partial(\sin\theta\varepsilon E_\theta)}{\partial\theta} &= 0, \\
\frac{\partial(r^2H_r)}{\partial r} + \frac{r}{\sin\theta}\frac{\partial(H_\phi)}{\partial\phi} + \frac{r}{\sin\theta}\frac{\partial(\sin\theta H_\theta)}{\partial\theta} &= 0. \quad (2)
\end{aligned}$$

Для формулировки условий непрерывности тангенциальных компонент поля на границах раздела сред введем обозначения: \vec{E}_1, \vec{H}_1 – электромагнитное поле внутри биообъекта; \vec{E}_2, \vec{H}_2 – электромагнитное поле в слое микроорганизмов; \vec{E}_3, \vec{H}_3 – электромагнитное поле вне биообъекта. Тогда условие непрерывности на границе раздела сред примет вид

$$(E_\theta^1 - E_\theta^2)|_{r=R} = 0, (E_\phi^1 - E_\phi^2)|_{r=R} = 0, \quad (4)$$

$$(E_\theta^2 - E_\theta^3 - E_\theta^b)|_{r=R+h} = 0, (E_\phi^2 - E_\phi^3 - E_\phi^b)|_{r=R+h} = 0, \quad (5)$$

$$(H_\theta^2 - H_\theta^3 - H_\theta^b)|_{r=R+h} = 0, (H_\phi^2 - H_\phi^3 - H_\phi^b)|_{r=R+h} = 0,$$

где $E_\theta^b, E_\phi^b, H_\theta^b, H_\phi^b$ – компоненты возбуждающего поля \vec{E}^b, \vec{H}^b .

Условия излучения (3) можно представить в следующей форме [5,7], справедливой при $kr \rightarrow \infty$

$$E_\theta^3 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}H_\phi^3 = F_1(\theta, \phi)\frac{e^{ikr}}{kr}\left[1 + O\left(\frac{1}{kr}\right)\right], \quad (6)$$

$$E_\phi^3 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}H_\theta^3 = F_2(\theta, \phi)\frac{e^{ikr}}{kr}\left[1 + O\left(\frac{1}{kr}\right)\right].$$

Здесь символ $O\left(\frac{1}{kr}\right)$ обозначает величину меньшую $1/kr$ или того же порядка.

Таким образом, задача дифракции волн на биообъекте состоит в определении электромагнитного поля, компоненты $E_r, E_\theta, E_\phi, H_r, H_\theta, H_\phi$ которого удовлетворяют системе уравнений (1), (2), граничным условиям (4), (5) и условию излучения (6). Для

решения задачи (1)–(5) были использованы потенциалы Дебая [8, 9] и метод разделения переменных в сферической системе координат [10]. Как показано в [8], общее решение системы уравнений (1), (2) можно свести к решению двух скалярных уравнений Гельмгольца для электрического U и магнитного V потенциалов Дебая

$$\Delta U_1 + k_1^2 U_1 = 0, \quad \Delta U_2 + k_2^2 U_2 = 0, \quad \Delta U_3 + k^2 U_3 = 0, \quad (7)$$

где Δ – оператор Лапласа в сферической системе координат

$$\Delta = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right),$$

U_1, U_2, U_3 – электрические потенциалы Дебая.

U_1 – описывает поле дифракции внутри биообъекта при $r < R$; U_2 – описывает поле дифракции внутри слоя микроорганизмов при $R < r < R+h$ и U_3 – описывает поле дифракции вне биообъекта и слоя микроорганизмов при $r > R+h$. Тогда компоненты поля дифракции в этих трех областях пространства можно представить в следующем виде

$$E_r^1 = \frac{1}{k_1}\left[\frac{\partial^2(rU_1)}{\partial r^2} + k_1^2 rU_1\right], \quad E_\theta^1 = \frac{1}{k_1 r}\frac{\partial^2(rU_1)}{\partial r\partial\theta},$$

при

$$r < R \quad (8)$$

$$E_\phi^1 = 0, \quad H_r^1 = H_\theta^1 = 0, \quad H_\phi^1 = -\frac{1}{r}\frac{\partial(rU_1)}{\partial\theta},$$

$$E_r^2 = \frac{1}{k_2}\left[\frac{\partial^2(rU_2)}{\partial r^2} + k_2^2 rU_2\right], \quad E_\theta^2 = \frac{1}{k_2 r}\frac{\partial^2(rU_2)}{\partial r\partial\theta},$$

при

$$R < r < R+h \quad (9)$$

$$E_\phi^2 = 0, \quad H_r^2 = H_\theta^2 = 0, \quad H_\phi^2 = -\frac{1}{r}\frac{\partial(rU_2)}{\partial\theta},$$

$$E_r^3 = \frac{1}{k}\left[\frac{\partial^2(rU_3)}{\partial r^2} + k^2 rU_3\right], \quad E_\theta^3 = \frac{1}{k r}\frac{\partial^2(rU_3)}{\partial r\partial\theta},$$

при $r < R+h$

(10)

$$E_\phi^3 = 0, \quad H_r^3 = H_\theta^3 = 0, \quad H_\phi^3 = -\frac{1}{r}\frac{\partial(rU_3)}{\partial\theta},$$

где

$$k_1 = k\sqrt{\varepsilon_1}, \quad k_2 = k\sqrt{\varepsilon_2}.$$

Итак, исходная векторная задача дифракции сведена к уравнениям Гельмгольца для потенциалов Дебая. Решение этой задачи можно построить с помощью метода разделения переменных. Этот метод состоит в том, что сначала строятся частные решения уравнений (7) представляющие собой произведение функций, каждая из которых зависит только от одной переменной (r или θ). Такие решения хорошо известны [10] и имеют вид

$$V_n(r, \theta) = P_n(\cos \theta) R_{n+1/2}(k_p r),$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, \quad p = 1, 2, \quad (11)$$

где $P_n(\cos \theta)$ – ортонормированные полиномы Лежандра, $R_{n+1/2}(\dots)$ – цилиндрические функции полуцелого индекса.

С помощью этих частных решений можно построить общие решения уравнений (7) в виде бесконечных рядов по полиномам Лежандра. Эти решения для каждой из трех областей ($r < R$, $0 < \theta < \pi$), ($R < r < R+h$, $0 < \theta < \pi$), ($r > R+h$, $0 < \theta < \pi$) можно представить в виде

область $r < R$

$$U_1 = \frac{1}{k_1 r} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) a_n \psi_n(k_1 r) P_n(\cos \theta), \quad (12)$$

область $R < r < R+h$

$$U_2 = \frac{1}{k_2 r} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) \times$$

$$\times (b_n \psi_n(k_2 r) + c_n \eta_n(k_2 r)) P_n(\cos \theta), \quad (13)$$

область $r > R$

$$U_3 = \frac{1}{kr} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) d_n \eta_n(kr) P_n(\cos \theta). \quad (14)$$

Интегральный эффект от воздействия возбуждающего поля на слой микроорганизмов можно оценить с помощью усредненной по объему слоя напряженности электрического поля. В результате преобразований для расчёта среднего электрического поля было получено уравнение:

$$E_{cp} = \sqrt{|E_r^{cp}|^2 + |E_{\theta}^{cp}|^2}, \quad (15)$$

где

$$E_r^{cp} = \frac{E_0 e^{ik(d-R-h)}}{k_2 R \bar{A}_0} [\bar{D}_0 (1 + ik_2 R) + \cos(k_2 R) - k_2 R \sin(k_2 R)], \quad (16)$$

$$E_{\theta}^{cp} = \frac{E_0 e^{ik(d-R-h)}}{4k_2 R \bar{A}_1} [\sin(k_2 R) - i \bar{D}_1]. \quad (17)$$

$$\bar{D}_0 = \frac{\sin(k_2 R) \cos(k_1 R) - \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \cos(k_2 R) \sin(k_1 R)}{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \sin(k_1 R) + i \cos(k_1 R)}, \quad (18)$$

$$\bar{D}_1 = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \cos(k_1 R) \sin(k_2 R) - \cos(k_2 R) \sin(k_1 R)}{i \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \cos(k_1 R) + \sin(k_1 R)}, \quad (19)$$

$$\bar{A}_0 = i \bar{D}_0 e^{ik_2 h} \left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}} - 1 \right) - i \cos(k_2 (R+h)) -$$

$$- \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}} \sin(k_2 (R+h)), \quad (20)$$

$$\bar{A}_1 = i \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}} \right) e^{ik_2 h} \bar{D}_1 - \sin(k_2 (R+h)) -$$

$$- \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}} \cos(k_2 (R+h)). \quad (21)$$

На основании (15) были проведены численные расчеты величины E_{cp} нормированной на E_0 – величину напряженности электрического поля возбуждающей сферической волны. В качестве геометрических и электродинамических параметров характеризующих биообъект и слой микроорганизмов были выбраны: $\varepsilon_1 = \varepsilon_1' + i\varepsilon_1''$, $\varepsilon_1' = 20$, $\varepsilon_1'' = 5$ – реальная и мнимая части относительной диэлектрической проницаемости биообъекта;

$\varepsilon_2 = \varepsilon_2' + i\varepsilon_2''$, $\varepsilon_2' = 10$, $\varepsilon_2'' = 3$ – реальная и мнимая части относительной диэлектрической проницаемости слоя микроорганизмов; $R = 30$ мм и $h = 10^{-4}$ мм – соответственно, радиус шара моделирующего биообъект и толщина слоя микроорганизмов. Расчеты проводились в диапазоне частот $50 \text{ ГГц} \leq f \leq 90 \text{ ГГц}$. Выбор этого диапазона частот обусловлен тем, что при таких частотах электромагнитное поле возбуждающей волны практически не проникает в середину биообъекта.

На рис. 2. приведены результаты расчетов зависимости величины E_{cp}/E_0 от частоты возбуждающей электромагнитной волны.

Как видно из рис. 2, частотная зависимость среднего поля имеет резонансное поведение. Максимальное значение среднего поля достигается на частоте $f = 75 \text{ ГГц}$.

В результате теоретических исследований была решена задача дифракции электромагнитных волн на яблоках с поверхностным слоем грибковых микроорганизмов. Решение задачи было сведено к решению двух уравнений Гельмгольца для потенциалов Дебая. В результате данных исследований было установлено, что для уничтожения грибковых микроорганизмов на поверхности яблок следует использовать электромагнитное излучение с частотой 75 ГГц.

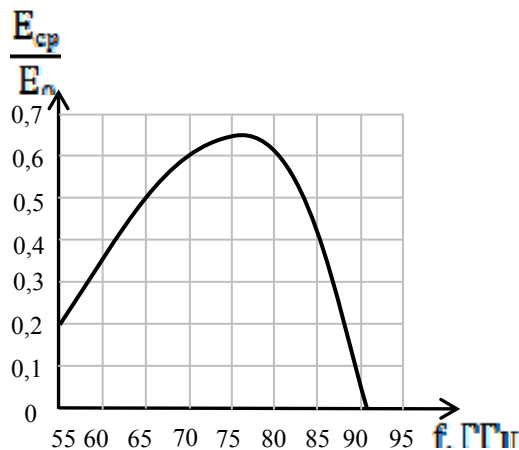


Рис. 2 – Зависимость нормированной средней напряжённости электрического поля от частоты возбуждающей волны

Выводы

1. Для установления диапазона изменений биотропных параметров ЭМП (частота, мощность, экспозиция) необходимых для уничтожения микроорганизмов на поверхности яблок следует использовать модель в виде шара, который покрыт тонким сферическим слоем с микроорганизмами.

2. Уничтожение микроорганизмов на поверхности яблок следует проводить с использованием электромагнитного излучения в диапазоне частот 73–77 ГГц.

Список литературы:

1. Федюшко, Ю. М. Анализ технологий зберігання фруктоплодів [Текст] / Ю. М. Федюшко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2016. – № 175. – С. 160–161.
2. Каширская, Н. Я. Болезни семечковых культур [Текст] / Н. Я. Каширская. – Мичуринск, 2006. – 164 с.
3. Гудковський, В. А. Прогресивні технології хранения плодів [Текст] / В. А. Гудковський, А. А. Кладь, Л. В. Кожина, А. Е. Балакирев, Ю. Б. Назаров // Достижения науки и техники. АПК. – 2009. – № 2. – С. 66–68.
4. Федюшко, Ю. М. Біофізичні передумови для знищення шкідливих мікроорганізмів на плодах яблуна електромагнітною енергією [Текст] / Ю. М. Федюшко, А. Д. Черенков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК

- України». – 2016. – № 176. – С. 93–94.
5. Семенов, А. А. Теория электромагнитных волн [Текст] / А. А. Семенов. – М.: МГУ, 1962. – 256 с.
6. Konstantinov, I. S. Theoretical Analysis of Electromagnetic Field Electric Tension Distribution in the Seeds of Cereals [Text] / I. S. Konstantinov, A. V. Mamatov, V. A. Sapryka, A. D. Cherenkov, A. V. Sapryka, N. G. Kosulina // Research journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2015. – № 6 (6). – P. 1686–1694.
7. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
8. Иванов, Е. А. Дифракция электромагнитных волн на двух телах [Текст] / Е. А. Иванов. – Минск: Наука и техника, 1968. – 584 с.
9. Konstantinov, I. S. Decision algoritom of near-field microwave soundinq [Text] / I. S. Konstantinov, A. V. Mamatov, V. A. Sapryka, A. D. Cherenkov, A. V. Sapryka, A. E. Poedinchuk // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10. – P. 45186–45189.
10. Вайнштейн, Л. А. Электромагнитные волны [Текст] / Л. А. Вайнштейн. – Радио и связь, 1988. – 440 с.

Bibliography (transliterated):

1. Fediushko, Yu. M. (2016). Analiz tekhnologii zberihannia fruktuplodiv. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva im. P. Vasylenka «Problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberzhennia v APK Ukrainy», 175, 160–161.
2. Kashirskaja, N. Ja. (2006). Bolezni semechkovykh kul'tur. Michurinsk, 164.
3. Gudkovskij, V. A., Klad', A. A., Kozhina, L. V., Balakirev, A. E., Nazarov, Ju. B. (2009). Progressivnye tehnologii hranenija plodov. Dostizhenija nauki i tehniki. APK, 2, 66–68.
4. Fediushko, Yu. M., Cherenkov, A. D. (2016). Biofizychni peredumovy dla znyschennia shkidlyvykh mikroorhanizmiv na plodakh yabluна elektromahnitnoiu enerhiieiu. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva im. P. Vasylenka «Problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberzhennia v APK Ukrainy», 176, 93–94.
5. Semenov, A. A. (1962). Teorija jelektromagnitnykh voln. Moscow: MGU, 256.
6. Konstantinov, I. S., Mamatov, A. V., Sapryka, V. A., Cherenkov, A. D., Sapryka, A. V., Kosulina, N. G. (2015). Theoretical Analysis of Electromagnetic Field Electric Tension Distribution in the Seeds of Cereals. Research journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, 6 (6), 1686–1694.
7. Korn, G., Korn, T. (1974). Spravochnik po matematike dla nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Moscow: Nauka, 832.
8. Ivanov, E. A. (1968). Difrakcija jelektromagnitnykh voln na dvuh telah. Minsk: Nauka i tehnika, 584.
9. Konstantinov, I. S., Mamatov, A. V., Sapryka, V. A., Cherenkov, A. D., Sapryka, A. V., Poedinchuk, A. E. (2015). Decision algoritom of near-field microwave soundinq. International Journal of Applied Engineering Research, 10, 45186–45189.
10. Vajnshtejn, L. A. (1988). Jelektromagnitnye volny. Radio i svjaz', 440.

Поступила (received) 18.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Анализ распределения электрического поля на поверхности яблок со слоем микроорганизмов/ А. Ю. Федюшко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 141–145. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Аналіз розподілу електричного поля на поверхні яблук з шаром мікроорганізмів/ О. Ю. Федюшко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С.141–145. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Analysis of the distribution of the electric field on the surface of apples with a layer of microorganisms/ A. Fedyushko // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P. 141–145. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Федюшко Олександр Юрійович – аспірант Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенко, вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: tte_nniekt@ukr.net.

Федюшко Олександр Юрьевич – аспірант Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенко, вул. Алчевських, 44, г. Харків, Україна, 61002; e-mail: tte_nniekt@ukr.net.

Fedyushko Alexander – postgraduate student, Kharkov National Technical University of Agriculture of P. Vasilenko, str. Alchevsky, 44, Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: tte_nniekt@ukr.net.

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНИЙ ДИЗАЙН

УДК 519.682.4

А. В. ХОЛОДКОВА, М. Н. АННАКУЛИЕВ

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА WEB-САЙТА ДЛЯ МУЗЫКАЛЬНОЙ СТУДИИ

Розглядається моделювання бізнес-процесів при використанні CASE-інструментів. Транзакційна складова бізнес-процесу забезпечує збір, накопичення та обробку кількісних даних про поточний стан об'єкта управління, а також аналітичну складову, яка забезпечує аналіз кількісних показників, що склалися в транзакційній складовій. Аналітична складова бізнес-процесу зобов'язана здійснити дослідження кількісних показників в різних розрізах і вимірах. Виконання такого багатоаспектного аналізу реалізує інформаційну підтримку прийняття рішень, які спрямовані на вирішення поставленої проблеми. Для створення моделі бізнес-процесу «Розробка WEB-сайту і компонент WEB-аналітики для музичної студії» використаний метод IDEF0.

Ключові слова: сайт, бізнес-процес, музична студія, діаграма, користувач, адміністратор, авторизація, веб-ресурси, зворотний зв'язок.

Рассматривается моделирование бизнес-процессов при использовании CASE-инструментов. Транзакционная составляющая бизнес-процесса обеспечивает сбор, накопление и обработку количественных данных о текущем состоянии объекта управления, а также аналитическую составляющую, которая обеспечивает анализ количественных показателей, сложившихся в транзакционные составляющие. Аналитическая составляющая бизнес-процесса обязана осуществить исследование количественных показателей в различных разрезах и измерениях. Выполнение такого многоаспектного анализа реализует информационную поддержку принятия решений, которые направлены на решение поставленной проблемы. Для создания модели бизнес-процесса «Разработка WEB-сайта и компонент WEB-аналитики для музыкальной студии» использован метод IDEF0.

Ключевые слова: сайт, бизнес-процесс, музыкальная студия, диаграмма, пользователь, администратор, авторизация, веб-ресурсы, обратная связь.

The modeling of business processes using CASE-tools is considered. Transactional component of the business process provides collection, accumulation and processing of quantitative data on the current state of the management object, as well as an analytical component that provides analysis of the quantitative indicators that have evolved into transactional components. The analytical component of the business process is obliged to carry out the study of quantitative indicators in various sections and dimensions. The implementation of such a multidimensional analysis implements information support for decision-making, which are aimed at solving the problem posed. To create a model of the business process "Development of a WEB-site and a component of WEB-analytics for a music studio" the method IDEF0 was used.

Keywords: site, business process, music studio, diagram, user, administrator, authorization, web resources, feedback.

Введение. Создание сайта в наше время как никогда актуально. С помощью сайтов легче всего донести информацию к широкому кругу пользователей всемирной сети интернет. Все-таки всегда впереди тот, кто владеет информацией. Задачей интернет-ресурсов чаще всего является донесение информации максимальному количеству пользователей. Если же говорить о интернет-магазинах – продать большее количество товара потребителям, сохраняя при этом соотношение цена-качество. Реклама – двигатель прогресса, поэтому актуальность создания сайта не подвергается сомнению. Для того, чтобы создать свой сайт совсем не обязательно создавать крупный корпоративный портал. Достаточно сайта-визитки для того, чтобы донести свою информацию пользователям, тем более, что сайт-визитка не требует знания навыков программиста.

Актуальность веб-ресурсов заключается в оперативности и масштабности подачи информации обширному кругу пользователей, возможности обратной онлайн связи с клиентами из всех стран мира, возможности маркетинговых исследований спроса и предложения, возможности осуществления связи с представителями в других регионах, значительное упрощение процесса продаж, привлечение новых клиентов, необходимости увеличения трафика.

Рассматриваемая нами задача «Разработка WEB-

сайта и компонент WEB-аналитики для музыкальной студии» требует анализа и изучения аналогов. Это необходимо для выявления сильных и слабых сторон других веб-ресурсов. Рассмотрим такие всемирно-известные сайты музыкальных студий: Universal Music Group, DisneyWalt Disney Records, Mute, Sony.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Для создания сайта музыкальной студии необходимо использовать технологию подобного сайта MVC PHP Framework [8]. Несмотря на то, что с концепцией MVC знаком практически каждый веб-разработчик, ее применение в реальных проектах часто вызывает трудности. Главная идея MVC – повторное использование кода и разделение проблем. Материалы многих изданий по PHP основываются на детальном анализе общих принципов, которые помогут следовать MVC в приложении [1, 2, 5].

Актуальность данной статьи в том, что автор анализирует инструмент для создания персональных веб-страниц с самого его возникновения до конечного официального релиза [10]. Также особое внимание в исследовании языка PHP уделено подключению к базам данных. PHP предлагает несколько драйверов и плагины для доступа и обработки MySQL. Компактный многопоточный сервер баз данных MySQL характеризуется большой скоростью, устойчивостью и легкостью в использовании [4, 9, 10].

© А. В. Холодкова, М. Н. Аннакулиев. 2017

Цель и задачи анализа существующих аналогов. Целью данной статьи является анализ существующих аналогов, что реализуют функции предметной области, построение диаграммы бизнес-процессов в стандарте IDEF0, разработка декомпозиции и описание каждого отдельного бизнес-процесса «Разработка WEB-сайта и компонент WEB-аналитики для музыкальной студии».

Материалы и методы анализа существующих аналогов. Методология IDEF0 предназначена для функционального моделирования. В целом методология показывает моделирование. Для этого выполняется описание графической модели, которая показывает выполнение задачи, когда и кем она реализуется в рамках функционирования любой компании и предприятия.

Следовательно, стандарту IDEF0 любой процесс может быть описан в виде блока (активность Box).

Блок состоит из входов-выходов. Процесс заключается в преобразовании входов в выходы под влиянием управления и при наличии необходимых ресурсов. Выходы разрабатываемого процесса в дальнейшем могут быть либо входами для следующего процесса или ресурсов или средствами управления

Контекстная диаграмма бизнес-процесса «Разработка WEB-сайта и компонент WEB-аналитики для музыкальной студии» и ее декомпозиция приведены на рис. 1, 2.

Характеристика бизнес-процесса «Авторизация» представлена в табл. 1.

Характеристика бизнес-процесса «Просмотр информации по сайту» представлена в табл. 2.

Характеристика бизнес-процесса «Работа с содержимым сайта» представлена в табл. 3.

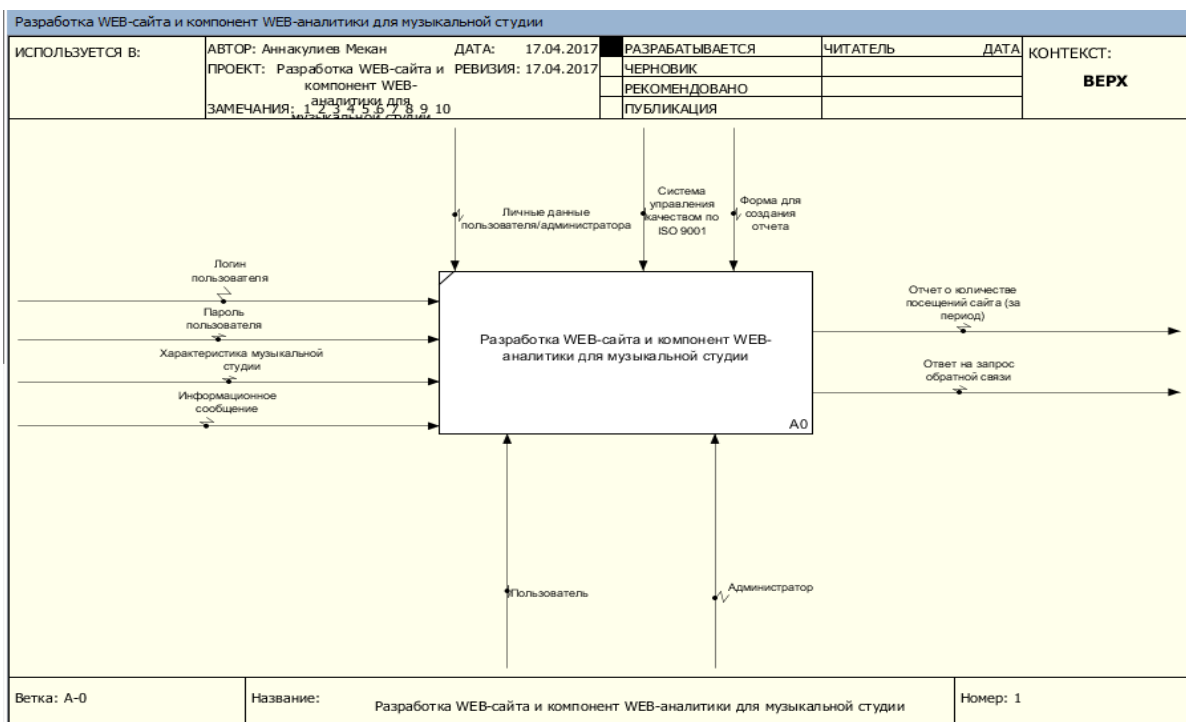


Рис. 1 – Описание бизнес-процесса «Разработка WEB-сайта и компонент WEB-аналитики для музыкальной студии»

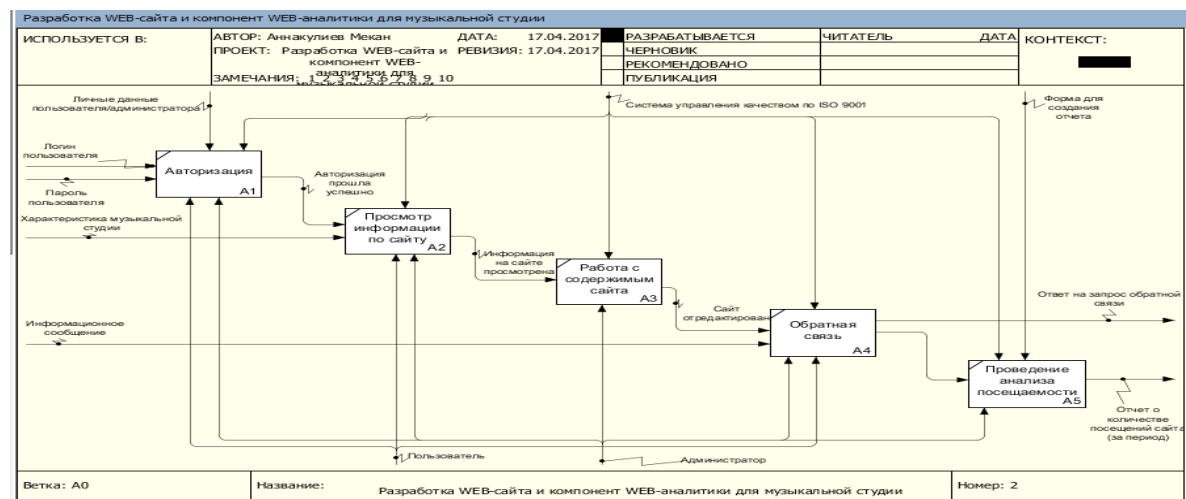


Рис. 2 – Описание декомпозиции бизнес-процесса «Разработка WEB-сайта и компонент WEB-аналитики для музыкальной студии»

Таблица 1 – Характеристика бизнес-процесса «Авторизация»

Название характеристики	Значение характеристики
Имя бизнес-процесса	Авторизация
Основные участники	Пользователь, администратор
Входное событие	Логин пользователя, пароль пользователя
Входящие документы	Личные данные пользователя/администратора, система управления качеством по ISO 9001
Исходное событие	Авторизация прошла успешно

Таблица 2 – Характеристика бизнес-процесса «Просмотр информации по сайту»

Название характеристики	Значение характеристики
Имя бизнес-процесса	Просмотр информации по сайту
Основные участники	Пользователь, администратор
Входное событие	Авторизация на сайте выполнена, характеристика музыкальной студии
Входящие документы	Система управления качеством по ISO 9001
Исходное событие	Информация на сайте просмотрена

Таблица 3 – Характеристика бизнес-процесса «Работа с содержимым сайта»

Название характеристики	Значение характеристики
Имя бизнес-процесса	Работа с содержимым сайта
Основные участники	Администратор
Входное событие	Авторизация администратора на сайте выполнена
Входящие документы	Система управления качеством по ISO 9001
Исходное событие	Сайт отредактирован

Характеристика бизнес-процесса «Обратная связь» представлена в табл. 4.

Таблица 4 – Характеристика бизнес-процесса «Обратная связь»

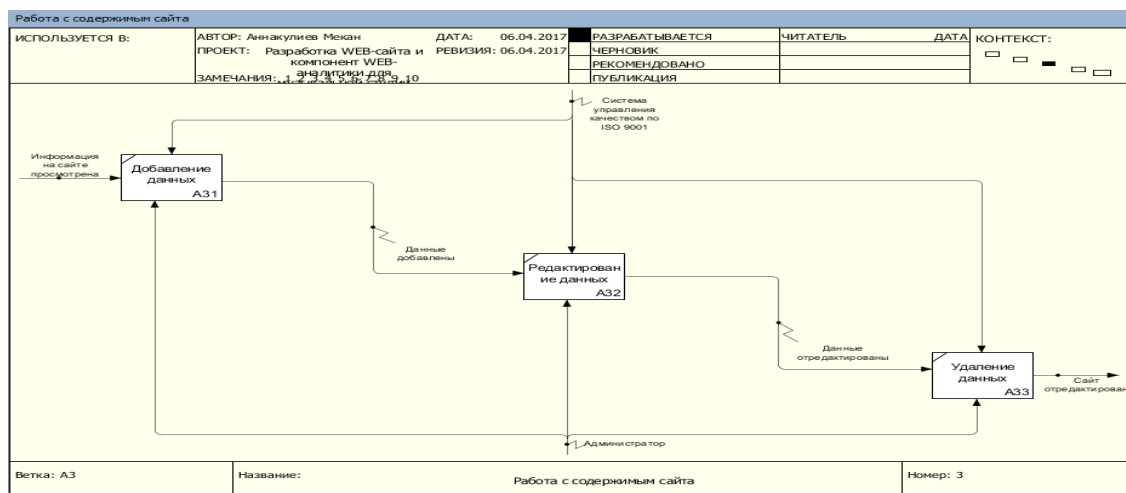
Название характеристики	Значение характеристики
Имя бизнес-процесса	Обратная связь
Основные участники	Пользователь, администратор
Входное событие	Пользователь авторизован, информационное сообщение
Входящие документы	Личные данные пользователя/администратора, система управления качеством по ISO 9001
Исходное событие	Обратная связь установлена
Выходные документы	Ответ на запрос обратной связи

Характеристика бизнес-процесса «Проведение анализа посещаемости» представлена в табл. 5.

Таблица 5 – Характеристика бизнес-процесса «Проведение анализа посещаемости»

Название характеристики	Значение характеристики
Имя бизнес-процесса	Проведение анализа посещаемости
Основные участники	Администратор
Входное событие	Запрос на формирование отчета
Входящие документы	Система управления качеством по ISO 9001, форма для создания отчета
Выходные документы	Отчет о количестве посещений сайта (за период)

Декомпозиция первого уровня для задачи «Работа с содержимым сайта» приведена на рис. 3.



Блок А31. Работа «Добавление данных» имеет следующие интерфейсные дуги:

- вход: информация на сайте просмотрена;
- выход: данные добавлены;
- управления: система управления качеством по ISO 9001;

– механизм: администратор.

Блок А32. Работа «Редактирование данных» имеет следующие интерфейсные дуги:

- вход: данные добавлены;
- выход: данные отредактированы;
- управления: система управления качеством по ISO 9001;

– механизм: администратор.

Блок А33. Работа «Удаление данных» имеет следующие интерфейсные дуги:

- вход: данные добавлены/отредактированы;
- выход: информация на сайте отредактирована;
- управления: система управления качеством по ISO 9001;

– механизм: администратор.

Обзор и анализ существующих аналогов, что реализуют функции предметной области. Рассматриваемая нами задача «Разработка WEB-сайта и компонент WEB-аналитики для музыкальной студии» требует анализа и изучения аналогов. Это необходимо для выявления сильных и слабых сторон других веб-ресурсов. Рассмотрим такие всемирно-известные сайты музыкальных студий: Universal Music Group, DisneyWalt Disney Records, Mute, Sony.

Universal Music Group.

Universal Music Group (сокращённо UMG) – самая крупная в мире бизнес-компания и дочерняя компания лейблов звукозаписи, медиахолдинг. Существуют, так называемый лейбл среди компаний звукозаписи «большая четвёрка», в которую входят самые крупные и влиятельные студии. Самым первым лейблом «большой четвёрки лейблов звукозаписи» является Universal Music Group. Компания принадлежит французскому медиаконгломерату Vivendi SA. Компания имеет региональные представительства в различных странах, в том числе и в Украине, России – «Universal Music Russia», «Ukrainian records». UMG владеет самым большим музыкальным издательством в мире, Universal Music Publishing Group, после приобретения BMG Music Publishing в мае 2007-го года. Главный офис главы компании находится в Париже, Франция. В США главный офис расположен в Нью-Йорке. Также в США компания представлена ещё двумя офисами в Калифорнии – в Юниверсал Сити и в Санта-Монике. Другие офисы компании находятся в Лондоне и Ромфорде, Великобритания.

Компания Universal Music была раньше одним целым с Universal Pictures. Происхождение группы этих компаний тесно связано с формированием ветви Decca Records в 1934 году [1].

В 1962 году ветвь приобрела корпорация MCA Inc.. Существующая ныне организация «UMG» была сформирована в 1998-ом, когда её учредитель Seagram (эта огромная корпорация теперь входит в состав Vivendi SA) приобрёл известный лейбл PolyGram, в свою очередь основанный в 1945 году

компанией Philips. Однако имя Universal Music Group впервые было дано компании на два года раньше, когда был переименован MCA Music Entertainment Group. 25 мая 2007 года Vivendi SA завершил покупку BMG Music Publishing за \$2,19 млрд. после полученного одобрения от Европейского союза [2, 3].

В мае 2006-го года, расследование во главе с нью-йоркским генеральным прокурором Элиотом Спитцером закончилось тем, что медиахолдинг был признан виновным в подкупе американских радиостанций, которые передавали в эфир песни Эшли Симпсон, Брайана МакНайта, Big Tymers, Ника Лаше, Линдсей Лохан и других исполнителей, работающих на лейблы Universal Music Group. Холдинг заплатил \$12 млн. государственным органам за урегулирование конфликтной ситуации.

Известные исполнители, записывавшиеся на лейбле. Алсу (первый российский исполнитель, подписавший контракт с UMG), Megadeth, Rammstein, Entwine, Милен Фармер, t.A.T.u., Apocalyptica, HIM, The Black Eyed Peas, ABBA, Aerosmith, Aqua, Андреа Бочелли, Blue October, Nine Inch Nails, Ministry, Eminem, Е Nomine, Эшли Симпсон, Данни Миноуг, Ich+Ich, Ник Лаше, Линдсей Лохан, Akon, Dolphin, Soulwax, Killerpilze, Lady Gaga, Rihanna, Майли Сайрус, Guns N' Roses, Tokio Hotel, Hollywood Undead. В мае 2007 года холдинг UMG был обвинен в злоупотреблении DMCA (Закон об Авторском Праве в Цифровую Эпоху), после того как заставил YouTube удалить видео американского комментатора и блогера Мишель Малкин. В своем видео Мишель позволила себе резкость в адрес певца Akon, прокомментировав видеозипод с участием исполнителя, как «унижение женского достоинства». Но, в конце концов, UMG отступились от своих претензий, после того как в ситуацию вмешалась правозащитная организация Electronic Frontier Foundation.

DisneyWalt Disney Records.

Звукозаписывающий лейбл компании DisneyWalt Disney Records является семьёй музыкальных лейблов, принадлежащих компании Walt Disney. Walt Disney Records были сформированы в 1956 году как Disneyland Records. До этого времени диснеевские записи лицензировались целым рядом других лейблов, таких как RCA, Decca, Capitol, и ABC-Paramount. Брат Уолта Диснея Рой О. Дисней предложил, чтобы Walt Disney Productions (в настоящее время Walt Disney Company) организовали свой собственный лейбл. Рой поручил старому сотруднику компании Джимми Джонсону возглавить это новое подразделение – Disneyland Records. Лейбл принял нынешнее название в 1989 году. Джимми Джонсон пригласил Тутти Камароту (известного музыканта и основателя легендарных Sunset Sound Records в Голливуде), чтобы возглавить творческое начало этого нового предприятия. Опыт и мастерство Тутти превратили первоначальные разработки лейбла в полноформатные музыкальные альбомы, в том числе джазовые интерпретации диснеевских стандартов («Белоснежка и семь гномов», «Бэмби», и «Золушка») и альбомы с оригинальной музыкальной концепцией, и расширил формат саундтреков путём включения избранных частей

из партитуры, а также известных песен. Работа Тутти в рамках музыкальной индустрии привела к успеху таких исполнителей, как Мэри Мартин, Луис Армстронг, Луи Прима, Джерри Колонна и Фил Харрис.

В поисках подходящего материала для Аннет, Тутти и его команда обнаружили песни дуэта Ричарда М. Шермана и Роберта Б. Шермана, услышав одну из их песен на радио. Дуэт был принят в студию Диснея в городе Бербанк, где они в конечном итоге стали первыми авторами песен для компании Disney. Они не только написали много песен для Аннет, но были также ответственны за большинство знаковых песен Диснея 1960-х годов и позже – «It's a Small World» и «Tiki Tiki Tiki Room» для тематических парков, а также песен из «Мэри Поппинс», «Книги джунглей», Множества приключений Винни-Пуха. В 1989 году Диснейленд лейбл был переименован в Walt Disney Records. Сегодня выбор продуктов Walt Disney Records варьируется от традиционных альбомов и саундтреков до аудиокниг и караоке-альбомов. Walt Disney Records выпускает музыку для фильмов Walt Disney Pictures, а также для оригинальных фильмов Disney Channel, а также для спектаклей Disney.

Mute.

Британский инди-лейбл, основанный в 1978 Дэниелом Миллером (англ. Daniel Miller), и специализирующийся на альтернативной и независимой музыке, а также поп-музыке, выходящей за рамки массовой культуры. Вначале на лейбле издавались релизы постпанковых и индустриальных групп, таких как Fad Gadget, Einstürzende Neubauten, Throbbing Gristle и Cabaret Voltaire. После вторжения электронной музыки в британские чарты (1981), продукция лейбла расширилась за счёт таких групп, как Depeche Mode, Erasure, Nitzer Ebb, Yazoo. Именно синти-поп-группы Depeche Mode и Erasure принесли Mute Records широкую известность. На Mute также выходили релизы групп альтернативного рока (Sonic Youth).

С 1992 года на подразделении Novamute Records, распространяется продукция из разряда экспериментальной электронной музыки. Среди прочих групп и исполнителей, выпускающихся на Mute Records: Моби, Ник Кейв и Laibach. Главой нового лейбла станет Миллер, в то время как EMI приобретет незначительную долю в капитале компании. Миллер также будет

консультировать EMI в рамках нового соглашения. В качестве помощи, EMI отдаст Миллеру часть артистов из каталога Mute. А также окажет поддержку в сферах администрирования гонораров и других коммерческих дел.

10 мая 2002 года Mute Records был приобретён мейджор-лейблом EMI. Одной из возможных причин, подтолкнувших Миллера на продажу независимого лейбла, была смерть Фрэнка Тови (Fad Gadget), одного из первых музыкантов, работавших с Mute. 22 сентября 2010 года EMI и Дэниел Миллер в Лондоне подписали соглашение, по которому рекорд-гигант поддержит Миллера в основании его второго рекорд-лейбла, который будет действовать под маркой Mute с разрешения EMI. Что позволит ему работать с отделом продаж, распространения, соответствия и лицензирования EMI в США, Великобритании, Канаде и Ирландии, а также обеспечит доступ к сети независимых дистрибьюторов по всему миру.

Компания Sony.

Вторая по величине в мире звукозаписывающая компания. Входит в т.н. «Большую четвёрку». Принадлежит Sony, контролируется Sony Corporation of America. Компания объединяет более 200 лейблов, имеет представительства в 44 странах. Деятельность Sony Music охватывает практически все стороны шоу-бизнеса и включает следующие направления: цифровые и физические продажи музыкального контента, синхронизацию музыки для фильмов, рекламы и ТВ, организацию концертов и продажу имиджа артистов для рекламного использования. Компания объединяет более 200 лейблов, многие из которых стали легендарными за долгое время своей успешной работы – это Columbia, RCA, Arista, Epic и другие. Sony Music стала родным домом для знаменитых артистов XX века: Элвиса Пресли, Майкла Джексона, AC/DC, Boney M., Eruption, Milli Vanilli, Адриано Челентано, Майлза Дэвиса, Боба Дилана, Барбары Стрейзанд, Селин Дион, Оззи Осборна и множества других. Сегодня ситуация не изменилась, с Sony Music работают Kasabian, Бритни Спирс, Бейонсе, Алиша Киз, Леона Льюис, Дайдо, Пинк, Шакира, и др.

Сравнительная характеристика рассмотренных сайтов показана в табл. 6.

Таблица 6 – Сравнительная характеристика рассмотренных сайтов

Название веб-сайта	Universal Music Group	Walt Disney Records	Sony	Mute
Страна	США	США	США	Великобритания
Адресс сайта	http://www.universalmusic.com/label/universal-music-group-nashville/	http://disney.ru/	https://www.sonymusic.com/	http://mute.com/
Удобная панель инструментов	+	+	–	+
Корректное отображение сайта	+	+	+	+
Актуальность содержащейся информации	+	+	+	+
Переход по ссылкам	+	+	+	+
Навигация	+	+	–	–
Новости	+	+	+	+
Обратная связь	+	+	–	–

Выводы. В ходе выполнения данной статьи было выполнено:

1. Анализ предметной области.
 2. Были построены диаграммы бизнес-процессов в стандарте IDEFO.
 3. Разработана декомпозиция и приведено описание каждого отдельного бизнес-процесса «Разработка WEB-сайта и компонент WEB-аналитики для музыкальной студии».
 4. Были проведены обзор и анализ существующих аналогов, что реализуют функции предметной области, а именно такие известные звукозаписывающие студии как Universal Music Group, DisneyWalt Disney Records, Mute, Sony.
- Выполненная будет использована для дальнейшего проектирования сайта.

Список литературы:

1. Хольцнер, С. PHP в примерах [Текст] / С. Хольцнер. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. – 352 с.
2. Ларри, У. Основы программирования на PHP [Текст] / Л. Ульман. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 288 с.
3. Мазуркевич, А. PHP: настольная книга программиста [Текст] / А. Мазуркевич. – Новое знание, 2003. – 480 с.
4. Томсон, Л. Разработка Web-приложений на PHP и MySQL [Текст] / Л. Томсон, Л. Веллинг. – Вильямс, 2003. – 878 с.
5. ISO/IEC. ISO/IEC 25000: Software Engineering – Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Guide to SQuaRE [Electronic resource]. – Available at: <https://www.iso.org/standard/35683.html>
6. McFarland, D. S. CSS3: The Missing Manual Paperback [Text] / D. S. McFarland. – O'Reilly Media, 2012. – 525 p.
7. Разработка сайта и качественного контента [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://yogurt-design.com/razrabotka-](http://yogurt-design.com/razrabotka-internet-sajta-ikachestvennogkontenta/)

8. [internet-sajta-ikachestvennogkontenta/](http://yogurt-design.com/razrabotka-internet-sajta-ikachestvennogkontenta/)
8. Зандстра, М. PHP. Объекты, шаблоны и методики программирования [Текст] / М. Зандстра. – Вильямс, 2014. – 528 с.
9. ISO. ISO/IEC 25010. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models [Electronic resource]. – Available at: <https://www.iso.org/standard/35733.html>
10. Руководство по PHP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://php.net/manual/ru/index.php>

Bibliography (transliterated):

1. Hol'cner, S. (2007). RNR v primerah. Moscow: OOO «Binom-Press», 352.
2. Larri, U. (2011). Osnovy programmirovaniya na RNR. Moscow: DMK Press, 288.
3. Mazurkevich, A. (2003). RNR: nastol'naja kniga programmista. Novoe znanie, 480.
4. Tomson, L., Velling, L. (2003). Razrabotka Web-prilozhenij na RNR i MySQL. Vil'jams, 878.
5. ISO/IEC. ISO/IEC 25000: Software Engineering – Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Guide to SQuaRE. Available at: <https://www.iso.org/standard/35683.html>
6. McFarland, D. S. (2012). CSS3: The Missing Manual Paperback. O'Reilly Media, 525.
7. Razrabotka sajta i kachestvennogo kontenta . Available at: <http://yogurt-design.com/razrabotka-internet-sajta-ikachestvennogkontenta/>
8. Zandstra, M. (2014). PHP. Obekty, shablony i metodiki programmirovaniya, Vil'jams, 528.
9. ISO. ISO/IEC 25010. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models. Available at: <https://www.iso.org/standard/35733.html>
10. Rukovodstvo po RNR Available at: [http://php.net/manual/ru-index.php](http://php.net/manual/ru/index.php)

Поступила (received) 06.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Анализ и разработка web-сайта для музыкальной студии/ А. В. Холодкова, М. Н. Аннакулиев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 146–151.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Аналіз і розробка web-сайту для музичної студії/ А. В. Холодкова, М. Н. Аннакулієв // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 146–151.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Analysis and development of a website for a music studio/ A. Kholodkova, M. Annakuliev //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 146–151. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Холодкова Анна Валеріївна – кандидат технічних наук, кафедра Інформаційних систем, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, пр. Науки, 9-А, м Харків, 61166; тел.: 067-574-50-03; e-mail: anny.kholodkova@gmail.com.

Аннакулієв Мекан Нурмухамедович – студент, кафедра Інформаційних систем, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, пр. Науки, 9-А, м Харків, 61166; e-mail: Mekan.annakuliev@gmail.com.

Холодкова Анна Валеріївна – кандидат технічних наук, преподаватель, Кафедра Информационных систем, Харьковский Национальный Экономический Университет им. С. Кузнеця, пр. Науки, 9-А, г. Харьков, 61166; e-mail: anny.kholodkova@gmail.com.

Аннакулієв Мекан Нурмухамедович – студент, Кафедра Информационных систем, Харьковский Национальный Экономический Университет им. С. Кузнеця, пр. Науки, 9-А, г. Харьков, 61166.

Kholodkova Anna – PhD, teacher, information systems department, Kharkov National of Economic University S. Kuznets; ave. Nauky, 9-A, Kharkiv, Ukraine, 61166; e-mail: anny.kholodkova@gmail.com.

Annakuliev Mekan – students, information systems department, Kharkov National of Economic University S. Kuznets, ave. Nauky, 9-A, Kharkiv, Ukraine, 61166; tel.: 096-919-69-72; e-mail: Mekan.annakuliev@gmail.com.

ЗМІСТ

Буря А. И., Калининченко С. В., Томина А. – М. В., Баглюк Г. А. Исследование физико-механических характеристик графитопластов.....	3
Колоскова А. Н. Классификатор многослойных комбинированных упаковочных материалов.....	7
Ниркова Л. І. Аналіз впливу комбінації стрес-корозійних чинників на корозійне розтріскування від напруження трубної сталі при рН, близьких до нейтральних.....	12
Адоньєв Є. О., Верещага В. М., Лисенко К. Ю. Розробка узагальненої техніки алгебраїчного формування Б-функцій для чотирьох точок.....	17
Беляев А. В., Зубков О. В., Тарасов К. С., Карташов В. М. Обработка сигналов в универсальном мультимедийном стрелковом тренажере.....	23
Димко Є. П., Юрченко В. В., Шамрай А. В., Княшко С. Ю., Дьоміна А. В., Макаренко Д. М. Параметрична класифікація як основа системи підтримки прийняття рішень для управління виплавою зносостійкого чавуну	30
Баженов В. Г., Івіцький І. І., Івіцька Д. К. Експериментальне дослідження електростатичного методу неруйнівного контролю дефектів у полімерних матеріалах	34
Ковалева Е. А., Мисюра Е. Ю. Новые подходы к расчету себестоимости централизованного теплоснабжения	40
Мілютіна О. С., Левченко С. А. Статистичний аналіз графіків навантаження трансформаторної підстанції.....	48
Москалец Н. В. Сравнительная оценка методов определения направления прихода сигналов на основе выборочной корреляционной матрицы	53
Становський О. Л., Валід Шер Хуссаян, Лебедєва О. Ю., Становська Т. П., Торопенко А. В., Швець П. С. Моделювання та оптимізація поліматеріальних об'єктів в САПР за допомогою метода віртуальної моделі.....	61
Трикоз Л. В., Багіяц І. В. Змінення переробної спроможності сортувальних пристроїв через надійність характеристик верхньої будови колі	68
Негруб С. Л., Володько Є. Г. Обзор достижень в області електролітно-плазмового полірування виробів з титанових сплавів.....	74
Исмайылова Д. Д. Задача кручения радиально-неоднородного цилиндра	82
Коваленко В. Л., Коток В. А. Изучение характеристик Ni(OH) ₂ , полученного в щелевом диафрагменном электролизере при различной концентрации сульфата натрия	88
Яковлева И. Г., Петрик А. А. К вопросу определения концентрации газов в ванной сталеплавильных агрегатов	94
Письменный С. В. Методика визначення активної зони склепоутворення на контурі підземно-транспортної виробки при комбінованій розробці залізрудних родовищ.....	99
Чиби́чик О. А., Степаненко Р. Н., Горощенко А. Н., Гриценко Д. В., Салтыков Л. А., Макаренко Д. Н. Оптимизация технологических режимов литья под низким давлением al-mg сплава по критерию максимума жидкотекучести.....	106
Шумська Л. П. Пориста теплоізоляція на основі глинозему.....	110
Радов Д. Г., Маслов В. П., Дорожинский Г. В. Виявлення отруйних домішок в етанолі методом поверхневого плазмонного резонансу.....	117
Івасенко В. М., Винниченко Т. О. Оцінка впливу автозаправних станцій на навколишнє середовище.....	123
Бородай И. И. Влияние внешнего электромагнитного поля на обменные процессы в плодах фруктов	131
Дупенко О. О., Трикіло А. І. Визначення рівняння регресії очищення фенольних стічних вод з додаванням біогеної добавки карбаміду	136
Федюшко А. Ю. Анализ распределения электрического поля на поверхности яблок со слоем микроорганизмов.....	141
Холодкова А. В., Аннакулиев М. Н. Анализ и разработка web-сайта для музыкальной студии.....	146

CONTENTS

Burya A., Kalinichenko S., Tomina A. – M., Bahliuk G. Investigation of physico-mechanical characteristics of graphite plastics	3
Koloskova G. Classifier of multi-layer combined packaging materials	7
Nyrkova L. Analysis of influence of stress-corrosion factors combination on stress-corrosion cracking of pipe steel at near neutral pH	12
Adoniev Y., Vereshchaga V., Lysenko K. Development of a generalized technique for the algebraic formation of B-functions for four points	17
Beliaiev O., Zubkov O., Tarasov K., Kartashov V. Signal processing in the universal multimedia shooting simulator.....	23
Dymko I., Yurchenko V., Shamrai A., Kyiashko S., Domina A., Makarenko D. Parametric classification as the basis of a decision support system for the control of wear-resistant cast iron smelting	30
Bazhenov V., Ivitskiy I., Ivitska D. Experimental study of electrostatic method of nondestructive testing of defects in polymeric materials	34
Kovaleva K., Misura J. New approaches to calculating the cost of district heating	40
Milyutina O., Levchenko S. Statistical analysis of load graph of transformer substation	48
Moskalets M. Comparative methods of direction of arrival estimation based on a sample correlation matrix	53
Stanovskiy O., Walid Sher Hussain, Lebedeva O., Stanovskay T., Toropenko A., Shvets P. Modeling and optimization polimaterialnyh objects in CAD method using a virtual model	61
Trykoz L., Bagiyanc I. Change the capacity classification yard equipment through reliability features of permanent way	68
Nehrub S., Volodko E. Overview achievements in the field electrolytic-plasma polishing products from titanium alloys	74
Ismayilova J. J. The problem of torsion of a radially inhomogeneous cylinder	82
Kovalenko V., Kotok V. Investigation of characteristics of Ni(OH) ₂ , obtained in the slit diaphragm electrolyzer under different Na ₂ SO ₄ concentrations	88
Jakovleva I., Petrik A. To the question of determining the concentration of gases in the bath of steel-smelting unit.....	94
Pismennyi S. Method for determining the core of the arch of formation on the contour of underground transport excavation in the combined development of iron ore deposits	99
Hcibichik O., Stepanenko R., Horoshchenko O., Hrytsenko D., Saltykov L., Makarenko D. Optimization of technological modes of low-pressure casting of the Al-Mg alloy on the castability maximum criterion.....	106
Shumska L. The porous thermal insulation based on alumina	110
Radov D., Maslov V., Dorozinsky G. Detection toxic impurities in ethanol by surface plasmon resonance method	117
Ivasenko V., Vynnychenko T. Evaluation of petrol stations on the environment	123
Boroday I. Influence of external electromagnetic field on metabolic processes in fruits of fruit	131
Dupenko O., Trukilo A. Determination of regression equations of purification of phenolic wastewater with the addition of nutrient additive – urea	136
Fedyushko A. Analysis of the distribution of the electric field on the surface of apples with a layer of microorganisms	141
Kholodkova A., Annakuliev M. Analysis and development of a website for a music studio.....	146

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

Збірник наукових праць

Серія:

Механіко-технологічні системи та комплекси

№ 16(1238) 2017

Наукові редактори: д-р техн. наук, проф. Д. О. Дьомін
д-р техн. наук, проф. О. В. Акімов
Технічний редактор П. С. Пензев

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».
Кафедра ливарного виробництва.
Тел. (057) 707-68-54; e-mail: c7508990@gmail.com

Обл.-вид. №9-17

Підп. до друку 22.05.2017р. Формат 60x84/16. Надруковано на різнографі
Gestetner 6123CP. Ум.-друк. арк. 8. Облік.вид.арк. 8,75.
Наклад 100 прим. Зам. № 18-17. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи
ДК №3657 від 24.12.2009
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня "Технологічний Центр"
Свідоцтво про державну реєстрацію №1 480 120 0000 021055 від 02.04.2002
Адреса: 61145, м. Харків, вул. Шатилова дача,4, тел. (057)750-89-90