

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

## **ВІСНИК**

### **НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"**

*Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси»*

№ 4(1176)2016

Збірник наукових праць

Видання засноване в 1961 р.

Харків  
НТУ «ХПІ», 2016

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ».**Збірник наукових праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х.: НТУ „ХПІ” – 2016р. – No4(1176) – 150 с.

**Державне видання**

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України**

**КВ No5256 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. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф.; В. Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. ДОМНІН, д-р техн. наук, проф.; В. В. ЄПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.; П. О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В. Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.; С. І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.; В. І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Г. В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.; О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.; В. І. НІКОЛАЄНКО, канд. іст. наук, проф.; П. Г. ПЕРЕРВА, д-р екон. наук, проф.; В. А. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.; М. І. РИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.; Г. М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. ТИМОФІЄВ, д-р техн. наук, проф.; М. А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.

**Редакційна колегія серії:**

**Відповідальний редактор:** 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, Соболь О. В., д-р фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Шоман О.В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Jozef Voynarovsky, 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 квітні 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 № 1 від «29» січня 2016 р.

УДК 621.383.4

Н. В. ДЕЙНЕКО

**ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ОСВЕЩЕННОСТИ НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ CdS/CdTe**

Приведены результаты исследований влияния уровня освещенности на выходные параметры солнечных элементов на основе CdS/CdTe с тыльными контактами, изготовленными согласно различным вариантам конструктивно-технологического решения. На основании полученных результатов выходных параметров и световых диодных характеристик обоснован выбор оптимального конструктивно-технологического решения тыльных контактов к солнечным элементам на основе CdS/CdTe. Показано, что использование нанослоя Cu позволяет получить деградационно-стойкие солнечные элементы, которые демонстрируют максимальную эффективность при уровне освещенности характерной для Харьковской области.

**Ключевые слова:** пленочный солнечный элемент, гетероструктура, теллурид кадмия, выходные параметры, тыльный контакт

Наведено результати досліджень впливу рівня освітленості на вихідні параметри сонячних елементів на основі CdS / CdTe з тильними контактами, виготовленими згідно з різними варіантами конструктивно-технологічного рішення. На підставі отриманих результатів вихідних параметрів і світлових діодних характеристик обґрунтовано вибір оптимального конструктивно-технологічного рішення тильних контактів до сонячних елементів на основі CdS / CdTe. Показано, що використання нанослою Cu дозволяє отримати деградаційно-стійкі сонячні елементи, які демонструють максимальну ефективність при рівні освітленості що характерна для Харківської області.

**Ключові слова:** плівковий сонячний елемент, гетероструктура, телурид кадмію, вихідні параметри, тильний контакт

The paper discusses issues related to the study of the effect of light levels on the efficiency of solar cells based on CdS / CdTe with the back contacts that contain Cu and which are made without Cu layer.

The result of the study have output parameters and light-diode characteristics of solar cells ITO / CdS / CdTe / Cu / Au and ITO / CdS / CdTe / Au at different light levels.

For the first time it found that the absence of the copper layer on the back surface efficiency ITO / CdS / CdTe / Cu / Au film solar cell is limited to a level of 3–4 %. In forming the low-resistance tunnel junction Cu / Au efficiency of solar cells based on ITO / CdS / CdTe increases to 10.4 %. Maximum efficiency of laboratory samples of solar cells is fixed at the power of solar radiation of 70 mW / cm<sup>2</sup>, which corresponds to the power of solar radiation, which is typical for the area of Kharkiv region.

Developed construction and technological solutions of solar cells ITO / CdS / CdTe / Cu / Au, which allow to receive lab samples with an efficiency of over 10 %.

**Keywords:** film solar cell, heterostructure, cadmium telluride, the output parameters, the back contact

**Введение.** Пленочные солнечные элементы (далее – СЭ) на основе теллурида кадмия являются перспективными для широкомасштабного промышленного производства. Однако доля выпускаемых СЭ на основе CdTe не превышает 26 %, производятся в промышленных масштабах всего несколькими зарубежными компаниями. Ограничение промышленного выпуска таких СЭ, несмотря на высокую технологичность методов получения пленок сульфида и теллурида кадмия, обусловлено физико-технологическими проблемами формирования тыльных контактов к базовым слоям теллурида кадмия р-типа электропроводности.

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Одним из современных направлений повышения эффективности пленочных СЭ на основе CdS / CdTe является увеличение фактора заполнения световой ВАХ путем снижения последовательного сопротивления СЭ при оптимизации конструктивно-технологического решения тыльных контактов [1, 2]. Использование омического контакта к базовым слоям р-CdTe в условиях промышленного производства не является экономичным, поскольку только платина имеет необходимую для формирования омического перехода работу выхода электронов [3]. Поэтому к слоям р-CdTe традиционно формируют туннельные контакты, используя при этом тонкие пленки, содержащие медь или халькогенид меди [4]. Однако диффузия меди в базовый слой приводит к деградации выходных параметров пленочных СЭ на основе CdS/CdTe [5–7]. Поэтому в настоящее время ведутся

интенсивные исследования по разработке тыльных контактов, которые медь не содержат. Однако, как правило, применение таких контактов не позволяет формировать высокоэффективные СЭ.

Наряду с теоретической моделью, описывающей тыльные контакты к CdTe в рамках идеального туннельного диода, разработаны и нашли свое экспериментальное подтверждение модели обращенного и сквозного диода [8, 9].

Однако, несмотря на успехи в построения физических моделей оптимальных тыльных контактов к базовым слоям теллурида кадмия, комплексные работы их экспериментальной апробации, за редким исключением, не проводятся.

**Цель и задачи исследования.** Целью данной работы является определение влияния уровня освещенности на выходные параметры солнечных элементов на основе CdS/CdTe с тыльными контактами, изготовленными согласно различным вариантам конструктивно-технологического решения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

– провести анализ выходных параметров и световых диодных характеристик солнечных элементов ITO/CdS/CdTe/Cu/Au и ITO/CdS/CdTe/Au при различных уровнях освещенности;

– установить, влияние прослойки меди, на тыльной поверхности пленочных солнечных элементов, и уровня освещенности на эффективность работы приборной структуры.

© Н. В. Дейнеко, 2016

**Матеріали і методи дослідження.** Базові пліночні гетеросистеми CdS/CdTe осаждалися методом термічного вакуумного випарення в єдиному технологічному циклі. пліночну гетероструктуру Cu/Au нанорозмірної товщини, також здійснювалось цим методом. Нанесення тильних контактів плінок ІТО (оксидів індія і олова) здійснювалось методом нерективного магнетронного розпилення на постійному тоці з використанням оригінального матеріалосберегаючого магнетрона. Перед нанесенням тильних контактів поверхню теллурида кадмія травилась в 5 % розчині брома в метанолі на протязі 10 секунд. Завдяки методу термічної конденсації без нагріву підложки на поверхню базового шару наносились шари міді товщиною 12 нм і плівка золота товщиною 50 нм. Після цього здійснювався отжиг на повітрі при температурі 200 °С на протязі 30 хвилин. При цьому в течение передшляхуючих 10 хвилин лабораторний зразок нагрівался до вказаної температури отжигу. Крім лабораторних зразків зі стандартними технологічними операціями при формуванні тильних контактів аналізувались СЗ, в конструкції тильних контактів яких прошлойка міді відсутствовала, і які після отримання пліночної гетеросистеми Cu/Au не отжигались.

Для дослідження впливу нанорозмірної прошлойки міді в конструкції тильного контакту на ефективність фотоелектричних процесів в пліночних СЗ ІТО/CdS/CdTe були виміряні світлові

вольт-амперні характеристики (далі – ВАХ) з подальшою їх аналітичною обробкою з використанням комп'ютерного моделювання. Для вимірювання компенсаційним методом в стаціонарному режимі облучення, приблизному до стандартному AM1,5, світлових ВАХ зразків СЗ з площею фотоприймальної поверхні до 2 см<sup>2</sup>, універсальний світлодіодний освітлювач УСО-2 [10], який був вмонтований в лабораторну установку.

Вимірювання проводились для серії зразків з різними конструктивними рішеннями тильного контакту при потужностях освітлення від 10 мВт/см<sup>2</sup> до 100 мВт/см<sup>2</sup> (100 мВт/см<sup>2</sup> відповідає стандартному режиму освітлення AM1).

**Обговорення результатів досліджень.** Путем аналітичної обробки світлових ВАХ з використанням комп'ютерного моделювання, були визначені вихідні параметри і світлові діодні характеристики для кожного режиму освітлення представлені в таблицях 1 і 2.

Було встановлено, що ефективність СЗ при потужності освітлення 1000 Вт/м<sup>2</sup> з тильним контактом Cu/Au більше 10 %, а з тильним контактом Au – 3,1 %, що обумовлено, в першу чергу, великим значенням напруги холостого ходу і фактора заповнення світлової ВАХ.

Залежність густоти току короткого замикання від рівня освітлення для обох типів контактів носить традиційний лінійний характер (рис. 1, а).

Таблиця 1 – Вплив рівня освітлення на вихідні параметри і світлові діодні характеристики ІТО/CdS/CdTe/Cu/Au

Параметри і характеристики	P <sub>c</sub> , мВт/см <sup>2</sup>									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
J <sub>кз</sub> , мА/см <sup>2</sup>	1,9	3,8	5,94	8,3	10,3	12,8	15,0	17,0	19,5	21,2
V <sub>хх</sub> , мВ	697	711	719	720	728	727	729	731	727	731
FF, от. ед.	0,66	0,67	0,67	0,67	0,67	0,663	0,66	0,66	0,66	0,66
КПД, %	8,7	9,1	9,49	10	10	10,29	10,37	10,23	10,36	10,19
J <sub>ф</sub> , мА/см <sup>2</sup>	1,87	3,8	5,95	8,4	10,3	12,8	15,1	17,0	19,5	21,3
R <sub>п</sub> , Ом·см <sup>2</sup>	<1	<1	<1	<1	<1	1,3	1,3	1,4	1,6	1,6
R <sub>ш</sub> , Ом·см <sup>2</sup>	8250	4420	2390	2400	1280	1010	894	741	694	623
A, от. ед.	2,9	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5
J <sub>0</sub> , 10 <sup>-7</sup> А/см <sup>2</sup>	1,3	2,2	2,7	2,7	2,6	2,2	2,6	2,1	1,8	1,9

Таблиця 2 – Вплив рівня освітлення на вихідні параметри і світлові діодні характеристики ІТО/CdS/CdTe/Au

Параметри і характеристики	P <sub>c</sub> , мВт/см <sup>2</sup>									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
J <sub>кз</sub> , мА/см <sup>2</sup>	1,5	3,2	5,0	6,8	8,7	10,7	12,5	14,3	16,1	18,2
V <sub>хх</sub> , мВ	351	361	367	370	373	375	376	377	379	380
FF, от. ед.	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,45
КПД, %	2,6	2,8	3,0	3,0	3,1	3,2	3,2	3,2	3,1	3,1
R <sub>п</sub> , Ом·см <sup>2</sup>	24,8	13,6	9,81	8,23	6,93	6,14	5,52	5,16	4,92	4,74
J <sub>ф</sub> , мА/см <sup>2</sup>	1,6	3,2	5,1	6,9	8,9	10,8	12,7	14,5	16,3	18,4
R <sub>ш</sub> , Ом·см <sup>2</sup>	4·10 <sup>4</sup>	3·10 <sup>6</sup>	6·10 <sup>6</sup>	2·10 <sup>5</sup>	3·10 <sup>6</sup>	3·10 <sup>5</sup>	6·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>7</sup>	8·10 <sup>5</sup>	4·10 <sup>7</sup>
A, от. ед.	2,6	2,7	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
J <sub>0</sub> , 10 <sup>-5</sup> А/см <sup>2</sup>	0,9	1,6	2,2	2,5	2,9	3,3	3,8	4,1	4,3	4,405

При цьому для СЗ з тильним контактом, що містить мідь, при потужності випромінювання 70 мВт/см<sup>2</sup> спостерігається максимальне значення КПД, а для приладних структур з тильним контактом Au КПД незначительно зростає з ростом освітленості. Для СЗ з тильним контактом Cu/Au спостерігається традиційна

логіфімічна залежність напруги холостого ходу від інтенсивності падаючого випромінювання.

Для СЗ з тильним контактом Au величина напруги холостого ходу обмежується на рівні 0,380 В., що свідчить про реалізацію в приладній структурі режиму сквозного діода. Це і обумовлює

словливает ограничение напряжения холостого хода на уровне 0,351 В.

Для СЭ с тыльным контактом Cu/Au с ростом освещенности наблюдается традиционный рост плотности фототока (см. рис. 1, б), который обусловлен ростом концентрации неравновесных носителей заряда при увеличении плотности потока падающих фотонов. С ростом освещенности шунтирующее сопротивление уменьшается, что обусловлено ростом удельной проводимости базового слоя (см. рис. 1, в). Величина последовательного сопротивления от освещенности практически не зависит. Это свидетельствует о том, что преимущественный вклад в величину последовательного сопротивления приборной структуры вносит сопротивление тыльного и фронтального контакта.

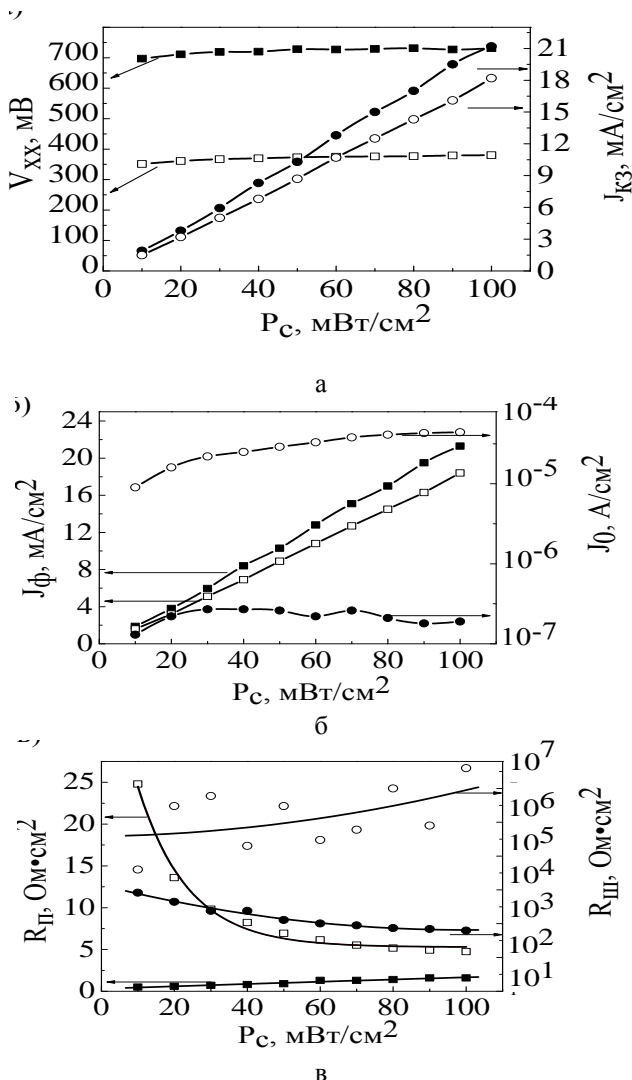


Рис. 1 – Зависимость выходных параметров и световых диодных характеристик СЭ ITO/CdS/CdTe от освещенности: а –  $V_{XX}$  (■ – Cu/Au, □ – Au),  $J_{K3}$  (● – Cu/Au, ○ – Au); б –  $J_\phi$  (■ – Cu/Au, □ – Au),  $J_0$  (● – Cu/Au, ○ – Au); в –  $R_P$  (■ – Cu/Au, □ – Au),  $R_{Ш}$  (● – Cu/Au, ○ – Au)

Действительно, если бы на величину последовательного сопротивления СЭ определяющее влияние оказывало удельное сопротивление базового слоя, то с ростом интенсивности солнечного излучения в результате генерации неравновесных носителей заряда в

базовом слое наблюдалось бы снижение  $R_P$ . Для СЭ с тыльным контактом Au при росте освещенности также наблюдается традиционный рост плотности фототока. В отличие от СЭ с тыльным контактом Cu/Au наблюдается снижение последовательного сопротивления (см. рис. 1, в). При этом необходимо учесть, что такие СЭ, несмотря на меньшую эффективность по сравнению с СЭ с тыльным контактом Cu/Au, характеризуются на порядок большими значениями шунтирующего сопротивления, величина которого от освещенности практически не зависит. Наблюдаемое отличие влияния мощности излучения на световые диодные характеристики СЭ с различными типами контактов обусловлено тем, что для СЭ с тыльным контактом Au реализуется режим сквозного диода в результате формирования микродиодов, которые параллельны основному туннельному контакту. Поскольку микродиоды включены навстречу основному диоду, то это обуславливает высокие значения шунтирующего сопротивления. Поскольку микродиоды, в отличие от туннельного диода, характеризуются существенными размерами области обеднения, то с ростом интенсивности освещения в результате увеличения концентрации неравновесных носителей заряда происходит снижение их размеров, что приводит к наблюдаемому экспериментально снижению последовательного сопротивления СЭ.

## Выводы

В результате проведенных исследований установлено:

1. При отсутствии прослойки меди на тыльной поверхности эффективность пленочных солнечных элементов ITO/CdS/CdTe/Cu/Au ограничивается на уровне 3–4 %, однако при формировании низкоомного туннельного контакта Cu/Au эффективность СЭ на основе ITO/CdS/CdTe увеличивается до 10,4 %.
2. Максимальная эффективность пленочных солнечных элементов ITO/CdS/CdTe/Cu/Au зафиксирована при мощности солнечного излучения 70 мВт/см<sup>2</sup> что соответствует мощности солнечного излучения, которая характерна для местности Харьковской области.

## Список літератури:

1. Bätzner, D. L. Development of efficient and stable back contacts on CdTe/CdS solar cells [Text] / D. L. Bätzner, A. Romeo, H. Zogg, A. N. Tiwari // *Thin Solid Films*. – 2001. – Vol. 387. – P. 151–154. doi:[10.1016/S0040-6090\(01\)00792-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)00792-1)
2. Єрохов, В. Ю. Формування текстур фронтальної поверхні сонячного елемента технологією пористого кремнію [Текст] / В. Ю. Єрохов, А. О. Дружинін, О. В. Єрохова // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2015. – № 1/5 (73). – С. 4–9. doi:[10.15587/1729-4061.2015.36754](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36754)
3. Romeo, N. An innovative process suitable to produce high efficiency CdTe/CdS thin film modules [Text] / N. Romeo, A. Bosio, A. Romeo // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2010. – Vol. 94, № 1. – P. 2–7. doi:[10.1016/j.solmat.2009.06.001](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.06.001)
4. Hill, R. Bandgap effects in thin-film heterojunction solar cells [Text] : Proceeding 12<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, 11–15 April 1994, Amsterdam / by ed. R. Hill, W. Palz, P. Helm. – 1994. – P. 1315–1319.
5. Riech, I. Effect of annealing time of CdCl<sub>2</sub> vapor treatment on CdTe/CdS interface properties [Text] / I. Riech, J. L. Peña, O. Ares, A. Rios-Flores, V. Rejón-Moo, P. Rodríguez-Fragoso, J. G. Mendoza-Alvarez // *Semiconductor Science and Technology*. – 2012. – Vol. 27, № 4. – P. 045015. doi:[10.1088/0268-1242/27/4/045015](https://doi.org/10.1088/0268-1242/27/4/045015)

6. Khrypunov, G. Development organic back contact for thin-film CdS/CdTe solar cell [Text] / G. Khrypunov, S. Bereznev, A. Meriuts, G. Kopach, N. Kovtun, N. Deyneko // *Physics And Chemistry of Solid State*. – 2010. – Vol. 11, № 1. – P. 248–251.
  7. Wu, H. N. p-CdTe/n-CdS photovoltaic cells in the substrate configuration [Text] : PhD thesis / H. N. Wu. – Rochester, 2014. – 104 p.
  8. Karpov, V. G. Physics of CdTe Photovoltaics: from Front to Back [Text] / V. G. Karpov, D. Shvydka, Y. Roussillon // *Materials Research Society Proceedings*. – 2005. – Vol. 865. – P. 307–318. doi:[10.1557/proc-865-f10.1](https://doi.org/10.1557/proc-865-f10.1)
  9. Singh, V. P. Analysis of contact degradation at the CdTe-electrode interface in thin film CdTe-CdS solar cells [Text] / V. P. Singh, O. M. Erickson, J. H. Chao // *Journal of Applied Physics*. – 2000. – Vol. 78, № 7. – P. 4538–4543. doi:[10.1063/1.359796](https://doi.org/10.1063/1.359796)
  10. Світлодіодний освітлювач [Текст] : пат. 33676 України, МПК: [H01L 21/66](https://patents.google.com/patent/H01L21/66), [G01R 31/26](https://patents.google.com/patent/G01R31/26) / Кіріченко М. В., Зайцев Р. В., Копач В. Р., Хрипунов Г. С., Лісачук Г. В.; заявитель и патентообладатель: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – опубл. 10.07.2008, Бюл. № 13. – 3 с.
- References**
1. Bätzner, D. L., Romeo, A. H., Zogg, H., Tiwari, A. N. (2001). Development of efficient and stable back contacts on CdTe/CdS solar cells. *Thin Solid Films*, 387, 151–154. doi:[10.1016/S0040-6090\(01\)00792-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)00792-1)
  2. Yerokhov, V. Yu., Druzhynin, A. O., Yerokhova, O. V. (2015). Front surface texture formation of the solar cell by the porous silicon technology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5(73)), 4–9. doi:[10.15587/1729-4061.2015.36754](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36754)
  3. Romeo, N., Bosio, A., Romeo, A. (2010). An innovative process suitable to produce high-efficiency CdTe/CdS thin-film modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94 (1), 2–7. doi:[10.1016/j.solmat.2009.06.001](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.06.001)
  4. In: Hill, R., Palz, W., Helm, P. (1994). Bandgap effects in thin-film heterojunction solar cells. *Proceeding 12<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Amsterdam (Netherlands), 1315–1319.
  5. Riech, I., Peña, J. L., Ares, O., Rios-Flores, A., Rejón-Moo, V., Rodríguez-Fragoso, P., Mendoza-Alvarez, J. G. (2012). Effect of annealing time of CdCl<sub>2</sub> vapor treatment on CdTe/CdS interface properties. *Semiconductor Science and Technology*, 27 (4), 045015. doi:[10.1088/0268-1242/27/4/045015](https://doi.org/10.1088/0268-1242/27/4/045015)
  6. Khrypunov, G., Bereznev, S., Meriuts, A., Kopach, G., Kovtun, N., Deyneko, N. (2010). Development organic back contact for thin-film CdS/CdTe solar cell. *Physics And Chemistry of Solid State*, 11 (1), 248–251.
  7. Wu, H. T. (2014). p-CdTe/n-CdS photovoltaic cells in the substrate configuration. Rochester: University of Rochester, 104.
  8. Karpov, V. G., Shvydka, D., Roussillon, Y. (2005). Physics of CdTe Photovoltaics: from Front to Back. *Materials Research Society Proceedings*, 865, 307–318. doi:[10.1557/proc-865-f10.1](https://doi.org/10.1557/proc-865-f10.1)
  9. Singh, V. P., Erickson, O. M., Chao, J. H. (1995). Analysis of contact degradation at the CdTe-electrode interface in thin film CdTe-CdS solar cells. *Journal of Applied Physics*, 78 (7), 4538–4543. doi:[10.1063/1.359796](https://doi.org/10.1063/1.359796)
  10. Кurychenko, M. V., Zaitsev, R. V., Kopach, V. R., Khrypunov, H. S., Lisachuk, H. V.; assignee: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". (10.07.2008). Luminodiode lamp. Patent UA 33676, МПК: [H01L 21/66](https://patents.google.com/patent/H01L21/66), [G01R 31/26](https://patents.google.com/patent/G01R31/26). Bull. № 13, 3.

*Поступила (received) 15.01.2016*

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Вплив рівня освітлення на вихідні параметри сонячних елементів на основі CdS / CdTe/ Н. В. Дейнеко/ Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.3–6. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Влияние уровня освещенности на выходные параметры солнечных элементов на основе CdS/CdTe/ Н. В. Дейнеко/ Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.3–6. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Influence of light on the level of output parameters solar cells based on CdS / CdTe/ N. Deyneko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P.3–6. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Дейнеко Наталя Вікторівна** – кандидат технічних наук, Національний університет цивільного захисту України, Кафедра прикладної механіки, вул. Чернишевська, 94, г. Харків, Україна, 61023, e-mail: [natalyadeyneko@gmail.com](mailto:natalyadeyneko@gmail.com).

**Дейнеко Наталья Викторовна** – кандидат технических наук, Национальный университет гражданской защиты Украины, Кафедра прикладной механики, ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023, e-mail: [natalyadeyneko@gmail.com](mailto:natalyadeyneko@gmail.com).

**Deyneko Natalya Victorovna** – PhD., Department of Applied Mechanics, National University of Civil Protection of Ukraine, Chernyshevskaya str., 94, Kharkov, Ukraine, 61023, e-mail: [natalyadeyneko@gmail.com](mailto:natalyadeyneko@gmail.com).

УДК 674.236

А. А. ДЖАФАРОВА, Р. А. ИМАНОВА

**ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ ОКСИДИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА НА ИХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

В статье приводятся результаты исследований влияния пористости оксидированных порошковых материалов на основе железа на их коэффициент трения, суммарный износ, влияние приработки и критический коэффициент интенсивности напряжений и триботехническими характеристиками оксидированного порошкового железа как чистого, так и легированного 1,5 % С и 2 % Cu при пористости 5–6 % в при поверхностном слое материалов возникает значительная концентрация напряжений, которая оказывает отрицательное влияние на триботехнические характеристики деталей.

**Ключевые слова:** пористость, коэффициент трения, оксидирование, суммарный износ, порошковое железа, примеси.

У статті наводяться результати досліджень впливу пористості оксидованих порошкових матеріалів на основі заліза на їх коефіцієнт тертя, сумарний знос, вплив підробітки і критичний коефіцієнт інтенсивності напружень і триботехнічними характеристиками оксидованого порошкового заліза як чистого, так і легованого 1,5 % С і 2 % Cu при пористості 5–6 % в при поверхневому шарі матеріалів виникає значна концентрація напружень, яка чинить негативний вплив на ріботехнічні характеристики деталей.

**Ключові слова:** пористість, коефіцієнт тертя, оксидування, сумарний знос, порошкове заліза, домішки.

The article presents the results of researches of influence of porosity of the oxidized powder materials based on iron in IHI coefficient of friction total wear, the impact of running and the critical stress intensity factor and tribological characteristics of oxidized powder of iron, both pure and alloyed 1.5% and 2% Cu porosity of 5–6 % in the surface layer of materials there is a considerable stress concentration, which has a negative effect on tribotechnika characteristics of the parts.

Thus, as a result of the lead researches installed, monoton dependence on porosity of tribotechnical properties of sintered and oxidized iron powder is as pure and doped with 1.5% from 2% and Cu. Discovered the relationship between critical stress intensity factor and tribotechnical properties of materials. When the minimum values for the total wear and time burnishing samples with  $p = 5-6\%$  match with a minimum. Between the porosity of the materials most prone to the appearance in their large subsurface stress concentrations and, apparently, submikrotreshhin, which has a substantial impact on their tribological characteristics.

**Keywords:** porosity, coefficient of friction, oxidation, total wear, powder of iron impurities.

**Введение.** Повышение стойкости к износу взаимно перемещающихся трущихся поверхностей деталей машин является достаточно сложной практической задачей. Эта сложность связана как с необходимостью регулирования химического состава и микроструктуры, определяющих физико-механические свойства сплава детали, так и с необходимостью обеспечения высокого качества и геометрии трущихся поверхностей, а также их микроструктуры и минимизации наличия поверхностных дефектов. И если первая составляющая управляется путем оптимизации химического состава сплава, формирующего микроструктуру и свойства, исследованием соответствующих регрессионных уравнений [1, 2], то для второй составляющей необходим учет дополнительных особенностей. К ним, в первую очередь, следует отнести необходимость исследования закономерностей изменения напряженного состояния поверхностных слоев трущихся тел, содержащих твердые включения типа оксидов. Именно эта составляющая и вызывает определенный научно-практический интерес.

Исследование закономерностей изменения напряженного состояния поверхностных слоев трущихся тел, содержащих твердые включения типа оксидов, вызывает определенный научно-практический интерес. Установленная в [3, 4] немонотонная зависимость критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{IC}$  порошкового материала от пористости показывает целесообразность уточнения этих закономерностей для порошковых материалов.

В данной статье изложены результаты экспериментального исследования влияния пористости в пределах от 4 до 18 % на триботехнические свойства порошковых материалов на основе железа, подвергнутых оксидированию и сделана попытка интерпрети-

ровать их с учетом характера изменения пористых материалов и факторов, влияющих на него.

**Материалы и методики экспериментов.** Объектами изучения были образцы, изготовленные многократным прессованием с промежуточными отжигами из железного порошка как чистого, так и легированного медью и графитом. Исходный железный порошок предварительно просеивали через сито с ячейками 160 мкм для удаления крупных частиц.

Пористость образцов в диапазоне от 4 до 18 % изменялась через 1,5–2,5 %. Термическая обработка образцов независимо от конечной пористости была одинаковой. Материалы, изготовленные из чистого железного порошка, выдерживали в течение 1, а легированного медью и углеродом – 1,5 часа при температуре 1150 и 1100°C соответственно. Паротермическую обработку обоих типов образцов проводили при одинаковых режимах, изложенных в главе 2. После спекания и парообработки оценивали триботехнические характеристики образцов, их  $K_{IC}$ , пористость, микроструктуру. Испытания на трение проводили в режиме ограниченной подачи масла ХМ-6 при скорости скольжения 2 м/с и давлениях 2,35 и 4,70 МПа для образцов, изготовленных соответственно из чистого железного и легированного медью и углеродом, (длительность испытания 12 ч, путь трения 100 км) [5, 6].

Образцы для определения триботехнических свойств размером 5x10x15мм изготавливали из образцов, испытанных на  $K_{IC}$ . Контртелом служила закаленная сталь 45 твердостью 38–42 HRC и шероховатостью поверхности  $R_a=0,5$  мкм.

**Обсуждение результатов.** О триботехнических свойствах судили по коэффициенту трения, суммарному линейному износу и времени приработки. Их

© А. А. Джафарова, Р. А. Иманова. 2016



зависимость от количества пор в материалах показана на рис. 1. Для  $P=5-6\%$  на кривых суммарного износа и времени приработки наблюдается минимум, при этом коэффициент трения возрастает на 25 %, а суммарный износ и врем приработки уменьшается примерно вдвое. При дальнейшем увеличении пористости (6 %) рассматриваемые свойства достигают уровня значений, характерных для этих материалов.

Так как структуры образцов различались практически лишь количеством пор, то для объяснения обнаруженных закономерностей была сделана попытка сопоставить их со значениями  $K_{IC}$ , которые определяли при температуре жидкого азота на образцах прямоугольного сечения. Результаты испытаний (рис. 1, г.) практически не отличаются от полученных при комнатной температуре. При этом характер изменения  $K_{IC}$  исследованных материалов одинаков, а его аномально низкие значения соответствуют  $P=5-6\%$ . Совпадение при  $P=5-6\%$  минимальных величин  $K_{IC}$  суммарного износа и времени приработки позволяет сделать вывод, что материалы образцов изготовленных из чистого железного порошка и легированного 1,5 % С и 2,0 % Си (по массе) и подвергнутые оксидированию, наиболее склонны к повышенной концентрации напряжений в рабочем слое под воздействием внешних нагрузок [7, 8]. Это существенно влияет на их разрушение при изнашивании.

Поверхность трения материалов исследовали с помощью растрового электронного микроскопа. Электронно-микроскопические снимки для порошкового железа представлены на рис. 2. Вид поверхностей трения исследованных образцов при различных пористостях (исключая  $P=5-6\%$ ) практически одинаков. Поверхность трения образца при  $P=5-6\%$ , наиболее легко прирабатываемого, не имеет следов изнашивания, обусловленных процессами микрорезания, т.е. ощущается «вклад» оксидов железа, сконцентрированных на поверхности трения материала. Анализ полученных данных позволяет предположить,

что материал в интервале пористостей, соответствующих наиболее низким значениям  $K_{IC}$  в при поверхностном слое может проявлять склонность к субмикротрещиноватости, обусловленной взаимодействием пор под воздействием внешних нагрузок. Субмикротрещиноватость, способствуя релаксации напряжений, возникающих как результат трения и изнашивания, и стоку на поверхность субмикротрещин дефектов кристаллической решетки при ее упругопластической деформации, облегчает прирабатываемость и уменьшает суммарный износ.

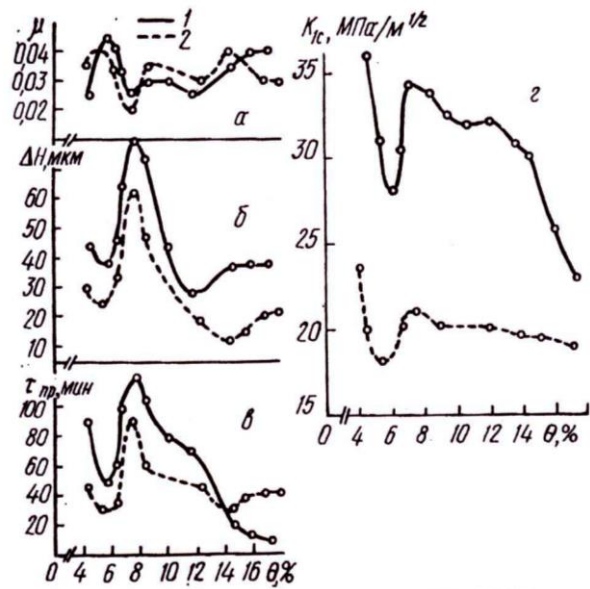


Рис. 1 – Изменение в зависимости от пористости: а – коэффициента трения, б – суммарного износа, в – времени приработки, г – критического коэффициента интенсивности напряжений при 196<sup>0</sup>С; 1 – чистого оксидированного порошкового железа, 2 – легированного 1,5 % С и 2,0 % Си.

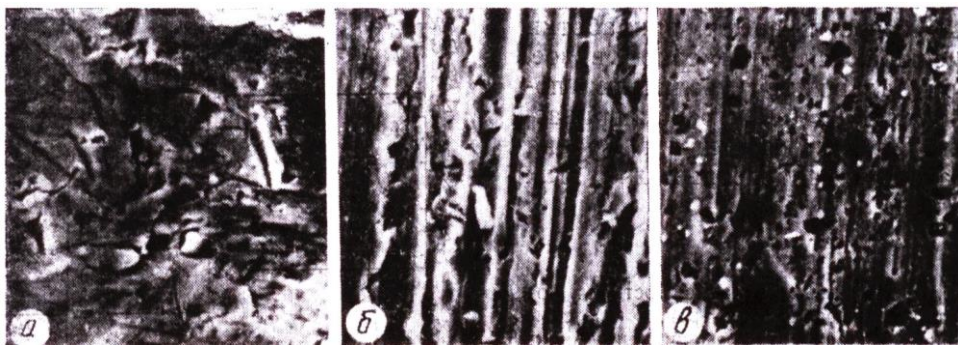


Рис. 2 – Электронно-микроскопические снимки поверхностей трения оксидированных порошковых материалов:  $P=5,6$  (а); 8,0(б); 13,5(в) x 2000

Различие в состоянии рабочих поверхностей трения изученных порошковых материалов можно объяснить, исходя из перераспределения в них примесей с изменением пористости [9, 10]. Концентрация примесей по границам зерен при определенных значениях  $P$  вызывает хрупкое межзеренное разрушение порошковых оксидированных материалов, снижает уровень  $K_{IC}$  и, следовательно, некоторых триботехнических свойств (рис. 1, б, в).

Следует обратить внимание на характер изменения триботехнических свойств материалов при  $P>8\%$ . Можно ожидать, что они должны монотонно изменяться по мере увеличения пористости, так как взаимодействие пор на них существенно не влияет. Однако результаты эксперимента свидетельствуют о более сложном поведении материалов пористостью более 12 %. Так, при  $P 12\%$  начинает увеличиваться суммарный износ образцов, изготовленных из чистого



железного порошка, а для легированного порошка на кривых изменения триботехнических свойств с пористостью наблюдается тенденция к минимальным значениям суммарного износа и времени приработки материала. Можно предположить, что увеличение суммарного износа оксидированного порошкового железа обусловлено низким уровнем его механическим свойств, а установленное изменение суммарного износа и времени приработки оксидированного железа, легированного медью и углеродом - возможным приповерхностным зарождением трещин под воздействием локального увеличения напряжений вблизи оксидной фазы (2, 3). Наблюдаемые закономерности нуждаются в более детальном изучении и выяснении истинной природы изменения триботехнических свойств порошковых материалов.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлена, немонотонна зависимость от пористости триботехнических свойств спеченного и оксидированного порошкового железа – как чистого, так и легированного 1,5 % С и 2 % Си. Обнаружена связь между критическим коэффициентом интенсивности напряжений и триботехническими свойствами материалов. При этом минимальные величины суммарного износа и времени приработки образцов при  $P=5-6\%$  совпадает с минимумом  $K_{IC}$ . В указанном интервале пористости материалы наиболее склонны к появлению (под воздействием внешних нагрузок) в их приповерхностном слое значительной концентрации напряжений и, по-видимому, субмикротрещиноватости, что оказывает существенное влияние на их триботехнические характеристики [11, 12].

Учитывая данные этих результатов, нами были проведены дополнительные исследования триботехнических характеристик железнографитовых порошковых материалов, подвергнутых пароксидированию.

**Выводы.** Изучение влияния пористости на триботехнические свойства оксидированных порошковых материалов на основе железа показало немонотонную зависимость между этими характеристиками. Установлена связь между критическим коэффициентом интенсивности напряжений и триботехническими свойствами оксидированного железа как чистого, так и легированного 1,5 % С и 2 % Си. При этом минимальные величины суммарного износа и времени приработки образцов при пористости 5–6 % совпадает с минимумом  $K_{IC}$ .

Как ни парадоксально при минимальной пористости, т.е. при  $P=5-6\%$  материалы наиболее склонны к появлению (под воздействием внешних нагрузок) в их приповерхностном слое значительной концентрации напряжений, результатом которых является, по-видимому, субмикро-трещиноватость, что и оказывает существенное отрицательное влияние на триботехнические характеристики деталей. Вблизи оксидной фазы зарождаются субмикротрещины в поверхностном слое, в котором они наиболее сконцентрированы.

#### Список литературы:

1. Demin, D. A. Complex alloying of grey cast iron [Text] / D. A. Demin, V. F. Pelikh, O. I. Ponomarenko // Litejnoe Proizvodstvo. – 1998. – № 10. – P. 18–19.

2. Demin, D. A. Optimization of the method of adjustment of chemical composition of flake graphite iron [Text] / D. A. Demin, V. F. Pelikh, O. I. Ponomarenko // Litejnoe Proizvodstvo. – 1995. – № 7-8. – P. 42–43.
3. Федорченко, И. М. Влияние содержания и размеров частиц графита на структуру и триботехнические характеристики меднографитовых материалов [Текст] / И. М. Федорченко // Порошковая металлургия. – 1986. – № 9. – С. 84–90.
4. Федорченко, И. М. Основы порошковой металлургии [Текст] / И. М. Федорченко, Р. Д. Андриевский. Киев: АН УССР, 1963. – 420 с.
5. Федорченко, И. М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы [Текст] / И. М. Федорченко, Л. И. Пугина. Киев: Наукова думка, 1980. – 244 с.
6. Бальшин, М. Ю. Общие научные принципы порошковой металлургии и их применение [Текст] / М. Ю. Бальшин. Киев: Наукова думка, 1980. – 346 с.
7. Дорофеев, Ю. Г. Динамическое горячее прессование пористых материалов [Текст] / Ю. Г. Дорофеев. Москва: Металлургия, 2009. – 176 с.
8. Крагельский, И. В. Трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский. Москва: Машиностроение, 2006. – 375 с.
9. Бебнев, П. И. Трение и износ пористого железнографита [Текст] / П. И. Бебнев. Москва: Машиностроение, 2014. – 124 с.
10. Мамедов, А. Т. Порошковые материалы конструкционного назначения [Текст] / А. Т. Мамедов. Баку: Элм, 1990. – 188 с.
11. Мошков, А. Д. Пористые антифрикционные материалы [Текст] / А. Д. Мошков. Москва: Машиностроение, 1998. – 208 с.
12. Джонс, В. Д. Основы порошковой металлургии [Текст] / В. Д. Джонс. Москва: Мир, 1995. – 270 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Demin, D. A., Pelikh, V. F., Ponomarenko, O. I. (1998). Complex alloying of grey cast iron. Litejnoe Proizvodstvo, 10, 18–19.
2. Demin, D. A., Pelikh, V. F., Ponomarenko, O. I. (1995). Optimization of the method of adjustment of chemical composition of flake graphite iron. Litejnoe Proizvodstvo, 7-8, 42–43.
3. Fedorchenko, I. M. (1986). Vlijanie soderzhaniya i razmerov chastic grafitu na strukturu i tribotekhnicheskie harakteristiki mednografitovyh materialov. Poroshkovaja metallurgija, 9, 84–90.
4. Fedorchenko, I. M., Andrievskij, R. D. (1963). Osnovy poroshkovej metallurgii. Kiev: AN USSR, 420.
5. Fedorchenko, I. M., Pugina, L. I. (1980). Kompozicionnye spechennye antifrikcionnye materialy. Kiev: Naukova dumka, 244.
6. Bal'shhin, M. Ju. (1980). Obshhie nauchnye principy poroshkovej metallurgii i ih primenenie. Kiev: Naukova dumka, 346.
7. Dorofeev, Ju. G. (2009). Dinamicheskoe gorjachee pressovanie poristyh materialov. Moscow: Metallurgija, 176.
8. Kragel'skij, I. V. (2006). Trenie i iznos. Moscow: Mashinostroenie, 375.
9. Bebnev, P. I. (2014). Trenie i iznos poristogo zhelezografita. Moscow: Mashinostroenie, 124.
10. Mamedov, A. T. (1990). Poroshkovye materialy konstrukcionnogo naznachenija. Baku: Elm, 188.
11. Moshkov, A. D. (1998). Poristye antifrikcionnye materialy. Moscow: Mashinostroenie, 208.
12. Dzhons, V. D. (1995). Osnovy poroshkovej metallurgii. Moscow: Mir, 270.

Поступила (received) 15.01.2016

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Влияние пористости оксидированных порошковых материалов на основе железа на их триботехнические характеристики/ А. А. Джафарова, Р. А. Иманова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.7–10. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Вплив пористості оксидованих порошкових матеріалів на основі заліза на їх триботехнічні характеристики/ А. А. Джафарова, Р. А. Иманова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.7–10. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Influence of the porosity of the oxidized powder materials HB iron based on their tribological properties/ A. A. Jafarova, R. A. Imanova //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P. 7–10. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-5459.**

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Джафарова Афат Ариф з.** – асистент, кафедра екології, Азербайджанський технічний університет, пр. Г. Джавида, 25, г. Баку, Азербайджан, Аз1073; email: [nizism@mail.ru](mailto:nizism@mail.ru).

**Иманова Рада Алиага з.** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра матеріалознавства, Азербайджанський технічний університет, пр. Г. Джавида, 25, г. Баку, Азербайджан, Аз1073; email: [nizism@mail.ru](mailto:nizism@mail.ru).

**Джафарова Афат Ариф з.** – асистент, кафедра екології, Азербайджанський технічний університет, пр. Г. Джавида, 25, м. Баку, Азербайджан, Аз1073; email: [nizism@mail.ru](mailto:nizism@mail.ru).

**Иманова Рада Алиага з.** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра матеріалознавства, Азербайджанський технічний університет, пр. Г. Джавида, 25, м. Баку, Азербайджан, Аз1073; email: [nizism@mail.ru](mailto:nizism@mail.ru).

**Jafarova Afat Arif** – assistant, Department of Ecology, Azerbaijan Technical University, etc. H. Javid, 25, Baku, Azerbaijan, Az1073; email: [nizism@mail.ru](mailto:nizism@mail.ru).

**Imanova Rada Aliaga** – PhD., Associate Professor, Department of Materials Science, Azerbaijan Technical University, etc. H. Javid, 25, Baku, Azerbaijan, Az1073; email: [nizism@mail.ru](mailto:nizism@mail.ru).

УДК 621.763:539.4.015

**Е. В. ЗОЗУЛЯ, О. С. ТЕРЛЕЦЬКИЙ, А. Г. МЕНЬШИКОВ, В. В. СУББОТИНА, Т. О. ПРОТАСЕНКО**

### ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И УСЛОВИЙ ОСАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВАКУУМНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ, УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ

Композити на основі міді, зміцнені частками оксиду алюмінію, отримували електронно-променевим випаром компонентів з роздільних джерел з наступним їх спільним осадженням. Температури осадження змінювалися від 293 до 673 К. Методами рентгендіфрактометрії та просвічуючої електронної мікроскопії досліджено структуру композитів. Встановлено зміну морфології часток оксиду алюмінію при підвищенні температури підкладки. Розглянуто вплив змісту і розміру часток  $Al_2O_3$  на електричний опір, міцність і структурну стабільність при підвищених температурах. Запропоновано заходи поліпшення їх властивостей.

**Ключові слова:**  $Al_2O_3$ , мідь, композит, електронно-променеве випаровування, структурна стабільність, міцність, електричний опір.

Композиты на основе меди, упрочнённые частицами оксида алюминия, получали электронно-лучевым испарением компонентов из отдельных источников с последующим их совместным осаждением. Температуры осаждения изменялись от 293 до 673 К. Методами рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии исследована структура композитов. Установлена смена морфологии частиц оксида алюминия при повышении температуры подложки. Рассмотрено влияние содержания и размера частиц  $Al_2O_3$  на электрическое сопротивление, прочность и структурную стабильность при повышенных температурах. Предложены меры улучшения их свойств.

**Ключевые слова:**  $Al_2O_3$ , медь, композит, электронно-лучевое испарение, структурная стабильность, прочность, электрическое сопротивление.

Composites obtained by electron beam evaporation components from separate sources and their subsequent co-deposition. The deposition temperatures were changed from 293 K to 673. Methods of X-ray diffraction and transmission electron microscopy were used to study the microstructure of composites strengthened by aluminum oxide particles. Composites at  $Al_2O_3$  particle contents up to 3 vol. % were studied. Morphological change of aluminum oxide particles with increasing temperature of substrate and also at annealing was established. The particle size is closely related to phase transition. The effect of the size of particles of the oxide ( $Al_2O_3$ ) and of their content on the properties of the composite has been considered, in order to optimize these characteristics. The results of this work can be used for the creation of new-generation conductors with an optimum combination of strength and electrical conductivity.

**Keywords:**  $Al_2O_3$ , copper, composite, EB-PVD, structural stability, strength, electrical resistance.

**Введение.** Значительная практическая важность дисперсноупрочнённых композитов на основе системы «медь–оксид алюминия» служит стимулом для многочисленных экспериментальных исследований структурообразования, диспергирования и распределения упрочняющей фазы в объеме матрицы и механизмов упрочнения; создания и усовершенствования технологических процессов их изготовления, например [1–6]. Среди прогрессивных процессов, применяемых для производства таких материалов, в виде

фольг и покрытий, особое место занимает метод осаждения из пара в вакууме. В нем отсутствует ряд ограничений, свойственных другим методам, например, по содержанию упрочняющей фазы и материалу матрицы. Достигнут значительный прогресс в диспергировании частиц упрочняющей фазы – современной тенденции развития проводниковых дисперсноупрочнённых композитов.

© Е. В. Зозуля, О. С. Терлецький, А. Г. Меньшиков, В. В. Субботіна, Т. О. Протасенко. 2016

Начало получения вакуумных композитов медь – оксид алюминия можно отнести к работам [7, 8], которые наглядно продемонстрировали влияние микродобавок (< 0,003 об. %) оксида  $Al_2O_3$ , попадающих непосредственно из тигля испарителя в виде нанодисперсных окислов, на структуру и физические свойства медных пленок. В дальнейшем, при создании композитов, упрочненных частицами оксидов методом осаждения паров компонентов в вакууме, были реализованы два подхода:

1. Осаждение при температурах ниже  $(0,4-0,5)T_{пл}$  матричного материала с целью получить конденсаты, отличающиеся высокими прочностными характеристиками (школа Палатника);

2. Осаждение при температурах выше  $(0,4-0,5)T_{пл}$  наиболее тугоплавкого компонента с целью получения конденсатов с равновесной структурой и высокой структурной стабильностью (школа Мовчана).

Отметим, с применением первого подхода достигнута дисперсность частиц оксида алюминия 5–10 нм [9, 10].

Современная тенденция развития проводниковых композитов, упрочненных частицами, связана с одновременным снижением содержания упрочняющей фазы и ее диспергированием, с целью повышения как прочности, так и электропроводности. С другой стороны, нами ранее исследован значительный рост электросопротивления при снижении размера частиц упрочняющей фазы [11]. Снижение содержания упрочняющей фазы может также отрицательно сказаться на стабильности структуры и свойств под термическим воздействием [12].

Целью работы является исследование возможностей технологии электронно-лучевого испарения и последующей конденсации в вакууме (ЕВ–PVD–метод) для получения композитов системы  $Cu-Al_2O_3$  с лучшим соотношением характеристик прочности и электропроводности, а также структурная стабильность конденсатов композита при низком содержании оксида алюминия под температурным воздействием.

**Методика исследований.** Исследованы пленочные композиты системы  $Cu-Al_2O_3$  толщиной до 40 мкм, содержащие менее 3 об. %  $Al_2O_3$ , а также пленки меди, полученные при идентичных технологических условиях. Методика получения таких объектов описана в [10]. Часть образцов были подвергнуты отжигу. Термообработку образцов проводили в вакуумной шахтной печи СШВЛ–0.6,2/16. Все технологические операции проводились при остаточном давлении не выше  $10^{-3}$  Па. Состав композита определяли на рентгеновском микроанализаторе MAP–4. Структуру изучали методами рентгендифрактометрии (прибор ДРОН–3). После электролитического утонения применяли оптическую (микроскоп Ahion mat 1.A) и просвечивающую электронную микроскопию (микроскопы ПЭМ–У, ПЭМ–100 и JEM–2100 с приставкой для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS)). Также использовали метод углеродных экстракционных реплик. Испытания на растяжение проводились на машине «TIRA test 2300» с относительной скоростью деформирования  $6,67 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . Определение микротвердости – на приборе ПМТ–3. Удельное электро-

сопротивление измеряли по стандартному методу (ГОСТ 25947–83).

**Результаты и обсуждение. Выдвижение требований к структуре.** Среди приведенных в литературе математических форм оптимизации прочности и электропроводности для нашего случая было решено применить сравнительно несложное отношение предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) к удельному электросопротивлению ( $\rho$ ). Как видно из рис. 1 зависимость этого параметра от содержания  $Al_2O_3$  в композитах  $Cu-Al_2O_3$  характеризуется максимумом. Появление максимума легко объяснимо, если учесть вид зависимостей  $\rho$  (1) и  $\sigma_{0,2}$  (2).

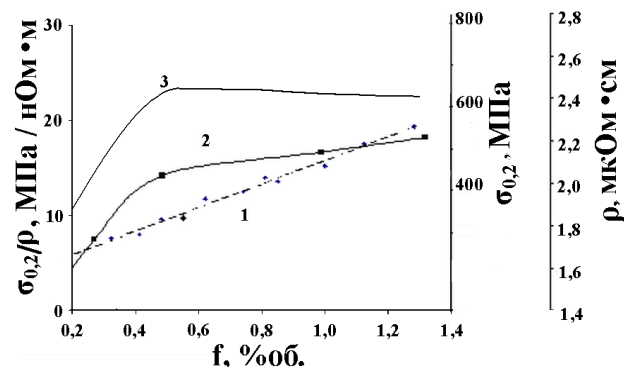


Рис. 1 – Влияние объемного содержания оксидов на:  $\rho$  (1);  $\sigma_{0,2}$  (2) параметр  $\sigma_{0,2}/\rho$  (3) композита  $Cu-Al_2O_3$

Прогноз поведения параметра оптимизации  $\sigma_{0,2}/\rho$  для композита  $Cu-Al_2O_3$  приведен на рис. 2.

При прогнозировании исходили из монодисперсности частиц упрочняющей фазы и не учитывали влияние размера зерна. Напряжение, необходимое для преодоления частиц оксида дислокациями по механизму Орована [13]:

$$\sigma_{0,2} = \frac{0,84MG_m b_m}{2\pi(1-\nu)^{0,5}(\lambda - d_q)} \ln\left(\frac{d_q}{2b_m}\right), \quad (1)$$

где:  $M$  – фактор Тейлора ( $\approx 3,1$  для поликристаллических ГЦК металлов);  $G_m$  – модуль сдвига матрицы (медь:  $G_m=49$  Гпа);  $b_m$  – вектор Бюргера матрицы (для меди  $b_m=0,256$  нм);  $d_q$  – средний условный диаметр частиц;  $\nu$  – коэффициент Пуассона матрицы ( $\approx 0,3$ );  $\lambda$  – среднее расстояние между частицами, определяемое как:

$$\lambda = d_q \left(\frac{\pi}{6f}\right)^{0,5}. \quad (2)$$

где:  $f$  – объемная доля частиц.

Прирост  $\rho$  рассчитан исходя из поровой модели [11] методом парциальных волн при следующих параметрах:  $a = 1,413 \text{ \AA}$ ,  $k_F = 1,363 \text{ \AA}^{-1}$ ,  $\rho_0 = 1,66 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Поверхность отклика представлена в виде сечений, соответствующих определенному размеру частиц, в трехмерном пространстве. Из рисунка видно, что повышение размера частиц приводит к сдвигу локального максимального значения параметра оптимизации в сторону большего содержания  $Al_2O_3$ . Улучшение характеристик композита, таким образом, свя-



зано с технологической возможностью получения не только более дисперсной упрочняющей фазы, а фазы с малой дисперсией распределения по размеру. Опираясь на эту модель можно определить соотношение компонентов композита и такие параметры технологического процесса, при которых полученный материал будет иметь необходимые характеристики. Для этого необходимо исследовать влияние технологических параметров на морфологию частиц оксида алюминия.

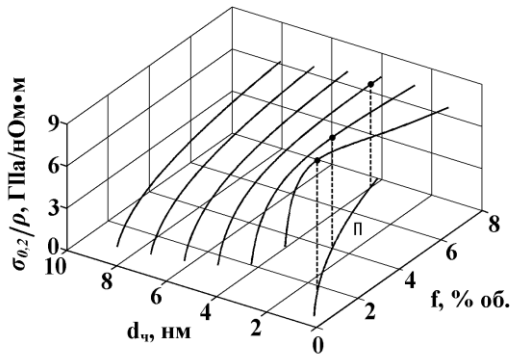


Рис. 2 – Зависимость параметра оптимизации от  $f$  и  $d_{0.2}$ :  
 ● – локальный максимум параметра оптимизации, линия П – проекция локальных максимумов на плоскость  $d_{0.2} - f$ .

**Структурные возможности метода EB-PVD.**

Структура конденсатов представлена мелкозернистой медной матрицей, средний размер столбчатых зерен которой в плоскости подложки (для выбранного интервала содержания  $Al_2O_3$ ) составляет 0,4–3 мкм. В объеме матрицы равномерно распределены нанодисперсные частицы  $Al_2O_3$ . Отметим, что в исходном состоянии частицы с размером менее 18 нм идентифицировались исключительно по сорбционному контрасту. Это дает основание считать их структуру аморфной. Статистический анализ показал, что распределение размеров частиц, их средний размер ( $d_0$ ), полученные для композитов в исходном состоянии и после высокотемпературного отжига (900 °C, 2 ч), соответствуют друг другу. Высокотемпературный отжиг приводит к кристаллизации аморфных частиц оксида. Применение углеродных экстракционных реплик позволило идентифицировать элементы локального контраста как частицы  $\gamma$ -фазы  $Al_2O_3$  [11], фазовый переход от аморфной фазы к  $\gamma$ -фазе согласуется с литера-

турными данными о  $Al_2O_3$ . Повышение температуры подложки ( $T_n$ ) выше 240–300 °C приводит к появлению на электронограмме рефлексов от высокотемпературной  $k$ -фазы  $Al_2O_3$  (рис. 3, показана стрелкой), которая, согласно литературным данным, не наблюдается в вакуумных конденсатах  $Al_2O_3$  при этой и более высокой  $T_n$ . После высокотемпературного отжига на экстракционных репликах с высокотемпературных конденсатов композита были выявлены как дисперсные частицы  $\gamma$ -, так и более крупные частицы  $\sigma$ -фазы  $Al_2O_3$  (рис. 4), которые по размерам соответствовали частицам  $k$ -фазы. Распределение как частиц  $\gamma$ -фазы, так и частиц  $\sigma$ -фазы по размерам характеризуется несимметричной частотной кривой и лучше всего описывается гамма распределением со средним значением около 4 нм и 100 нм, соответственно. Наблюдается бимодальное распределение частиц  $Al_2O_3$ . Одновременно с этим, наиболее вероятный диаметр частиц смещается в сторону меньших размеров, что связывается с изменениями в механизме формирования частиц.

Получена экспериментальная зависимость  $d_0$   $Al_2O_3$ , от  $T_n$ . В довольно широком температурном диапазоне  $d_0$  изменяется незначительно и остается на уровне 2–4 нм, а при  $T_n$  выше 300 °C наблюдается резкий рост  $d_0$ . Вместе с повышением  $T_n$  растет дисперсия распределения частиц  $Al_2O_3$ . Резкий рост  $d_0$  и дисперсии распределения частиц  $Al_2O_3$  совпадает с появлением в исходном состоянии композитов крупных частиц  $k$ -фазы  $Al_2O_3$ , что отрицательно сказывается на прочностных свойствах.

Кроме того, анализ EDS линейного профиля распределения Al показал периодичность его распределения по телу зерна (рис. 5). Отмечено, что после перехода через границу зерна, период распределения Al изменяется. Это свидетельствует о зависимости плотности распределения частиц  $Al_2O_3$  от кристаллографического направления в медной матрице. Появление высокотемпературной  $k$ -фазы  $Al_2O_3$  при низких  $T_n$  объясняется нами влиянием, которое медная матрица оказывает на частицы оксида, вероятно, посредством образования соединения типа  $Cu_xAl_yO_z$  (например,  $CuAl_2O_4$ ) на поверхности раздела медь-оксид алюминия.

На основании полученных результатов разработаны композиты, которые по сочетанию прочности и электропроводности могут заменить, например, бериллиевые бронзы и сплавы Cu-Zr [14].

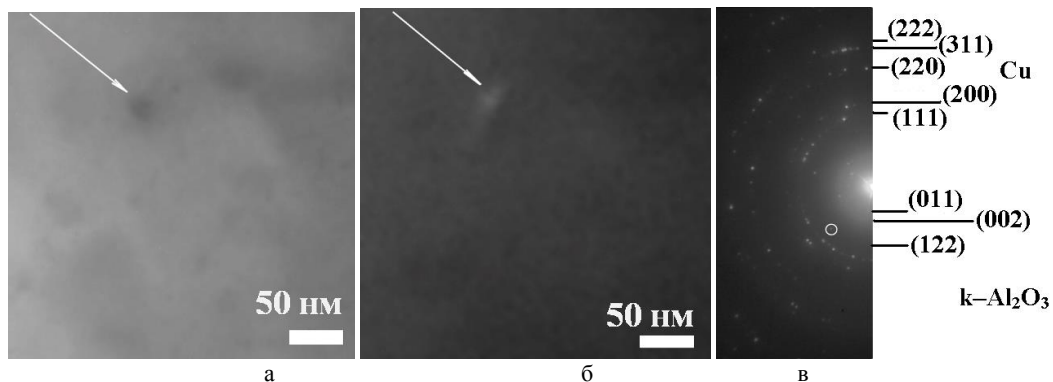


Рис. 3 – Электронно-микроскопическое изображение частиц  $Al_2O_3$  в исходном состоянии композита ( $T_n > 300$  °C), электролитически утоненные образцы: а – светлое поле; б – темное поле; в – дифракция

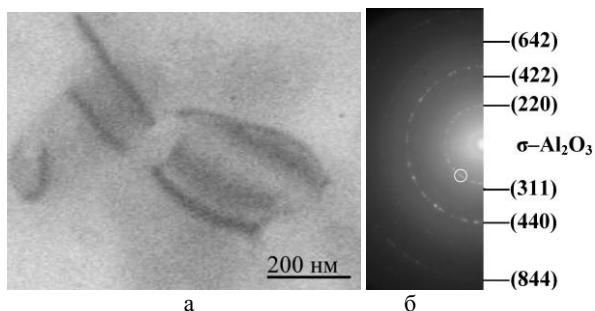


Рис. 4 – Электронно-микроскопическое изображение крупных частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  после отжига композита ( $T_{\text{п}} > 300\text{ }^\circ\text{C}$ ), углеродная экстракционная реплика: а – светлое поле; б – дифракция

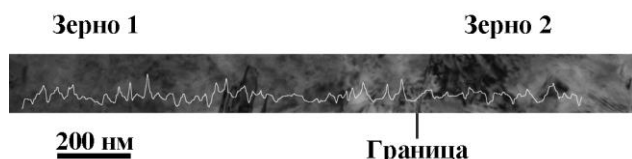


Рис. 5 – EDS сигнал Al привязанный к микроструктуре

**Структурная стабильность композитов.** Изучена структурная стабильность конденсатов композита при неблагоприятно низком содержании оксида алюминия под температурным воздействием. Для исследования использовали композит с 0,5 об. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , но разной исходной  $d_{\text{ч}}$  (4,1 и 19 нм) и  $D_3$  (0,71 и 2,4 мкм) в силу различных температур конденсации. Значения  $d_{\text{ч}}$  и  $D_3$  после отжига (2 ч  $900\text{ }^\circ\text{C}$ ) в пределах двух значащих цифр не изменились. Проведенная оценка размера зерна, который могут стабилизировать частицы приведенных диаметров, согласно Зинеру ( $D_3 = 2d_{\text{ч}}/3f$ ), составляет 1 мкм и 5 мкм соответственно. Эти значения на 30 % и 50 % больше, чем измеренные  $D_3$ , что свидетельствует не только о высокой стабильности структуры, но и о возможном наличии дополнительного тормозящего фактора собирательной рекристаллизации.

Исследование изменения твердости композита  $\text{Cu}-0,5\text{ об. \% } \text{Al}_2\text{O}_3$  в результате высокотемпературного отжига, показало ее снижение на 20 – 50 %. На величину снижения твердости влияет  $T_{\text{п}}$  при получении композита – чем ниже  $T_{\text{п}}$ , тем меньше относительное падение твердости после отжига. Изменяется и удельное электросопротивление композита. Правда, изменения удельного электросопротивления не столь существенны, и находятся в пределах от 0 до 5 %. Композиты, полученные при низких  $T_{\text{п}}$ , показывают более

стабильные электрические параметры, что важно для их практического применения.

С целью выяснить влияние структуры матрицы, нами была исследована структурная стабильность конденсатов меди при термическом воздействии – отжигах. При отжиге прочностные свойства конденсатов меди ожидаемо снижаются. Величина снижения свойств, также как и у композитов, зависит от  $T_{\text{п}}$ . Минимальное снижение наблюдалось для конденсатов меди, полученных при высоких  $T_{\text{п}}$  ( $> 350\text{ }^\circ\text{C}$ ) – крупные зерна, четкие прямые границы. Как известно, понижение  $T_{\text{п}}$  приводит к росту неравновесности структуры медных конденсатов и, следовательно, к большему снижению свойств при отжиге. Отметим, что конденсаты меди, полученные при низких  $T_{\text{п}}$  ( $< 100\text{ }^\circ\text{C}$ ), проявляют большую стабильность прочностных характеристик чем конденсаты, полученные при промежуточных  $T_{\text{п}}$ , но меньшую, чем при высоких  $T_{\text{п}}$ .

Исследование влияния температуры отжига на  $D_3$  для низкотемпературных пленок меди показало, что размер зерна в низкотемпературных пленках стабилен до температур порядка  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , что значительно больше температуры рекристаллизации меди. При температуре отжига  $900\text{ }^\circ\text{C}$   $D_3$  возрастает более чем в 2 раза.

Структурные исследования показали, что в низкотемпературных пленках меди имеется значительное количество двойниковых дефектов упаковки. На рис. 6 представлена структура низкотемпературных пленок меди в исходном состоянии и после отжига, а данные анализа изменений в структуре – в табл. 1 ( $L$  – средняя толщина ламелей двойников).

Сопоставляя данные в табл. 1, можно отметить уменьшение количества двойников, также меняется распределение и дисперсия при незначительном росте  $D_3$  и значительном увеличении дисперсии зерен по размеру. Как видно на рис. 6, в движущаяся граница зерна взаимодействует с двойниковыми дефектами, которые тормозят ее движение, вследствие чего граница значительно выгибается. Это хорошо видно в областях на рисунке, отмеченных буквой **а**. В результате  $D_3$  низкотемпературных пленок меди если и возрастает, то не значительно. Таким образом, наличие большой плотности двойниковых дефектов обуславливает значительную структурную стабильность низкотемпературных пленок меди, а некоторое снижение плотности двойников при отжиге объясняет понижение твердости. Это подтверждается исследованиями и других авторов, например, высокая концентрация двойниковых границ в электроосажденных металлах повышает их термическую стабильность и микротвердость [15].

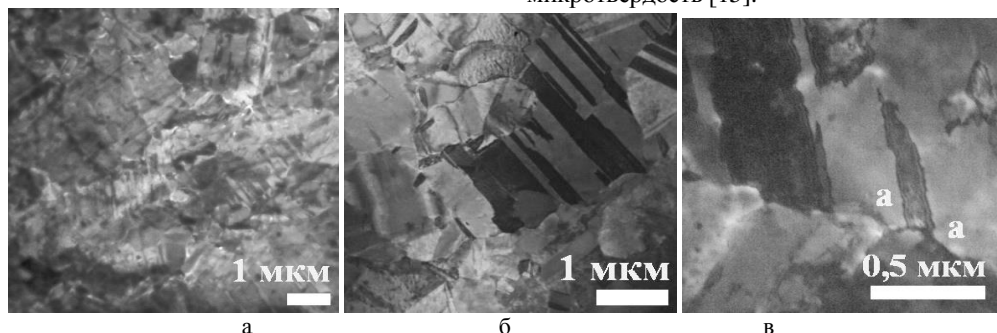


Рис. 6 – Влияние отжига  $600\text{ }^\circ\text{C}$  (2 часа) на структуру низкотемпературных пленок меди: а – исходное состояние, б, в – поле отжига.

Таблица 1 – Характеристики структуры низкотемпературных конденсаторов меди

состояние	Исходное	отжиг, 600 °С, 2 часа
L, нм	77	109
распределение	Логнормальный	Гама
дисперсия	2527	3697
D <sub>3</sub> , нм	1183	1212
распределение	Гама	Гама
дисперсия	824484	1169420

**Выводы.** Улучшение характеристик композита связано с технологической возможностью получения дисперсной упрочняющей фазы с малой дисперсией распределения по размеру.

При температурах подложки ниже 300 °С происходит смена механизма, определяющего размер частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с переходом от бимодального их распределения по размерам к одномодальному, а также к исчезновению рефлексов кристаллической модификации Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Понижение температуры подложки приводит к снижению среднего размера частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и дисперсии распределения по размеру.

Структурная стабильность конденсаторов меди обусловлена сложным взаимодействием мигрирующих высокоугловых и двойниковых границ. При этом происходит снижение плотности распределения двойниковых границ с сохранением размера зерна и ростом дисперсии распределения зерен по размерам. Стабильность зеренной структуры низкотемпературных конденсаторов меди сохраняется до 600 °С (0,64 T<sub>пл</sub>), что значительно превышает температурный порог рекристаллизации меди.

Структурная стабильность композитов с низким содержанием оксида алюминия под температурным воздействием обусловлена как присутствием нанодисперсных частиц, так и наличием высокой плотности двойников роста.

#### Список літератури:

1. Bund A., Thiemiig D. Influence of bath composition and pH on the electrocodeposition of alumina nanoparticles and copper [Text] / A. Bund, D. Thiemiig // Journal of applied electrochemistry. – 2007. – Vol. 37. – №. 3. – P. 345–351. doi:[10.1007/s10800-006-9264-2](https://doi.org/10.1007/s10800-006-9264-2)
2. Mukhtar, A. Variation in hardness of ultrafine grained Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite hollow balls and granules produced by high energy mechanical milling [Text] / A. Mukhtar, D. L. Zhang, C. Kong, P. Munroe IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2009. – № 4. – P. 012005. doi:[10.1088/1757-899X/4/1/012005](https://doi.org/10.1088/1757-899X/4/1/012005)
3. Shehata, F. Preparation and properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle reinforced copper matrix composites by in situ processing [Text] / F. Shehata, A. Fathy, M. Abdelhameed, S.F. Moustafa // Materials and Design. – 2009. – № 30. – P. 2756–2762. doi:[10.1016/j.matdes.2008.10.005](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.10.005)
4. Lee, D. W. Nanostructured Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite produced by thermochemical process for electrode application [Text] / D. W. Lee, B. K. Kim // Materials Letters. – 2004. – № 58. – P. 378–83. doi:[10.1016/s0167-577x\(03\)00505-6](https://doi.org/10.1016/s0167-577x(03)00505-6)
5. Ferkel, H. Properties of copper reinforced by laser-generated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-nanoparticles [Text] / H. Ferkel // Nanostructured Materials. – 1990. – № 11(5). – P. 595–602. doi:[10.1016/s0965-9773\(99\)00342-6](https://doi.org/10.1016/s0965-9773(99)00342-6)
6. Ільїнський, О. І. Структура і властивості електроосаджених композитів Cu – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [Текст] / О. І. Ільїнський, М. Д. Сахненко, О. В. Богоявленська, С. І. Лябук // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2012. – Т. 4. – №. 5 (58). – С. 7–9. Режим доступу: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/4914/4556>
7. Федоров, Г. В. Влияние способа испарения на структуру и свойства вакуумных конденсаторов Al и Cu [Текст] / Г. В. Фе-

8. Ильянский, А. И. О связи между прочностью и условиями приготовления вакуумных конденсаторов Cu и Al [Текст] / А. И. Ильянский, Г. В. Федоров, С. С. Дьяченко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 1966. – № 1. – С. 122–128.
9. Ильянский, А. И. Структура и прочность слоистых и дисперсноупрочненных пленок [Текст] / А. И. Ильянский. М.: Металлургия, 1986. – 144 с.
10. Ильянский, А. И. О структуре и прочности быстрозакаленных композитов Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [Текст] / А. И. Ильянский, А. С. Терleckий, Э. В. Зозуля // ФММ. – 1998. – Т. 86, № 6. – С. 121–124.
11. Zozulya, E. V. Structure and electrical resistance of dispersion-strengthened vacuum-deposited Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites [Text] / E. V. Zozulya, A. I. Il'inskii, I. N. Kolupaev // The Physics of Metals and Metallography. – 2011. – Т. 111, №. 2. – С. 155–157. doi:[10.1134/s0031918x1101025x](https://doi.org/10.1134/s0031918x1101025x)
12. Groza, J. R. Principles of particle selection for dispersion-strengthened copper [Text] / J. R. Groza, J. C. Gibeling, // Materials Science and Engineering: A. – 1993. – Т. 171, №. 1. – С. 115–125. doi:[10.1016/0921-5093\(93\)90398-x](https://doi.org/10.1016/0921-5093(93)90398-x)
13. Гольдштейн, М. И. Металлофизика высокопрочных сплавов [Текст] / М. И. Гольдштейн, В. С. Литвинов, Б. М. Бронфин // М.: Металлургия, 1986. – 312 с.
14. Викарчук, А. А. О стабильности зуберенной структуры формирующейся при электрокристаллизации с ГЦК решеткой [Текст] / А. А. Викарчук // Электрохимия. – 1990. – № 8. – С. 984–989.

#### Bibliography (transliterated):

1. BuBund, A., Thiemiig, D. (2006). Influence of bath composition and pH on the electrocodeposition of alumina nanoparticles and copper. Journal of Applied Electrochemistry, 37(3), 345–351. doi:[10.1007/s10800-006-9264-2](https://doi.org/10.1007/s10800-006-9264-2)
2. Mukhtar, A., Zhang, D. L., Kong, C., Munroe, P. (2009). Microstructure and thermal stability of nanostructured Cu-7.5vol.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite powders produced by high energy mechanical milling. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 4, 012005. doi:[10.1088/1757-899X/4/1/012005](https://doi.org/10.1088/1757-899X/4/1/012005)
3. Shehata, F., Fathy, A., Abdelhameed, M., Moustafa, S. F. (2009). Preparation and properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle reinforced copper matrix composites by in situ processing. Materials & Design, 30(7), 2756–2762. doi:[10.1016/j.matdes.2008.10.005](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.10.005)
4. Lee, D. W., Kim, B. K. (2004). Nanostructured Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite produced by thermochemical process for electrode application. Materials Letters, 58(3-4), 378–383. doi:[10.1016/s0167-577x\(03\)00505-6](https://doi.org/10.1016/s0167-577x(03)00505-6)
5. Ferkel, H. (1999). Properties of copper reinforced by laser-generated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-nanoparticles. Nanostructured Materials, 11(5), 595–602. doi:[10.1016/s0965-9773\(99\)00342-6](https://doi.org/10.1016/s0965-9773(99)00342-6)
6. Ільїнський, О. І., Сахненко, М. Д., Богоявленська, О. В., Лябук, С. І. (2012). Структура і властивості електроосаджених композитів Cu – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/5 (58), 7–9. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/4914/4556>
7. Fedorov, G. V., Palatnik, L. S., Dudkin, V. A. (1966). Vliyanie sposaba isparenija na strukturu i svojstva vakuumnih kondensatorov Al i Cu. FMM, 22 (3), 400–403.
8. Ільїнський, А. І., Федоров, Г. В., Д'яченко, С. С. (1966). О связи между прочност'ю и условиями приготовления вакуумных конденсаторов Cu и Al. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika, 1, 122–128.
9. Ільїнський, А. І. (1986). Структура і прочност' слоистих і дисперсноупрочненных пленок. Moscow: Metallurgija, 144.
10. Ільїнський, А. І., Терleckий, А. С., Зозуля, Я. В. (1998). О структуре и прочности быстрозакаленных композитов Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. FMM, 86 (6), 121–124.



11. Zozulya, E. V., Il'inskii, A. I., Kolupaev, I. N. (2011). Structure and electrical resistance of dispersion-strengthened vacuum-deposited Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites. The Physics of Metals and Metallography, 111(2), 155–157. doi:[10.1134/s0031918x1101025x](https://doi.org/10.1134/s0031918x1101025x)
12. Groza, J. R., Gibeling, J. C. (1993). Principles of particle selection for dispersion-strengthened copper. Materials Science and Engineering: A, 171(1-2), 115–125. doi:[10.1016/0921-5093\(93\)90398-x](https://doi.org/10.1016/0921-5093(93)90398-x)
13. Gol'dshtejn, M. I., Litvinov, V. S., Bronfin, B. M. (1986). Metallofizika vysokoprochnykh splavov. Moscow: Metallurgija, 312.
14. Vikarchuk, A. A. (1990). O stabil'nosti zubzerennoj struktury formirujushhejsja pri jelektrokristallizacii s GCK reshetkoj. Elektrohimiya, 8, 984–989.

Поступила (received) 15.01.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Вплив складу і умов осадження на структуру та властивості вакуумних композитів на основі міді, зміцнених оксидом алюмінію/ Е. В. Зозуля, О. С. Терлецький, А. Г. Меньшиков, В. В. Субботіна, Т. О. Протасенко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.10–15. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Влияние состава и условий осаждения на структуру и свойства вакуумных композитов на основе меди, упрочненных оксидом алюминия/ Э. В. Зозуля, А. С. Терлецкий, А. Г. Меньшиков, В. В. Субботина, Т. А. Протасенко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.10–15. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Influence of composition and deposition conditions on the structure and properties of vacuum copper-based composites strengthened by aluminum oxide/ E. V. Zozulya, A. S. Terletskiy, A. G. Menshikov, V. V. Subbotina, T. A. Protasenko //Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No 4 (1176). – P.10–15. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-5459.**

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Зозуля Едуард Володимирович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник кафедри "Матеріалознавства"; вул. Багалія, 21, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: [zozulya.ev@gmail.com](mailto:zozulya.ev@gmail.com).

**Зозуля Едуард Владимирович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», младший научный сотрудник кафедры "Материаловедения"; ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: [zozulya.ev@gmail.com](mailto:zozulya.ev@gmail.com).

**Zozulya Edward** – researcher, National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute"; str. Bagalija, 21; Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: [zozulya.ev@gmail.com](mailto:zozulya.ev@gmail.com).

**Терлецький Олександр Семенович** – кандидат фізико-математичних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри "Матеріалознавства"; вул. Багалія, 21, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: [terletsk@yandex.com](mailto:terletsk@yandex.com)

**Терлецкий Александр Семенович** – кандидат физико-математических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры "Материаловедения"; ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: [terletsk@yandex.ru](mailto:terletsk@yandex.ru)

**Terletskiy Alexander Semenovich** – candidate of physics and mathematics, associate professor, National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute"; str. Bagalija, 21; Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: [terletsk@yandex.ru](mailto:terletsk@yandex.ru)

**Меньшиков Анатолій Григорович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри "Матеріалознавства"; вул. Багалія, 21, м. Харків, Україна, 61002

**Меньшиков Анатолий Григорьевич** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры "Материаловедения"; ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002

**Menshikov Anatoliy Grigoryevich** – candidate of technical sciences, associate professor, National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute"; str. Bagalija, 21; Kharkiv, Ukraine, 61002  
**Субботіна Валерія Валеріївна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри "Матеріалознавства"; вул. Багалія, 21, м. Харків, Україна, 61002

**Субботина Валерия Валерьевна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры "Материаловедения"; ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002

**Subbotina Valeriya Valeryevna** – candidate of technical sciences, associate professor, National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute"; str. Bagalija, 21; Kharkiv, Ukraine, 61002

**Протасенко Тетяна Олександрівна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри "Матеріалознавства"; вул. Багалія, 21, м. Харків, Україна, 61002

**Протасенко Татьяна Александровна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры "Материаловедения"; ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002;

**Protasenko Tatyana Alexandrovna** – associate professor, National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute"; str. Bagalija, 21; Kharkiv, Ukraine, 61002

УДК 544.2::621.798

А. Н. КОЛОСКОВА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ СЛОЕВ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Розглядається побудова моделі багат шарового комбінованого матеріалу що використовується в пакувальній промисловості. Для оцінки міцності з'єднань між шарами побудована удосконалена узагальнена класифікація існуючих матеріалів за способом з'єднань. Розглянуто методи та матеріали що застосовуються для створення багат шарових комбінованих матеріалів. Вперше побудована механічна модель полімерної молекули, на основі якої описана модель міжшарових з'єднань. Результати дослідження можуть бути використані для розрахунків міцності багат шарових комбінованих матеріалів та їх з'єднань.

**Ключові слова:** багат шарові плівки, комбіновані матеріали, міцність упаковки, полімерні матеріали, механічна модель

Рассматривается построение модели многослойного комбинированного материала используемого в упаковочной промышленности. Для оценки прочности соединений между слоями построена усовершенствованная обобщенная классификация существующих материалов по способу соединений. Рассмотрены методы и материалы применяемые для создания многослойных комбинированных материалов. Впервые построена механическая модель полимерной молекулы, на основе которой описана модель межслойных соединений. Результаты исследования могут быть использованы для расчетов прочности многослойных комбинированных материалов и их соединений.

**Ключевые слова:** многослойные пленки, комбинированные материалы, прочность упаковки, полимерные материалы, механическая модель

The problems connected to strength of multi-layer combined materials used in packaging industry are investigated. It is found that in such materials polymeric layers may function in multi-layer combinations both as main and binding material. Results. The main result of the investigation is in development of the layers joining model of multi-layer combined materials. The developed model of polymeric molecule is put in the basis of the layers adjoining model. Classification of multi-layer combined materials is built using materials and ways of their adjoining as classification principles. Originality. Classification of multi-layer combined materials is improved by using ways of materials connection as classification principle. For the first time the mechanical model of polymeric molecule is developed. For the first time it is proposed to define the strength of layers adjoining using calculation method instead of destructive experimental way. These calculations are to be based on intermolecular interaction mechanical modelling instead of materials adhesion. Practical value. Developed classification, model and approach based on them may be used for evaluation of layers adjoining strength in multi-layer combined materials. They may also be used for evaluation of strength of materials tension same as for their welding joints calculations.

**Keywords:** multi-layer films, combined materials, packaging strength, polymeric materials, mechanical model

**Введение.** Первое, на что обращает внимание покупатель, заходя в магазин, – это упаковка. Однако, помимо внешней привлекательности, упаковка должна обеспечить сохранность продукта, защитить его от внешних воздействий. Однослойные полимерные пленки, бумага или алюминиевая фольга в отдельности по различным причинам не могут быть использованы для упаковывания многих видов продукции. Поэтому проблема упаковывания продукции решается путем использования многослойных комбинированных материалов. Комбинация слоев дает возможность получить упаковочный материал с заданным комплексом свойств. В наше время 95 % упаковки, представленной на прилавках магазинов, выполнено из комбинированных материалов и она с успехом конкурирует с той же традиционной тарой из картона.

В то же время, на сегодняшний день наиболее часто применяемым методом определения прочности упаковки из комбинированного материала является испытание образцов на разрушение под нагрузкой в лабораторных условиях с последующим контролем промышленных изделий [1]. Несмотря на то, что этот метод позволяет получить много различных данных, которые пригодны для оценки разрушения, актуальной является проблема определения прочности комбинированных материалов и их соединений расчетным путем с целью повышения их эксплуатационных свойств.

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** В упаковочной промышленности используется огромное количество видов комбинированных материалов, наиболее широко изученными из которых являются полимерные композиции. К примеру, в работах [2–5] проведен достаточно глубокий обзор

гибких комбинированных материалов, созданных на основе полимерных композиций, описаны их структура, методы производства и области применения. Однако, если вести речь о многослойных, композиционных, комбинированных материалах, то помимо полимеров в них могут использоваться также и другие составляющие. Чаще всего это фольга и бумага [2]. Существуют различные виды классификаций упаковочной бумаги и стандарты на изготовления фольги [6], но при этом полностью отсутствуют попытки структурировать и единообразно классифицировать виды комбинированных материалов.

Создание и расчет свойств таких материалов представляют важную научно-техническую задачу и требуют анализа в каждом конкретном случае, поскольку приходится принимать во внимание множество переменных величин (материалы, толщина отдельных слоев, структура многослойного материала, способ его переработки и т. д.). Такие материалы могут характеризоваться спектром свойств, которым не обладал ни один из слоев в отдельности.

В первом приближении считают, что свойства таких материалов определяются либо по правилу смесей, либо при большом различии свойств параметрами компонента (слоя), имеющего экстремальные характеристики. Однако для точного расчета комбинации необходимо учитывать явления на границе раздела фаз, которые оказывают очень существенное влияние, особенно на деформационные и прочностные показатели.

Прочность комбинированных материалов практически всегда оценивается порядком установления слоев и обеспечением необходимого уровня адгезии-

© А. Н. Колоскова. 2016

онного взаимодействия между ними [7]. Однако работа адгезии не всегда соответствует адгезионной прочности соединения, поэтому для комбинированных материалов проверка адгезионной прочности носит по большей степени экспериментальный характер.

В работе [8] проведено исследование адгезионной прочности методом инфракрасной спектроскопии показано, что одним из существенных факторов, определяющих свойства покрытий, является взаимосвязь между прочностью адгезионного взаимодействия и распределением химических связей в системе полимер-волокно. Отмечено, что величина адгезии зависит не только от наличия, но и от числа связей между контактирующими телами. Для органических и неорганических веществ подтверждено образование химических связей между адгезивом и субстратом.

Борисовым С.А. в работе [9] было исследовано адгезионную прочность в зависимости от шероховатости бумаги. Показано, что чем меньше шероховатость бумаги, тем выше адгезионная прочность соединения.

Таким образом, для решения задачи прочности, основной проблемой является построение такой модели соединения слоев материала, которая позволила бы оценить прочность материала методами неразрушающего контроля.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью данной работы является повышение эксплуатационных свойств комбинированных упаковочных материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать единую классификацию многослойных комбинированных упаковочных материалов
2. Разработать модель соединения между слоями в многослойном комбинированном упаковочном материале

**Материалы исследования многослойных комбинированных упаковочных материалов.** Следует заметить, что ни один из слоев комбинированного материала в отдельности не имеет такого комплекса свойств, который бы удовлетворил все требования при упаковывании любой продукции. Именно это обстоятельство стало основой для проведения исследований по созданию многослойных пленок. Для достижения необходимых свойств многослойных упаковочных материалов одни компоненты стали не просто комбинировать, а присоединять к другим.

Объектом исследования стали многослойные комбинированные упаковочные материалы.

Предметом исследования являются способы соединения слоев в многослойных комбинированных материалах применяемых в упаковочной промышленности.

**Классификация многослойных комбинированных упаковочных материалов.** Приведенная обобщенная классификация основывается на материалах и способах их соединения. Каждый из ее элементов может быть проклассифицирован по количеству слоев, порядку их чередования, а также технологиях, применяемых для их изготовления. Согласно указанным признакам было выделено четыре группы материалов.

1. Многослойные полимерные пленки – пленки, получаемые из двух и более слоев полимерных материалов. Могут быть получены методами раздувной, плоскощелевой и плоскощелевой каландровой экструзии [2]. В качестве материалов, используемых для изготовления таких пленок, чаще всего применяются различные виды полиэтиленов, полипропиленов, полиамиды и их сополимеры [4].

2. Металлизированные полимерные пленки – пленки, получаемые из двух и более слоев, один из которых выполнен из металла методом напыления. Толщина напыленного слоя металла составляет до  $3 \cdot 10^{-7}$  м. Для металлизации используются такие цветные металлы, как алюминий, медь, никель, хром. Металлизация проводится в вакууме при высокой температуре: для алюминия, к примеру, эта температур составляет порядка  $1500^{\circ}\text{C}$ , при которой используемая алюминиевая проволока испаряется, а образующиеся пары металла осаждаются в зоне вакуума на поверхности пленки или бумаги. Из пленок металлизуют полипропилен, полиамид, полиэтилен, полиэтилентерефталат, сополимеры этих полимеров и многослойные полимерные пленки.

3. Ламинированный металл и бумага – материал, состоящий из двух и более слоев. В зависимости от жесткости металлического или бумажного слоя различают гибкие материалы и жесткие материалы. Гибкие материалы получают при использовании бумаги толщиной до 0,3 мм и мягкой металлической фольги толщиной до 50 мкм. Для получения жестких используется картон толщиной свыше 0,3 мм и металлическую фольгу толщиной свыше 50 мкм [10]. Для создания подобных комбинированных многослойных материалов применяют методы каширования – нанесения и закрепления на непрозрачный материал пленки с использованием клеевого соединения или припрессовки двух поверхностей – либо ламинирования – покрытия основы расплавленным полимером [10].

4. Комбинированный материал – многослойный материал, состоящий из трех слоев и более. В таком материале бумага прочно соединена склеиванием, «припрессовкой» или иными способами с полимерными пленками и фольгой, а также другими материалами с различным сочетанием слоев.

Для того, чтобы реализовать возможность увеличения прочности полимерных материалов за счет создания комбинированных систем, необходимо возможно полнее разобраться в причинах увеличения прочности. Анализ приведенной классификации многослойных комбинированных материалов показал, что существование таких материалов стало возможным только благодаря наличию в них полимерных слоев. С этой точки зрения особый интерес представляют комбинированные пленочные материалы. Во-первых, это одна из наиболее простых в отношении распределения напряжений в материале систем, являющаяся в некотором роде моделью для теоретических расчетов и их проверки. Во-вторых, прозрачность и оптическая активность ряда пленок позволяют наглядно изучать процесс разрушения комбинированных материалов и находить пути увеличения их прочности.

**Модель соединения между слоями в многослойном комбинированном упаковочном материале.** Полимер, входящий в структуру многослойного комбинированного материала, может находиться в двух состояниях: ориентированном и неориентированном. В ориентированном состоянии молекулы полимера имеют линейную структуру, неориентированный же полимер имеет молекулы в виде глобул. Однако, независимо от формы полимерной молекулы механизм разрушения полимера при растяжении сводится к разрушению вытянутых линейных макромолекул [11], при этом все сложные формы молекул получают путем изменения ее линейной структуры под действием различных факторов.

С учетом изложенного выше при построении модели соединения между слоями наибольший интерес представляет построение механической модели молекулы линейной структуры.

За основу была взята модель Драйдинга, при которой строго соблюдаются внутримолекулярные расстояния, но не учитываются относительные размеры отдельных атомов, т.е. заполненность внутримолекулярного пространства. Используя метод аналогий [12], можно отметить подобность модели Драйдинга стержневой системе. Следовательно, в основу построения модели может быть положен механический подход, основанный на представлении полимерной молекулы как механизма, реализовывающего процессы, происходящие при деформировании и разрушении полимерной молекулы.

Поскольку полипропилен является одним из самых используемых в упаковочной промышленности и одним из самых изученных полимерных материалов, то построение механической системы было решено проводить на основе его молекулы.

Полипропилен является карбоцепным разветвленным полимером, то есть его цепь состоит из атомов углерода, к которой присоединены метильные группы  $\text{CH}_3$  и водород. Длины химических связей углеродной  $\text{C}-\text{C}$  и углерод-водородной  $\text{C}-\text{H}$  имеют постоянную длину, а потому в модели их можно представить в виде звеньев-стержней постоянной длины.

Реальная полимерная цепь не является свободносочлененной, ее звенья ограничены в движении. Эти ограничения связаны с химическим строением молекулы, а именно с наличием валентных углов  $\gamma$  между звеньями. Таким образом, атомы углерода в цепи полипропилена расположены зигзагообразно. Угол между соседними химическими связями ни при каких условиях и воздействиях на молекулу не может быть заметно изменен без ее разрушения.

Поскольку при разрушении материала рассматривается линейная структура молекулы, работающей на растяжение, то нагрузка в этом случае будет восприниматься углеродным скелетом, и на данном этапе построения модели наличием боковых метильных групп и атомами водорода можно пренебречь.

Постоянство валентных углов не означает, что углеродный скелет молекулы является жестким, и что его конфигурация в дальнейшем не может быть изменена. В общем случае полимерная цепь вообще не имеет какой-либо одной определенной формы – она непрерывно изменяется под воздействием случайных

факторов, каковым является, в первую очередь, тепловое движение звеньев. На любой фазе этого движения валентный угол не может изменяться.

Для обеспечения вращения всех звеньев при построении механической модели места соединения всех звеньев (расположения атомов в модели Драйдинга) были представлены в виде шарниров с тремя степенями свободы (рис. 1).



Рис. 1 – Стержневая модель молекулы полимера

Поскольку межатомные расстояния и валентные углы имеют постоянные значения, и их изменение влечёт за собой разрушение молекулы, то в дальнейшем модель может быть представлена как рамная конструкция (рис. 2), состоящая из трехэлементных звеньев.

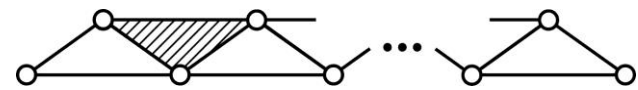


Рис. 2 – Рамная модель молекулы полимера

Каждое такое звено способно совершать только вращательное движение относительно осей, проходящих через совместные с соседними звеньями элементы. Таким образом, можно провести эквивалентное преобразование, заменив трехэлементные звенья системой вращательных кинематических пар (рис. 3).



Рис. 3 – Механическая линейная модель молекулы полимера

Длина каждого элемента может быть определена, как средняя линия треугольника, образованного при построении трехэлементной рамной конструкции.

Существует две разновидности соединений слоев материала. Первая – когда молекулы вещества проникают друг в друга, такое соединение характерно для сочетания двух полимерных слоев, произведенных методом экструзии. Вторая – соответствует сочетанию полимерного материала с фольгой или бумагой, при этом соединение происходит за счет сил адгезии между слоями. И в первом и во втором случае межслойное разрушение будет происходить за счет разрыва межмолекулярных связей. Это было учтено при построении нашей модели следующим образом.

Одним из основных правил построения механизма является правильное его закрепление. Для рассматриваемого случая – разрушение линейной полимерной молекулы при растяжении – произведено крепление только концевых звеньев, одно из которых зафиксировано на шарнирно неподвижной опоре (рис. 3).

Построение механизма крепления второго концевой звена должно учитывать разрушение межмолекулярных связей, разрыв двух молекул. От величины сил межмолекулярного взаимодействия зависят многие характеристики полимера – вязкость расплава,

растворимость, совместимость с другими полимерами и пластификаторами, механические и диэлектрические свойства, плотность упаковки и т. д. Поэтому второе концевое звено было шарнирно закреплено на ползуне преодолевающим при движении силу трения (рис. 3), величина силы трения будет прямо пропорциональна силе межмолекулярных связей.

**Результаты исследования многослойных комбинированных упаковочных материалов.** Результатом работы является построение модели соединения слоев таких материалов. В основу модели положена механическая модель молекулы полимера, который может выполнять функции как основного материала, так и являться связующим при создании многослойных комбинаций. Составлена классификация многослойных комбинированных материалов, использующая в качестве классификационных признаков материалы и способы их соединения, что позволило определить место полимера в многослойной композиции.

В качестве научной новизны впервые предложено определить прочность соединения слоев не экспериментальным, а теоретическим путем, основываясь не на адгезии материалов, а на межмолекулярном взаимодействии, рассматривая его как механическую систему.

**Обсуждение результатов исследования многослойных комбинированных упаковочных материалов.** С использованием полученных результатов модель межслойного соединения в многослойном комбинированном материале может быть представлена в виде комбинации механических моделей молекул полимера, имеющих внешние соединения. Предложенный механический подход к моделированию структуры и поведения полимерной молекулы под действием внешнего нагружения, а также модель, сформированная на его основе, позволяют нам анализировать прочность полимерной молекулы в многослойном комбинированном материале аналогично прочности стержневого механизма, используя все допущения и ограничения, применяемые для расчета механических систем: упругость, сплошность, однородность материала; линейная деформируемость системы; малость перемещений. Расчеты для такого механизма могут производиться по общепринятым формулам строительной механики.

В дальнейших исследованиях необходимым представляется формализация соответствующих зависимостей и их экспериментальная отработка с целью проверки применимости представленных моделей для решения задач определения прочностных свойств полимерных материалов.

**Выводы.** Впервые, основываясь на анализе способов соединения слоев, была составлена обобщенная классификация многослойных комбинированных материалов, используемых в упаковочной промышленности. Предложенная классификация позволила обосновать место полимера в многослойной композиции.

Предложен механический подход к моделированию структуры и поведения полимерной молекулы под действием внешнего нагружения, а также модель, сформированная на его основе, что позволят анализировать прочность полимерной молекулы аналогично

прочности стержневого механизма, используя все допущения и ограничения, применяемые для расчета механических систем.

Описан метод построения механической модели соединения слоев многослойного комбинированного материала, что в дальнейшем позволит определять прочность соединения слоев без его разрушения – расчетным путем рассматривая соединение как механическую систему, основываясь не на адгезии материалов, а на межмолекулярном взаимодействии.

#### Список литературы:

1. Шипинский, В. Г. Упаковка и средства пакетирования [Текст] / В. Г. Шипинский. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 416 с.
2. Шредер, В. Л. Многослойные пленки, барьерность ... и многое другое [Текст] / В. Л. Шредер, В. Н. Кривошей // Упаковка. – 2014. – № 2. – С. 19–25.
3. Такахаси, Г. Пленки из полимеров [Текст] / Г. Такахаси. – Ленинград: Химия, 1971. – 152 с.
4. Бристон, Д. Х. Полимерные пленки [Текст] / Д. Х. Бристон, Л. Л. Катан. – Москва: Химия, 1993. – 381 с.
5. Шредер, В. Л. Упаковывание пищевых продуктов в гибкие материалы [Текст] / В. Л. Шредер, А. Н. Гавва, В. Н. Кривошей // Упаковка. – 2011. – № 1. – С. 38–43.
6. Хэнлон, Дж. Ф. Упаковка и тара: проетирование, технологии применение [Текст] / Дж. Ф. Хэнлон, Р. Дж. Келси, Х. Е. Форсинио. – Москва: Профессия, 2008. – 632 с.
7. Богданова, Ю. Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов [Текст] / Ю. Г. Богданова. – Москва: Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 2010. – 68 с.
8. Борисова, А. С. Оценка адгезионной прочности комбинированных материалов на установке Micro Scratch Tester [Текст] / А. С. Борисова, Л. Г. Варепо // Омский научный вестник. – 2011. – № 1 (97). – С. 227–230.
9. Пасечник, М. В. Исследование адгезионного взаимодействия полимерных композиций с поверхностью текстильного материала [Текст] / М. В. Пасечник // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4/6 (70). – С. 18–22. doi:10.15587/1729-4061.2014.26237
10. Мальков, С. Барьерное ламинирование [Текст] / С. Мальков // Пластикс. – 2011. – № 5 (99). – С. 58–61.
11. Зуев, В. В. Физика и химия полимеров [Текст] / В. В. Зуев, М. В. Успенская, А. О. Олехнович. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2010. – 45 с.
12. Батороев, К. Б. Аналогии и модели в познании [Текст] / К. Б. Батороев. – Новосибирск: Наука, 1981. – 320 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Shpinskiy, V. G. (2004). Upakovka i sredstva paketirovaniya. Minsk: UP «Tekhnoprint», 416.
2. Shreder, V. L. (2014). Mnogosloynnye plenki, bar'yernost' ...i mnogoye drugoye. Upakovka, 2, 19–25.
3. Takakhasi, G. (1971). Plenki iz polimerov. Leningrad: Khimiya, 152.
4. Briston, K. H., Katan, L. L. (1993). Polimernyye plenki. Moskva: Khimiya, 381.
5. Shreder, V. L., Gavva, A. N., Krivoshej, V. N. (2011). Upakovyvaniye pishchevykh produktov v gibkiye materialy. Upakovka, 1, 38–41.
6. Khenlon, J. F., Kelsi, R. J., Forsinio, Kh. Ye. (2006). Upakovka i tara: proyetrovaniye, tekhnologi primenenie. Moskva: Professiya, 632.
7. Bogdanova, Ju. G. (2010). Adgeziya i jeje rol' v obespechenii prochnosti polimernykh kompozitov. Moskva: Moskovskiy gosudarstvennyy universitet imeni M. V. Lomonosova, 68.
8. Borisova, A. S., Varepo, L. G. (2011). Otsenka adgezionnoy prochnosti kombinirovannykh materialov na ustanovke Micro Scratch Tester. Omskii nauchnyi vestnik, 1 (97), 227–230.
9. Pasechnik, M. V. (2014). Studying the adhesive interaction between polymer composites and textile material surface. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(6(70)), 18–23. doi:10.15587/1729-4061.2014.26237
10. Mal'kov, S. (2011). Bar'yernoje laminirovaniye. Plastik, 5 (99), 58–61.

11. Zuyev, V. V., Uspenskaya, M. V., Olekhovich, A. O. (2010). Fizika i khimiya polimerov. Sankt-Peterburg: SPbGU ITMO, 45.
12. Batoroyev, K. B. (1981). Analogii i modeli v poznanii. Novosibirsk: Nauka, 320.

Поступила (received) 15.01.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Моделирование полимерных шарів багат шарових комбінованих пакувальних матеріалів / Г. М. Колоскова** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.16–20. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

**Моделирование полимерных слоев многослойных комбинированных упаковочных материалов / А. Н. Колоскова** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.16–20. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

**Modelling of polymeric layers of multi-layer combined packaging materials / G. Koloskova**//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176) .– P. 16–20. – Bibliogr.: 12. – 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; тел.: 050-160-56-22; e-mail: [sceperich@mail.ru](mailto: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; тел.: 050-160-56-22; e-mail: [sceperich@mail.ru](mailto:sceperich@mail.ru).

**Koloskova Ganna** – candidate of technical science, associate professor, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”; Chkalova str., 17, Kharkov, Ukraine 61070; tel.: 050-160-56-22; e-mail: [sceperich@mail.ru](mailto:sceperich@mail.ru).



**АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА КОМПЛЕКСАМИ**

УДК 621.311:65.035

**В. Ф. НАХОДОВ, А. І. ЗАМУЛКО, М. І. АЛЬ ШАРАРІ, В. В. ЧЕКАМОВА****ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЫРАВНИВАНИЯ СУТОЧНЫХ ГРАФИКОВ ЕЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

Запропоновані методичні підходи до оцінки величини економії витрат енергосистеми на вироблення електроенергії, що базуються на розгляді ряду сценаріїв поступового зниження нерівномірності добових графіків навантаження енергосистеми, розглянуто числовий приклад визначення зазначеної економії витрат на основі аналізу реальних графіків навантаження, що зафіксовані в один із режимних днів. Підтверджено, що потенційна економія грошових коштів в енергосистемі в результаті вирівнювання добових графіків її навантаження являє собою значну величину, що дозволить на її основі сформулювати сучасні механізми ефективного управління режимами виробництва та споживання електричного навантаження.

**Ключові слова:** добові графіки навантаження, додаткові витрати ТЕС, зниження витрат енергосистеми на виробленні електроенергії.

Предложены методические подходы к оценке величины экономии затрат энергосистемы на выработку электроэнергии, базирующиеся на рассмотрении ряда сценариев постепенного снижения неравномерности суточных графиков нагрузки энергосистемы, рассмотрен численный пример определения указанной экономии затрат на основе анализа реальных графиков нагрузки, зафиксированных в один из режимных дней. Подтверждено, что потенциальная экономия денежных средств в энергосистеме в результате выравнивания суточных графиков ее нагрузки представляет собой значительную величину, что позволит на ее основе формировать современные механизмы эффективного управления режимами производства и потребления электрической мощности.

**Ключевые слова:** суточные графики нагрузки, дополнительные затраты ТЭС, снижение затрат энергосистемы на выработку электроэнергии.

Proposals methodical approach for estimating the expenses savings of the power system for electricity generation that based on consideration of several scenarios of gradual smoothing of unevenness of chart for daily electrical load of power system, in other words, to gradually withdraw several of thermal power units from the chart covering the daily consumer demand for electric power. Numerical example of determining the specified expenses savings based on the analysis of the real load chart, fixed in one of the working days. It confirmed that the potential of money saving effectiveness in a energy system as a result of smoothing of daily unevenness charts of for daily electrical load of power system for electricity generation are great enough, that will allow to using for form modern market mechanisms for effective management modes of production and consumption of electric power.

**Keywords:** chart of daily electrical load, the additional expenses of thermal power system, saving expenses of power system for electricity generation.

**Введение.** Спрос потребителей на электрическую мощность в объединенной энергетической системе (ОЭС) Украины в течение суток характеризуется значительной неравномерностью [1, 2]. Необходимость покрытия неравномерной нагрузки негативно влияет на режимы производства и передачи электроэнергии, что, в свою очередь, приводит к снижению надежности электроснабжения, ухудшению качества электрической энергии, а также отрицательно сказывается на эффективности функционирования энергосистемы [1, 3–8].

Структура генерирующей части объединенной энергетической системы Украины не отвечает тем соотношениям базовых и маневренных мощностей, которые необходимы для эффективного регулирования суточных графиков нагрузки. На сегодняшний день оперативное управление режимами производства электроэнергии в объединенной энергосистеме Украины осуществляется главным образом за счет использования маневренных возможностей энергоблоков тепловых электростанций генерирующих компаний (ТЭС ГК), а также путем изменения количества этих энергоблоков, находящихся в работе в течение суток. Очевидно, что вынужденное использование энергоблоков ТЭС в качестве маневренных мощностей энергосистемы неизбежно связано со значительными дополнительными затратами на их эксплуатацию.

Дополнительных расходов тепловых электроста-

нций генерирующих компаний можно избежать или существенно сократить их величину, если большая часть энергоблоков ТЭС будут задействованы не в регулируемой, а в базовой части графиков нагрузки энергосистемы. Выведение части энергоблоков ТЭС из регулируемой части графика возможно, в частности, в случае выравнивания суточных графиков электрической нагрузки энергосистемы, то есть в случае увеличения спроса потребителей на мощность в ночные часы при одновременном снижении нагрузки энергосистемы в дневное время, прежде всего, в пиковые периоды.

Таким образом, дополнительные расходы тепловых электростанций, связанные с покрытием неравномерного спроса потребителей на мощность, необходимо рассматривать как потенциальную экономию денежных средств, которая может быть получена на уровне объединенной энергосистемы Украины, в случае выравнивания суточных графиков ее электрической нагрузки.

Кроме того, необходимо также принимать во внимание, что выравнивание графиков нагрузки энергосистемы неизбежно приведет к изменению структуры ее генерирующих мощностей, которые будут задействованы для покрытия этой нагрузки, что также будет способствовать снижению затрат на выработку электроэнергии.

© В. Ф. Находов, А. І. Замулко, М. І. Аль Шарарі, В. В. Чекамова, 2016

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Неравномерность электрической нагрузки является характерной особенностью энергетических систем практически всех стран. Проблема неравномерности спроса потребителей на электрическую мощность и необходимости ее покрытия исследовалась многими украинскими, а также зарубежными учеными [1–8].

Различным методам и способам повышения надежности и эффективности функционирования энергосистемы в условиях неравномерной ее нагрузки посвящены труды многих исследователей

[3–12]. В частности, в качестве одного из возможных путей достижения этой цели во многих публикациях рассматривается решение задачи выравнивания графиков электрической нагрузки энергетической системы [1–5, 7, 8, 10, 11].

Очевидно, что наименее затратным, наиболее быстрым и вполне реальным путем решения данной задачи является привлечение потребителей электроэнергии к участию в снижении неравномерности нагрузки энергосистемы [1–6, 10, 11]. Однако использование возможностей потребителей электроэнергии регулировать свой спрос на электрическую мощность для выравнивания графиков нагрузки энергосистемы становится реальным только при условии наличия экономической заинтересованности в этом самих потребителей.

Как известно, во многих странах мира принимаются меры по привлечению потребителей к выравниванию графиков нагрузки энергосистемы [1, 4, 5]. При этом управление спросом потребителей на электрическую мощность и энергию, в том числе и в Украине, осуществляется с помощью тарифов на электроэнергию [1].

Однако, как показали исследования, применяемые в Украине дифференцированные по времени тарифы на электроэнергию на сегодняшний день исчерпали свои возможности с точки зрения эффективного стимулирования потребителей к заметным изменениям характера их спроса на электрическую мощность [1]. Следовательно, для дальнейшего выравнивания графиков нагрузки украинской энергосистемы необходимо создание и использование новых, более действенных механизмов управления режимами потребления электроэнергии.

Экономическим источником стимулирования потребителей к снижению неравномерности их спроса на электрическую мощность должна являться экономия затрат энергосистемы, возникающая в результате выравнивания графиков ее нагрузки. Проблеме оценки величины этой экономии посвящено сравнительно немного отечественных публикаций [7, 12].

Очевидно, что зарубежные публикации, в которых рассматривались бы вопросы экономии затрат украинской энергосистемы на выработку электроэнергии при снижении неравномерности графиков ее нагрузки, отсутствуют. В отечественных же публикациях по данной проблеме зачастую рассматриваются и оцениваются только отдельные составляющие экономии затрат энергосистемы.

Поэтому в данной статье сделана попытка комплексной оценки потенциала снижения затрат ОЭС

Украины, возникающего в результате постепенного выравнивания графиков ее нагрузки.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является оценка экономии затрат объединенной энергосистемы Украины на выработку электроэнергии в результате снижения неравномерности спроса потребителей на электрическую мощность.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

1 – Определение состава дополнительных затрат энергосистемы на выработку электроэнергии, связанных с необходимостью покрытия неравномерного спроса на мощность.

2 – Разработка методических основ определения величины дополнительных затрат энергосистемы и возможного их снижения в результате выравнивания суточных графиков нагрузки энергосистемы.

3 – Количественная оценка потенциала снижения указанных дополнительных затрат энергосистемы на основе анализа реальных графиков нагрузки.

**Материалы и методы исследования потенциала снижения затрат энергосистемы в результате выравнивания суточных графиков ее электрической нагрузки.** В качестве исходной информации в процессе исследования рассматриваемой проблемы были использованы реальные статистические данные о функционировании объединенной энергетической системы Украины. В частности, рассматривались фактические суточные графики электрической нагрузки энергосистемы, а также тепловых электростанций, зафиксированные в режимные дни ряда предыдущих лет.

Указанные графики нагрузки, а также отдельные показатели работы энергосистемы, тепловых и атомных электростанций Украины, использованные в ходе исследования, были приняты на основании ежегодных статистических материалов Госэнергонадзора Украины, соответствующих ресурсов сети интернет, а также отдельных результатов предыдущих исследований, выполненных ранее авторами данной статьи.

Для оценки величины дополнительных затрат энергосистемы, связанных с необходимостью покрытия неравномерного спроса потребителей на электрическую мощность, а также потенциала снижения этих затрат был использован метод сценариев, основанный на рассмотрении ряда возможных ситуаций постепенного выравнивания реальных суточных графиков нагрузки энергосистемы.

**Результаты исследования потенциала снижения затрат энергосистемы в результате выравнивания суточных графиков ее электрической нагрузки.** Дополнительные затраты ТЭС ГК, связанные с необходимостью покрытия неравномерного спроса потребителей на мощность, прежде всего, связаны с дополнительным расходом топлива на ежедневные пуски тепловых энергоблоков, которые используются в регулируемой части графика электрической нагрузки объединенной энергосистемы. В частности, для нормального прохождения ночного минимума нагрузки энергосистемы ежесуточно на 4...6 часов отключается значительное количество энергоблоков и корпусов дубль-блоков ТЭС, после чего эти энергоблоки снова вводятся в работу на дневной период. Причем

число отключаемых на ночь тепловых энергоблоков, как правило, ежегодно возрастает.

При этом оценка величины дополнительных затрат ТЭС ГК на ежесуточные пуски их энергоблоков, задействованных для регулирования графиков нагрузки энергосистемы, (и, соответственно, потенциала снижения этих затрат) может быть получена на основании следующих рассуждений.

На время ночного провала нагрузки энергосистемы в основном выводятся в холодный резерв (останавливаются) тепловые энергоблоки мощностью 150 и 200 МВт, а также корпуса блоков 300 МВт. То есть, можно принять, что средняя мощность энергоблоков ТЭС, используемых в регулируемой части графика нагрузки энергосистемы, составляет 200 МВт.

Таким образом, исходя из конфигурации суточных графиков электрической нагрузки энергосистемы, может быть определена общая мощность энергоблоков ТЭС ( $P_{\text{рег.ТЭС}}$ ), которые ежесуточно необходимо задействовать в регулируемой части этих графиков, а также среднее количество таких энергоблоков ( $N_{\text{рег.ТЭС}}$ ):

$$N_{\text{рег.ТЭС}} = \frac{P_{\text{рег.ТЭС}}}{200}. \quad (1)$$

Очевидно, что ежесуточные пуски энергоблоков и корпусов ТЭС связаны со значительным дополнительным расходом топлива для розжига котлоагрегатов, причем топлива наиболее дорогостоящего: природного газа или мазута. Так, для пуска одного энергоблока ТЭС из холодного резерва необходимо от 50 до 100 тыс. м<sup>3</sup> природного газа (то есть, в среднем 75 тыс. м<sup>3</sup>). Следовательно, при ежесуточном выведении в холодный резерв в ночной период соответствующего количества ( $N_{\text{рег.ТЭС}}$ ) энергоблоков ТЭС годовые затраты на топливо для их пусков ( $Z_{\text{т.пуск}}$ ) могут быть определены как:

$$Z_{\text{т.пуск}} = N_{\text{рег.ТЭС}} \times 75 \times 365 \times C_{\text{н.г}}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{н.г}}$  – цена природного газа, грн./тыс. куб. м.

Причем это только стоимость топливной составляющей. Реальные дополнительные затраты на пуски тепловых энергоблоков, которые останавливаются на ночной период, будут несколько большими. Исходя из стоимости пусков энергоблоков ТЭС, установленной ГП «Энергорынок» для определения оптовой рыночной цены на электроэнергию, полные дополнительные затраты на ежесуточные пуски этих блоков ( $\Delta Z_{\text{доп.пуск}}$ ) в среднем на 7 % превышают стоимость соответствующей топливной составляющей.

Следовательно, возможное снижение дополнительных затрат тепловых электростанций на ежесуточные пуски их энергоблоков ( $\Delta Z_{\text{доп.пуск}}$ ) может быть определено, исходя из количества энергоблоков ТЭС, исключаемых из регулируемой части графиков электрической нагрузки энергосистемы ( $\Delta N_{\text{рег.ТЭС}}$ ), в случае соответствующего выравнивания этих графиков:

$$\Delta Z_{\text{доп.пуск}} = (\Delta N_{\text{рег.ТЭС}} \times 75 \times 365 \times C_{\text{н.г}}) \times 1,07. \quad (3)$$

Следующая составляющая дополнительных затрат ТЭС ГК, часть энергоблоков которых задействована в регулируемой части графика нагрузки энергосистемы, возникает в связи с энергетически неэффективными режимами работы этих энергоблоков. Речь идет о том, что на тепловых энергоблоках, участвующих в регулировании графиков покрытия нагрузки энергосистемы, снижается коэффициент использования их установленной мощности и соответственно возрастает удельный расход условного топлива на производство электроэнергии.

Исследования, выполненные авторами этой статьи, свидетельствуют, что между средними фактическими удельными расходами условного топлива энергоблоками ТЭС ( $b_{y.m}$ ) и фактическими коэффициентами использования их установленной мощности (КИ-УМ) существует очень тесная статистическая зависимость. Следовательно, для количественной оценки дополнительных затрат тепловых электростанций, связанных с использованием их энергоблоков в регулируемой части графика нагрузки энергосистемы, (и, соответственно, потенциала снижения этих затрат), прежде всего, необходимо на основании соответствующих статистических данных построить математическую модель зависимости между упомянутыми показателями, простейшая из которых может иметь вид уравнения парной линейной регрессии:

$$b_{y.m} = A - B \times \text{КИУМ}, \quad (4)$$

где А и В – параметры (константы) уравнения регрессии.

Используя зависимость (4), можно вычислить ожидаемые значения среднего удельного расхода условного топлива тепловыми энергоблоками в случае использования определенного их количества в регулируемой части графиков нагрузки энергосистемы ( $b_{y.m.\text{рег.}}$ ), а также при условии, что энергоблоки ТЭС будут задействованы только в нерегулируемой (базовой) части графиков нагрузки ( $b_{y.m.\text{баз.}}$ ).

Тогда количественная оценка величины возможного снижения дополнительных затрат тепловых электростанций, связанных с энергетически неэффективными режимами работы части их энергоблоков, используемых в качестве маневренных генерирующих мощностей ( $\Delta Z_{\text{доп.рег.}}$ ), при достижении той или иной степени выравнивания суточных графиков электрической нагрузки энергосистемы, может быть получена с помощью выражения:

$$\Delta Z_{\text{доп.рег.}} = W_{\text{выр.ТЭС}} \times C_{\text{т.выр}} \times (b_{y.m.\text{рег.}} - b_{y.m.\text{баз.}}) / b_{y.m.\text{рег.}} \quad (5)$$

где  $W_{\text{выр.ТЭС}}$  – количество электроэнергии, произведенное на ТЭС в течение соответствующего периода;

$C_{\text{т.выр}}$  – средняя величина топливной составляющей в себестоимости электроэнергии, выработанной тепловыми энергоблоками, грн./кВт.ч.

Еще одна составляющая дополнительных затрат энергосистемы, возникающих вследствие использования энергоблоков тепловых электростанций в регулируемой части графиков нагрузки, связана с тем, что применение таких энергоблоков в качестве маневрен-

ных генерирующих мощностей не предусмотрено их конструкцией. Работа энергоблоков ТЭС в режиме частого изменения их нагрузки неизбежно приводит к повышенному износу оборудования, к снижению надежности его работы, к повышенной аварийности и, следовательно, к увеличению затрат на плановые и внеплановые ремонты таких энергоблоков.

Количественная оценка этой составляющей дополнительных затрат может быть получена косвенным путем на основе анализа статистических данных Министерства энергетики и угольной промышленности Украины о фактических ежегодных расходах ТЭС на выполнение ремонтов их энергоблоков. При этом упомянутые статистические данные необходимо рассматривать и анализировать отдельно для двух «разновидностей» тепловых электростанций: тех станций, которые систематически (или достаточно часто) используются в регулируемой части графиков нагрузки, и для тех ТЭС, энергоблоки которых никогда (или очень редко) используются в качестве маневренных генерирующих мощностей энергосистемы.

В качестве достаточно объективной оценки дополнительных затрат энергосистемы в связи со снижением надежности работы тепловых энергоблоков, задействованных в регулируемой части графиков нагрузки, может быть использована разность между среднестатистическими значениями расходов на ремонты, имевшими место на ТЭС первой и второй «разновидности». При этом целесообразно определять удельную величину этих дополнительных затрат ( $Z_{уд.рем.}$ ) в расчете на один дополнительный пуск-останов тепловых энергоблоков:

$$Z_{уд.рем.} = (Z_{рем.рег.} - Z_{рем.баз.}) / (N_{пуск.рег.} - N_{пуск.баз.}), \quad (6)$$

где  $Z_{уд.рем.}$  и  $Z_{рем.баз.}$  – фактические средние годовые затраты на ремонты энергоблоков ТЭС, которые соответственно систематически (достаточно часто) и очень редко используются в качестве маневренных генерирующих мощностей энергосистемы;

$N_{пуск.рег.}$  и  $N_{пуск.баз.}$  – фактическое среднее количество пусков-остановов энергоблоков ТЭС, которые соответственно систематически (достаточно часто) и очень редко используются для регулирования нагрузки энергосистемы.

В случае постепенного выравнивания графиков нагрузки энергосистемы возможное снижение дополнительных затрат на ремонты энергоблоков тепловых электростанций, используемых в качестве маневренных генерирующих мощностей ( $Z_{доп.рем.}$ ), может быть оценено, исходя из ожидаемого уменьшения количества ежесуточных пусков-остановов этих энергоблоков ( $\Delta Z_{доп.рем.}$ ):

$$\Delta Z_{доп.рем.} = \Delta N_{рег.ТЭС} \times 365 \times Z_{уд.рем.} \quad (7)$$

Как было сказано выше, при постепенном выравнивании суточных графиков нагрузки энергосистемы возможным является не только увеличение базовой мощности тепловых электростанций, но также и другие изменения в покрытии этих графиков. В частности, исключение определенного количества энергобло-

ков тепловых электростанций из регулируемой части графиков нагрузки ОЭС может компенсироваться соответствующим увеличением базовой мощности АЭС при неизменном количестве базовых энергоблоков ТЭС. Очевидно, что в данном случае общие затраты энергосистемы на выработку электроэнергии также будут снижаться.

Возможное снижение затрат на выработку электроэнергии в результате замещения части тепловых энергоблоков соответствующим увеличением мощности энергоблоков атомных электростанций ( $\Delta Z_{выр.}$ ) может быть определено на основании зависимости:

$$\Delta Z_{выр.} = \Delta W_{выр.АЭС} \times (C_{выр.ТЭС} - C_{выр.АЭС}), \quad (8)$$

где  $\Delta W_{выр.АЭС}$  – увеличение объема электроэнергии, вырабатываемой на АЭС в течение соответствующего периода;

$C_{выр.ТЭС}$  и  $C_{выр.АЭС}$  – средняя себестоимость выработки электроэнергии энергоблоками тепловых и атомных электростанций, грн./кВт.ч.

Таким образом, общая величина возможного снижения затрат энергосистемы, связанных с вынужденным использованием энергоблоков ТЭС в качестве маневренных генерирующих мощностей, которая может быть достигнута в результате выравнивания суточных графиков нагрузки, может быть определена как сумма приведенных выше составляющих:

$$\Delta Z_{доп.общ.} = \Delta Z_{доп.пуск.} + \Delta Z_{доп.рег.} + \Delta Z_{доп.рем.} + \Delta Z_{доп.выр.} \quad (9)$$

Расчет численных значений возможного снижения затрат энергосистемы в случае постепенного выравнивания суточных графиков ее электрической нагрузки может быть продемонстрирован на примере анализа графика нагрузки тепловых электростанций для зимнего режимного дня 2014 года, которые при выполнении соответствующих расчетов приняты в качестве базовых.

Для количественной оценки потенциала экономии затрат энергосистемы целесообразно рассмотреть несколько сценариев, которые соответствуют постепенному выравниванию суточных графиков ее нагрузки, то есть постепенному выведению определенного количества энергоблоков ТЭС из регулируемой части этих графиков. Возможные изменения графиков покрытия электрической загрузки ОЭС Украины в случае их постепенного выравнивания приведены в табл. 2.

Анализируя график электрической нагрузки тепловых электростанций в рассматриваемый зимний режимный день, можно сделать вывод, что общая величина маневренной мощности энергоблоков ТЭС с некоторым округлением составляла 2300 МВт. При этом среднее количество энергоблоков тепловых электростанций, которые ежесуточно использовались в регулируемой части графика электрической нагрузки энергосистемы, исходя из зависимости (1), округлено было равным 12.

При сегодняшней цене 1000 м<sup>3</sup> природного газа для промышленных потребителей, равной 6874 грн., дополнительные затраты ТЭС ГК на ежесуточные пуски их энергоблоков, используемых в регулируемой

части графиков нагрузки энергосистемы, на основании формулы (3) составляли бы:

$$\Delta Z_{\text{доп.пуск}} = 12 \times 365 \times 75 \times 6874 \times 1,07 = 2416,2 \frac{\text{млн.грн.}}{\text{год}}$$

Таким образом, при условии достижения идеально ровных суточных графиков электрической нагрузки ОЭС, можно было бы избежать дополнительных затрат тепловых электростанций на ежесуточные пуски их энергоблоков, используемых сейчас в качестве маневренных мощностей, на общую сумму 2,42 млрд. грн./год.

В случае же постепенного выравнивания графиков нагрузки энергосистемы, например, при увеличении электрической нагрузки энергосистемы в ночной период на 200 МВт из регулируемой части графиков нагрузки энергосистемы может быть исключен 1 энергоблок ТЭС. При этом количество ежесуточных пусков тепловых энергоблоков может быть уменьшено на 1 (табл. 2). Следовательно, дополнительные затраты тепловых электростанций на пуски их энергоблоков ( $\Delta Z_{\text{доп.пуск}}$ ) могут быть снижены на:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{\text{доп.пуск}} &= 1 \times 75 \times 365 \times 6874 \times 1,07 = \\ &= 201,35 \frac{\text{млн.грн.}}{\text{год}} \end{aligned}$$

Возможное снижение затрат на пуски энергоблоков тепловых электростанций для других сценариев увеличения ночной нагрузки ОЭС с учетом приведенного в табл. 2 уменьшения среднесуточного количества пусков этих блоков определено аналогичным образом. Результаты этих расчетов для всех рассматриваемых сценариев постепенного выравнивания графиков нагрузки энергосистемы приведены в табл. 4.

Количественная оценка возможного снижения второй составляющей дополнительных затрат тепловых электростанций, связанной со снижением энергетической эффективности части их энергоблоков, используемых в качестве маневренных генерирующих мощностей ( $\Delta Z_{\text{доп.реж.}}$  в формуле (9)), может быть получена следующим образом.

В табл. 1 приведены статистические данные о средних фактических значениях коэффициентов использования установленной мощности (КИУМ) энергоблоков ТЭС ГК и средних величинах их удельного расхода условного топлива для ряда предыдущих лет.

Таблица 1 – Средние значения коэффициентов использования установленной мощности и удельного расхода условного топлива энергоблоков ТЭС ГК

Год	Средний КИУМ, %	Средний удельный расход условного топлива ( $b_{y.m}$ ), г у.т./кВт.ч
2003	27,4	392,6
---	---	---
2005	25,3	400,5
---	---	---
2007	30,9	393
---	---	---
2015	22	450

Линейная регрессионная зависимость между приведенными в табл. 1 показателями имеет уравнение:

$$b_{y.m} = 572,8098 - 6,20397 \times \text{КИУМ}.$$

Анализируя существующий график электрической нагрузки тепловых электростанций в зимний режимный день 2014 года, можно определить, что средняя мощности энергоблоков ТЭС ГК, задействованных как в базовой, так и в регулируемой части этого графика, составляла 9906,71 МВт. Общая установленная мощность имеющихся в Украине тепловых энергоблоков равна 28700 МВт. Следовательно, величина коэффициента использования установленной мощности энергоблоков ТЭС для указанного режимного дня равна 34,5 %.

Используя приведенное выше уравнение регрессии, можно оценить величину существующего среднего удельного расхода условного топлива тепловых энергоблоков, которая в данном случае равна 358,8 г у.т. / кВт.ч.

В случае постепенного выравнивания графиков электрической нагрузки энергосистемы, определенное количество тепловых энергоблоков будет исключаться из регулируемой части этих графиков (табл. 2). При этом в «зимний» период на соответствующее количество энергоблоков будет увеличиваться базовая мощность ТЭС. Следовательно, возрастет и коэффициент использования общей установленной мощности тепловых электростанций.

Так, при увеличении нагрузки энергосистемы в ночной период на 200 МВт из регулируемой части ее суточных графиков может быть исключен 1 энергоблок ТЭС (табл. 2). При этом в «зимний» период этот энергоблок будет использоваться в базовой части суточных графиков нагрузки энергосистемы. Тем самым общий объем выработки электроэнергии тепловыми энергоблоками за счет повышения их нагрузки в ночной период, длящийся 6 часов, увеличится на 1200 МВт.ч в сутки. Средняя мощность используемых энергоблоков ТЭС в этом случае возрастет на 50 МВт.

Следовательно, для зимнего режимного дня 2014 года при повышении нагрузки энергосистемы в ночной период на 200 МВт и указанных выше изменениях в покрытии этой нагрузки коэффициент использования установленной мощности тепловых электростанций был бы равен 34,7 %. Используя приведенное выше уравнение регрессии, можно оценить, что при таком значении КИУМ ТЭС средний удельный расход условного топлива их энергоблоков был бы равен 357,5 г у.т./кВт.ч.

Таким образом, в указанных условиях удельный расход условного топлива на ТЭС по сравнению с фактическим использованием их энергоблоков в зимний режимный день 2014 года в среднем мог бы сократиться на 1,3 г у.т./кВт.ч, то есть на 0,35 %.

Выработка электрической энергии в Украине в 2015 году составляла 157,265 млрд. кВт.ч. При этом доля тепловых электростанций в общем объеме производства электроэнергии была равной 31,5 %, а затраты на топливо для их энергоблоков составляли 0,91 грн./кВт.ч. Следовательно, при условии снижения среднего удельного расхода условного топлива на тепловых электростанциях на 0,35 %, общие затраты на топливо для производства электроэнергии на ТЭС ( $\Delta Z_{\text{выр.ТЭС}}$ ) могли бы сократиться на:

$$157,265 \times 0,315 \times 0,91 \times 0,0035 \times 10^3 = 157,78 \frac{\text{млн.грн}}{\text{год}}$$

Принимая во внимание, что указанное снижение удельного расхода условного топлива может быть достигнуто только в «зимний» период (табл. 2), возможное сокращение затрат на выработку электрической энергии в результате повышения коэффициента использования установленной мощности энергоблоков ТЭС ( $\Delta Z_{\text{доп.рем.}}$ ) при увеличении нагрузки энергосистемы в ночной период на 200 МВт составляет 78,89 млн. грн./год.

Возможное снижение затрат на выработку электроэнергии в результате повышения КИУМ энергоблоков ТЭС для других сценариев увеличения ночной нагрузки ОЭС определено на основании аналогичных расчетов. Результаты этих расчетов для всех рассматриваемых сценариев постепенного выравнивания графиков нагрузки энергосистемы приведены в табл. 4.

Третья составляющая дополнительных затрат ТЭС ГК, возникающих вследствие вынужденного использования тепловых энергоблоков в регулируемой части графиков нагрузки энергосистемы ( $\Delta Z_{\text{доп.рем.}}$  в зависимости (9)), связана с тем, что увеличиваются расходы на плановые и внеплановые ремонты таких энергоблоков.

Как было сказано, оценка указанных дополнительных затрат может быть получена косвенным путем на основе анализа статистических данных о количестве пусков-остановов энергоблоков ТЭС, связанных с проведением на них плановых или внеплановых ремонтов, а также о фактических ежегодных затратах на выполнение этих ремонтов [13]. Так, например, энергоблоки Кураховской и Старобешевской ТЭС в 2007 году принимали наибольшее участие в регулировании электрической нагрузки ОЭС Украины. Количество пусков-остановов энергоблоков на этих станциях в 2007 году составляло соответственно 314 и 297. С другой стороны, энергоблоки 200 МВт и корпуса блоков 300 МВт Змиевской ТЭС в том же году были в значительно меньшей степени задействованы для регулирования нагрузки энергосистемы. При этом количество пусков-остановов на этой станции равнялось 138.

Согласно статистическим данным Министерства энергетики и угольной промышленности Украины затраты на текущие ремонты энергоблоков Старобешевской и Змиевской ТЭС в том же 2007 году составляли соответственно 27,4 и 24,4 млн. грн. Принимая во внимание, что количество энергоблоков на указанных электростанциях одинаково, можно предположить, что большие затраты на ремонты на Старобешевской ТЭС, прежде всего, были вызваны увеличением количества и длительности аварийных ремонтов энергоблоков вследствие их использования в качестве маневренных генерирующих мощностей энергосистемы.

Таким образом, удельные дополнительные затраты на ремонты, связанные со снижением надежности энергоблоков из-за увеличения числа их пусков-остановов, можно оценить, используя зависимость (6):

$$z_{\text{доп.рем.}} = (27,4 - 24,4) / (187 - 138) = 0,019 \frac{\text{млн.грн}}{\text{год}}$$

Принимая во внимание, только изменение курса украинской валюты к доллару США, произошедшее с 2007 года, указанную удельную величину дополнительных затрат ТЭС ГК на ремонты энергоблоков, используемых в регулируемой части графиков нагрузки энергосистемы, на сегодняшний день можно округленно принять равной 0,1 млн. грн. в год в расчете на каждый пуск-останов таких энергоблоков.

В случае постепенного выравнивания графиков нагрузки энергосистемы, возможное снижение дополнительных затрат на текущие ремонты энергоблоков ТЭС, задействованных в регулируемой части этих графиков, можно оценить в соответствии с ожидаемым уменьшением количества их пусков-остановов (табл. 2). Так, при увеличении электрической нагрузки энергосистемы в ночной период на 200 МВт из регулируемой части графиков нагрузки энергосистемы может быть исключен 1 энергоблок ТЭС. При этом количество ежесуточных пусков тепловых энергоблоков может быть уменьшено на 1 (табл. 2). Следовательно, возможное снижение дополнительных затрат тепловых электростанций на текущие ремонты их энергоблоков будет составлять:

$$\Delta Z_{\text{доп.рем.}} = 1 \times 365 \times 0,1 = 36,5 \text{ млн.грн/год.}$$

Возможное снижение затрат на ремонты энергоблоков тепловых электростанций для других сценариев увеличения ночной нагрузки ОЭС определено аналогичным образом с учетом приведенного в табл. 2 уменьшения среднесуточного количества пусков этих блоков. Результаты этих расчетов для всех рассматриваемых сценариев постепенного выравнивания графиков нагрузки энергосистемы приведены в табл. 4.

Как свидетельствует табл. 2, при постепенном выравнивании суточных графиков нагрузки энергосистемы исключение определенного количества энергоблоков тепловых электростанций из регулируемой части этих графиков в «летний» период будет компенсироваться соответствующим увеличением базовой мощности АЭС. Очевидно, что в данном случае общие затраты энергосистемы на выработку электроэнергии будут снижаться.

Так, при увеличении нагрузки энергосистемы в ночной период на 200 МВт из регулируемой части ее суточных графиков может быть исключен 1 энергоблок ТЭС (табл. 2). При этом в «летний» период в графике покрытия нагрузки этот энергоблок будет замещен соответствующим увеличением мощности энергоблоков АЭС, используемых в базовой части суточных графиков нагрузки энергосистемы. Тем самым общий объем выработки электроэнергии атомными энергоблоками за счет указанного повышения их мощности увеличится на 4800 МВт.ч в сутки.



Таблица 2 – Возможные изменения графиков покрытия электрической нагрузки ОЭС Украины в случае их постепенного выравнивания

Увеличение электрической нагрузки энергосистемы в ночной период									
на 200 МВт		на 400 МВт		на 600 МВт		на 800 МВт		на 1000 МВт	
6 месяцев в году («лето»)	6 месяцев в году («зима»)	6 месяцев в году («лето»)	6 месяцев в году («зима»)	6 месяцев в году («лето»)	6 месяцев в году («зима»)	6 месяцев в году («лето»)	6 месяцев в году («зима»)	6 месяцев в году («лето»)	6 месяцев в году («зима»)
Из регулируемой части графика нагрузки ОЭС исключается 1 блок ТЭС	Из регулируемой части графика нагрузки ОЭС исключается 1 блок ТЭС	Из регулируемой части графика нагрузки ОЭС исключаются 2 блока ТЭС	Из регулируемой части графика нагрузки ОЭС исключаются 2 блока ТЭС	Из регулируемой части графика нагрузки ОЭС исключаются 3 блока ТЭС	Из регулируемой части графика нагрузки ОЭС исключаются 3 блока ТЭС	Из регулируемой части графика нагрузки ОЭС исключаются 4 блока ТЭС	Из регулируемой части графика нагрузки ОЭС исключаются 4 блока ТЭС	Из регулируемой части графика нагрузки ОЭС исключаются 5 блоков ТЭС	Из регулируемой части графика нагрузки ОЭС исключаются 5 блоков ТЭС
Количество ежесуточных пусков-остановов блоков ТЭС уменьшается на 1	Количество ежесуточных пусков-остановов блоков ТЭС уменьшается на 1	Количество ежесуточных пусков-остановов блоков ТЭС уменьшается на 2,5	Количество ежесуточных пусков-остановов блоков ТЭС уменьшается на 2,5	Количество ежесуточных пусков-остановов блоков ТЭС уменьшается на 4	Количество ежесуточных пусков-остановов блоков ТЭС уменьшается на 4	Количество ежесуточных пусков-остановов блоков ТЭС уменьшается на 5	Количество ежесуточных пусков-остановов блоков ТЭС уменьшается на 5	Количество ежесуточных пусков-остановов блоков ТЭС уменьшается на 6,5	Количество ежесуточных пусков-остановов блоков ТЭС уменьшается на 6,5
Базовая мощность ТЭС не изменяется	Базовая мощность ТЭС увеличивается на 200 МВт	Базовая мощность ТЭС не изменяется	Базовая мощность ТЭС увеличивается на 400 МВт	Базовая мощность ТЭС не изменяется	Базовая мощность ТЭС увеличивается на 600 МВт	Базовая мощность ТЭС не изменяется	Базовая мощность ТЭС увеличивается на 800 МВт	Базовая мощность ТЭС не изменяется	Базовая мощность ТЭС увеличивается на 1000 МВт
Базовая мощность АЭС увеличивается на 200 МВт	Базовая мощность АЭС не изменяется	Базовая мощность АЭС увеличивается на 400 МВт	Базовая мощность АЭС не изменяется	Базовая мощность АЭС увеличивается на 600 МВт	Базовая мощность АЭС не изменяется	Базовая мощность АЭС увеличивается на 800 МВт	Базовая мощность АЭС не изменяется	Базовая мощность АЭС увеличивается на 1000 МВт	Базовая мощность АЭС не изменяется

Средняя себестоимость выработки электроэнергии энергоблоками тепловых и атомных электростанций в 2015 году составляла соответственно 1,22 и 0,42 грн./кВт.ч. Таким образом, в случае замещения 1 энергоблок ТЭС, выводимого из регулируемой части графиков нагрузки энергосистемы, повышением базовой мощности энергоблоков АЭС на 200 МВт, годовые затраты ( $\Delta Z_{\text{выр.}}$ ) на производство соответствующего объема электроэнергии могли бы сократиться на:

$$4800 \times 10^{-3} \times 365 \times (1,22 - 0,42) = 1401,6 \frac{\text{млн.грн.}}{\text{год}}$$

Принимая во внимание, что указанное замещение 1 энергоблока ТЭС соответствующим увеличением мощности энергоблоков АЭС может быть достигнуто только в «летний» период, возможное сокращение затрат на выработку электрической энергии ( $\Delta Z_{\text{выр.}}$ ) составляет 700,8 млн. грн./год.

Возможное снижение затрат на выработку электроэнергии в результате постепенного замещения тепловых энергоблоков соответствующим увеличением мощности атомных энергоблоков для других сценариев повышения ночной нагрузки ОЭС определено на основании аналогичных рассуждений и расчетов. Результаты этих расчетов для всех рассматриваемых сценариев постепенного выравнивания графиков нагрузки энергосистемы приведены в табл. 4.

Полученные на основании приведенных выше рассуждений суммарные величины ожидаемого снижения годовых затрат энергосистемы на выработку электроэнергии при условии постепенного выравнивания суточных графиков ее нагрузки также указаны в табл. 4.

Нетрудно заметить, что указанные суммарные значения ожидаемого снижения годовых затрат энергосистемы на выработку электроэнергии для рассмотренных сценариев выравнивания суточных графиков нагрузки энергосистемы изменяются пропорционально величине мощности, на которую в каждом сценарии увеличивается нагрузка ОЭС в ночной период.

В связи с этим, для упрощения оценки величины возможной экономии затрат на производство электроэнергии для любого сценария выравнивания суточных графиков нагрузки энергосистемы необходимо определить регрессионную зависимость между этой экономией и значениями показателя, характеризующего неравномерность графиков нагрузки. В качестве такого показателя наиболее целесообразно использовать величину среднеквадратичного отклонения (СКО) часовых значений нагрузки тепловых электростанций от их среднесуточной величины. Численные значения этого показателя неравномерности графиков нагрузки ТЭС, соответствующие рассматриваемым сценариям увеличения нагрузки энергосистемы в ночной период (табл. 2), приведены в табл. 3.

На основании имеющихся суммарных значений ожидаемого снижения годовых затрат энергосистемы на выработку электроэнергии для разных сценариев выравнивания суточных графиков нагрузки (табл. 4) и величин СКО ( $\sigma$ ) соответствующих графиков нагрузки ТЭС (табл. 3) можно установить, что линейная регрессионная зависимость между этими показателями имеет уравнение:

$$\Delta Z_{\text{сум.выр.}} = 11335,96 - 12,8328 \times \sigma$$

Таблица 3 – Показатели неравномерности графиков нагрузки ТЭС для рассматриваемых сценариев увеличения нагрузки энергосистемы в ночной период

Сценарий	Увеличение электрической нагрузки в ночной период	Дисперсия суточного графика нагрузки ТЭС	СКО ( $\sigma$ ) суточного графика нагрузки ТЭС
0	Базовый график 17.12.2014	786106,5	887
1	на 200 МВт	640936,9	801
2	на 400 МВт	511419,5	715
3	на 600 МВт	397554,3	631
4	на 800 МВт	299341,3	547
5	на 1000 МВт	216780,4	466

Таблица 4 – Возможное снижение затрат энергосистемы в результате выравнивания суточных графиков ее электрической нагрузки (млн. грн. в год)

Составляющие затрат энергосистемы на выработку электроэнергии	Увеличение электрической нагрузки энергосистемы в ночной период									
	на 200 МВт		на 400 МВт		на 600 МВт		на 800 МВт		на 1000 МВт	
	6 месяцев в году (лето)	6 месяцев в году (зима)	6 месяцев в году (лето)	6 месяцев в году (зима)	6 месяцев в году (лето)	6 месяцев в году (зима)	6 месяцев в году (лето)	6 месяцев в году (зима)	6 месяцев в году (лето)	6 месяцев в году (зима)
Возможное снижение затрат на ежесуточные пуски энергоблоков ТЭС	100,68	100,68	251,69	251,69	402,7	402,7	503,38	503,38	654,39	654,39
Возможное снижение затрат на выработку электроэнергии в результате повышения КИУМ энергоблоков ТЭС	0	78,89	0	155,53	0	209,62	0	272,73	0	351,62
Возможное снижение затрат на выработку электроэнергии в результате замещения энергоблоков ТЭС блоками АЭС	700,8	0	1401,6	0	2102,4	0	2803,2	0	3504,0	0
Возможное снижение затрат на текущие ремонты энергоблоков ТЭС	18,25	18,25	45,63	45,63	73,0	73,0	91,25	91,25	118,63	118,63
Сумма по сезонам	819,73	197,82	1698,92	452,85	2578,1	685,32	3397,83	867,36	4277,02	1124,64
Возможное снижение годовых затрат, млн. грн.	1017,55		2151,77		3263,42		4265,19		5401,66	

Используя приведенное выше уравнение регрессионной зависимости или ее график (рис. 1), можно получать достаточно точную оценку суммарной величины возможной экономии затрат на производство электроэнергии для любого сценария выравнивания

суточных графиков нагрузки энергосистемы, предварительно вычислив среднеквадратичное отклонение (СКО) часовых значений нагрузки ТЭС от их среднесуточной величины, характеризующее неравномерность соответствующего графика.

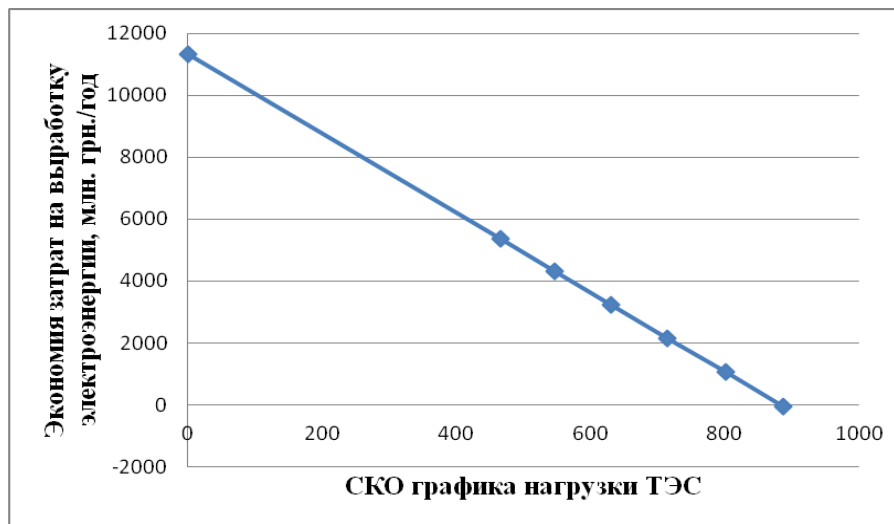


Рис. 1 – Регресійна залежність між СКО суточних графіків навантаження ТЭС та сумарною величиною очікуваного зниження щорічних витрат енергосистеми на вироботку електроенергії

**Висновки:** В результаті проведених досліджень встановлено:

1. Вимушене використання енергоблоків ТЭС в якості маневрених потужностей енергосистеми неизбежно пов'язано з значительними додатковими витратами на їх експлуатацію.

2. Основні з указаних додаткових витрат пов'язані з додатковим расходом палива на щоденні пуски теплових енергоблоків, задіяваних в регульованій частині графіка електричної навантаження енергосистеми, з підвищеним расходом палива внаслідок енергетично неефективних режимів роботи цих енергоблоків, а також з підвищеним їх износом і ростом аварійності.

3. Виведення визначеної кількості енергоблоків ТЭС з регульованій частині графіка можливо, в частині, в разі зниження щоденної нерівномірності попиту споживачів на електричну потужність.

4. Таким чином, додаткові витрати теплових електростанцій, пов'язані з використанням їх енергоблоків в якості маневрених потужностей, необхідно розглядати як потенціальну економію грошових засобів, яка може бути отримана в об'єднаній енергосистемі України, в разі поступового вирівнювання щоденних графіків електричної навантаження.

5. Як показали приведені в цій статті результати розрахунків, чисельні значення вказаної потенціальної економії грошових засобів достатньо великі, що дозволить на основі її використання формувати сучасні ринкові механізми для ефективного управління режимами виробництва і споживання електричної потужності в енергосистемі.

#### Список літератури:

- Находов, В. Ф. Визначення пріоритетних напрямків удосконалення диференційованих тарифів на електричну енергію [Текст] / В. Ф. Находов, А. І. Замулко, Мохаммад Аль Шарари, Ю. Н. Ісаєнко // *Всхідно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. – № 6/1 (78). – С. 24–32. Режим доступу: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/55785>
- Маляренко, В. А. Аналіз виробництва і споживання електроенергії в об'єднаній енергосистемі України [Електронний ресурс] / В. А. Маляренко, І. Е. Щербак // *Ползуновський вісник*. – 2013. – № 4 (2). – С. 125–130. Режим доступу: <http://new.elib.altstu.ru/journal/show/103091>
- Маляренко, В. А. Нерівномірність графіка навантаження енергосистеми і способи її вирівнювання [Електронний ресурс] / В. А. Маляренко, І. Е. Нечмоглод, І. Д. Колотило // *Світлотехніка та Електроенергетика*. – 2011. – № 4. – С. 61–66. Режим доступу: <http://new.elib.altstu.ru/journal/show/103091>
- Гуртовцев, А. Електрична навантаження енергосистеми, вирівнювання графіка [Електронний ресурс] / А. Гуртовцев, Е. Забелло // *Новини електротехніки*. – 2008, № 5 (53). Режим доступу: <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/53/19.php>
- Гительман, Л. Д. Управління попитом на енергію: адаптація зарубіжного досвіду в Росії [Електронний ресурс] / Л. Д. Гительман, Б. Е. Ратников, М. В. Кожевников // *Ефективне антикризове управління*. – 2013. Режим доступу: [http://www.info.e-c-m.ru/magazine/76/eau\\_76\\_207.htm](http://www.info.e-c-m.ru/magazine/76/eau_76_207.htm)
- Находов, В. Ф. Аналіз результатів використання в Україні диференційованих за періодами часу тарифів на електричну енергію [Текст] / В. Ф. Находов, А. І. Замулко, Т. В. Яроцька // *Електропанорама*. – 2011. – № 5. – С. 26–27.
- Находов, В. Ф. Додаткові витрати енергосистеми на покриття нерівномірних графіків електричної навантаження [Текст]: Збірка наукових праць VIII міжнар. наук.-техн. конф. молодих дослідників, аспірантів та студентів 1–3 червня 2016 р. / В. Ф. Находов, А. І. Замулко, Мохаммад Аль Шарари, Д. А. Мединцева. Енергетика. Екологія. Людина. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – С. 265–269.
- Праховник, А. В. Актуальні питання управління попитом на електричну енергію та потужність [Текст] / А. В. Праховник, В. Ф. Находов, А. І. Замулко та ін. // *Проблеми розвитку енергетики. Погляд громадськості*. – 2010. – № 7. – С. 191–193.
- Праховник, А. В. Пути компенсації нерегульованої потужності нових атомних енергоблоків [Текст] / А. В. Праховник, В. Ф. Находов, А. І. Замулко // *Енергетична політика України*. – 2005. – № 3. – С. 58–64.
- Torriti, J. Price-based demand side management: Assessing the impacts of time-of-use tariffs on residential electricity demand and peak shifting in Northern Italy [Text] / J. Torriti // *Energy*. – 2012. – Vol. 44, Issue 1. – P. 576–583. doi: [10.1016/j.energy.2012.05.043](https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.05.043)
- Vera, S. Do distribution companies lose money with an electricity flexible tariff?: A review of the Chilean case [Text] / S. Vera, F. Bernal, E. Sauma // *Energy*. – 2013. – Vol. 55. – P. 295–303. doi: [10.1016/j.energy.2013.03.024](https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.024)
- Лазуренко, А. П. Визначення потенціального економічного ефекту від вирівнювання графіків електричної навантаження ОЭС України [Текст] / А. П. Лазуренко, Г. І. Черкашина // *Світлотехніка та Електроенергетика*. – 2009. – № 1 (17). – С. 4–12. Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/11653/>.
- Заключний звіт про виконання НДР «Управління попитом споживачів на електричну потужність та енергію шляхом подальшого розвитку системи диференційованих за часом та

рифів» [Текст]. – Київ: ІЕЕ НТУУ «КПІ», 2009. – 240 с.

**Bibliography (transliterated):**

- Nahodov, V. F., Zamulko, A. I., Mohammad Al' Sharari, Isaenko, Ju. N. (2015). Opredelenie pervoocherednyh napravlenij sovershenstvovanija differencirovannyh tarifov na jelektricheskiju jenergiyu. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6/1 (78), 24–32. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/55785>
- Maljarenko, V. A., Shherbak, I. E. (2013). Analiz proizvodstva i potreblenija elektroenerгии v obiedinenoj energosisteme Ukrainy. Polzunovskij vestnik, 4 (2), 125–130. Available at: <http://new.elib.altstu.ru/journal/show/103091>
- Maljarenko, V. A., Nechmoglod, I. E., Kolotilo, I. D. (2011). Neravnomernost' grafika nagruzki energosistemy i sposoby ee vyravnivanija. Svitlotehnika ta Elektroenergety`ka, 4, 61–66 Available at: <http://eprints.kname.edu.ua/11653/>
- Gurtovcev, A., Zabello, E. (2008). Elektricheskaja nagruzka energosistemy, vyravnivanie grafika. Novosti elektrotehniki, 5 (53). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/53/19.php>
- Gitel'man, L. D., Ratnikov, B. E., Kozhevnikov, M. V. (2013). Upravlenie sprosom na energiju: adaptacija zarubeznogo opyta v Rossii. Effektivnoe antikrizisnoe upravlenie. Available at: [http://www.info.e-c-m.ru/magazine/76/eau\\_76\\_207.htm](http://www.info.e-c-m.ru/magazine/76/eau_76_207.htm)
- Nahodov, V., Zamulko, A., Yarotska, T. (2011). Analiz rezultativ vikoristannya v Ukraini diferentsiyovanih za periodami chasu tarifiv na elektrichnu energiyu. Elektropanorama, 5, 26–27.
- Nahodov, V., Zamulko, A., AlSharari, M., Medintseva, D. (2016). Dopolnitelnyie zatraty energosistemy na pokrytie neravnomernyih grafikov elektricheskoy nagruzki. Energetika. Ekologiya. Lyudina. Kyiv: NTUU «KPI», 265–269.
- Prahovnik, A., Nahodov, V., Zamulko, A. (2010). Aktualni pitannya upravlinnya popitom na elektrichnu energiyu ta potuzhnist. Problemi rozvitku energetiki. Pogyadgromadskosti, 7, 191–193.
- Prahovnik, A., Nahodov, V., Zamulko, A. (2005). Puti kompensatsii nereguliruemoy moschnosti novyih atomnyih energoblokov. Energeticheskaya politika Ukrainyi, 3, 58–64.
- Torriti, J. (2012). Price-based demand side management: Assessing the impacts of time-of-use tariffs on residential electricity demand and peak shifting in Northern Italy. Energy, 44(1), 576–583. doi:10.1016/j.energy.2012.05.043
- Vera, S., Bernal, F., Sauma, E. (2013). Do distribution companies loose money with an electricity flexible tariff?: A review of the Chilean case. Energy, 55, 295–303. doi:10.1016/j.energy.2013.03.024
- Lazurenko, A., Cherkashina, G. (2009). Opredelenie potentsialnogo ekonomicheskogo efekta ot vyravnivaniya grafikov elektricheskoy nagr
- Zaklyuchny`j zvit pro vy`konannya NDR 'Upravlinnya popy`tom spozhy`vachiv na elektry`chnu potuzhnist` ta energiyu shlyahom podal'shogo rozvy`tku sy`stemy` dy`ferencijovany`x za chasom tary`fiv' (2009). Kyiv: ІЕЕ НТУУ «КПІ», 240.

Поступила (received) 14.01.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Оценка потенциала снижения затрат энергосистемы в результате выравнивания суточных графиков ее электрической нагрузки/ В. Ф. Находов, А. И. Замулко, М. И. Аль Шарари, В. В. Чекамова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.21–31. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Оцінка потенціалу зниження витрат енергосистеми в результаті вирівнювання добових графіків її електричного навантаження/ В. Ф. Находов, А. І. Замулко, М. І. Аль Шарарі, В. В. Чекамова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.21–31. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Assessing the potential of lowering expenses of energy system as a result of smoothing of chart electrical daily load/ V. Nakhodov, A. Zamulko, M. Alsharari, V. Chekamova // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176).– P. 21–31. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-5459.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Находов Володимир Федорович** – кандидат технічних наук, доцент, Кафедра Електропостачання, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», вул. Борщагівська, 115, м. Київ, Україна, 03056, e-mail: [nakhodov@ukr.net](mailto:nakhodov@ukr.net)

**Находов Владимир Федорович** – кандидат технических наук, доцент, Кафедра Электроснабжения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», ул. Борщаговская, 115, г. Киев, Украина, 03056, e-mail: [nakhodov@ukr.net](mailto:nakhodov@ukr.net)

**Nakhodov Volodymyr** – associate professor, PhD, Department of Electricity supply, Institute of energy saving and energy management, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, 115 Borschagivska Str., Kyiv, Ukraine, 03056, e-mail: [nakhodov@ukr.net](mailto:nakhodov@ukr.net)

**Замулко Анатолий Игоревич** – кандидат технічних наук, доцент, Кафедра Електропостачання, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», вул. Борщагівська, 115, м. Київ, Україна 03056, e-mail: [zai@ukr.net](mailto:zai@ukr.net)

**Замулко Анатолий Игоревич** – кандидат технических наук, доцент, Кафедра Электроснабжения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», ул. Борщаговская, 115, г. Киев, Украина 03056, e-mail: [zai@ukr.net](mailto:zai@ukr.net)

**Zamulko Anatolii** – associate professor, PhD, Department of Electricity supply, Institute of energy saving and energy management, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, 115 Borschagivska Str., Kyiv, Ukraine, 03056, e-mail: [zai@ukr.net](mailto:zai@ukr.net)

**Аль Шарарі Мохаммад Ібрагім** – аспірант, Кафедра Електропостачання, Інститут енергозбереження та енергоменеджменту, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», вул. Борщагівська, 115, м. Київ, Україна, 03056, e-mail: [mr\\_sharari@yahoo.com](mailto:mr_sharari@yahoo.com)

**Аль Шарари Мохаммад Ибрагим** – аспірант, Кафедра Електроснабження, Інститут енергосбереження і енергоменеджмента, Национальный технический университет Украины, «Киевский политехнический институт», ул. Борщаговская, 115, г. Киев, Украина, 03056, e-mail: [mr\\_sharari@yahoo.com](mailto:mr_sharari@yahoo.com)

**Alsharari Mohammad** – postgraduate student, Department of Electricity supply, Institute of energy saving and energy management, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, 115 Borschagivska Str., Kyiv, Ukraine, 03056, tel.: (093) 289-33-42, e-mail: [mr\\_sharari@yahoo.com](mailto:mr_sharari@yahoo.com)

**Чекамова Вікторія Вікторівна** – магістр, кафедра Електропостачання, Інститут енергозбереження та енергоменеджменту, Национальный технический университет Украины «Київський політехнічний інститут», вул. Борщагієвська, 115, м. Київ, Україна, 03056, e-mail: [vika.chekamova@gmail.com](mailto:vika.chekamova@gmail.com)

**Чекамова Виктория Викторовна** – магістр, Кафедра Електроснабження, Інститут енергосбереження і енергоменеджмента, Национальный технический университет Украины, «Киевский политехнический институт», ул. Борщаговская, 115, г. Киев, Украина, 03056, e-mail: [vika.chekamova@gmail.com](mailto:vika.chekamova@gmail.com)

**Chekamova Viktoriia** – master, Department of Electricity supply, Institute of energy saving and energy management, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, 115 Borschagivska Str., Kyiv, Ukraine, 03056, e-mail: [vika.chekamova@gmail.com](mailto:vika.chekamova@gmail.com)

УДК 004.912

**О. Б. КУНГУРЦЕВ, О. А. БЛАЖКО, С. В. КОВАЛЬЧУК, М. О. СКРИПКІН**

### АВТОМАТИЗАЦІЯ СТВОРЕННЯ СХОВИЩА ДАНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ДОКУМЕНТІВ З ВЕБ-ПОРТАЛІВ ВІДКРИТИХ ДАНИХ

Розглядається процес створення сховища даних електронних документів національного Веб-порталу відкритих даних України. Для скорочення трудомісткості процесу запропоновано розвиток методу порівняння текстів шляхом визначення інтегральної близькості структурованих текстів та їх елементів у вигляді рядків і стовпців, що дозволяє автоматизувати процес встановлення зв'язку між наборами даних при створенні сховища. Програмне забезпечення методу апробовано на наборах відкритих даних національного Веб-порталу. Результати дослідження можуть бути використані при створенні сховищ даних в системах електронного документообігу.

**Ключові слова:** електронні документи, відкриті дані, зв'язані дані, синтаксичний аналізатор, сховище даних.

Рассматривается процесс создания хранилища данных электронных документов национального Веб-портала открытых данных Украины. Для сокращения трудоемкости процесса предложено развитие метода сравнения текстов путем определения интегральной близости структурированных текстов и их элементов в виде строк и столбцов, что позволяет автоматизировать процесс установления связи между наборами данных при создании хранилища. Программное обеспечение метода апробировано на наборах открытых данных национального Веб-портала. Результаты исследования могут быть использованы при создании хранилищ данных в системах электронного документооборота.

**Ключевые слова:** электронные документы, открытые данные, связанные данные, синтаксический анализатор, хранилище данных.

The paper considers the process of creating of electronic documents in data warehouse on the web-portal of open data. The result of this study is the method of text comparison for two structured electronic documents, which presented in tabular form to determine the possibility of their association in the data warehouse. The Scientific novelty of work is improvement of method for comparing the texts with integrated proximity of structured texts and their elements in rows and columns in a table, which allows to automate the process of establishing a semantic link between the data sets to create a data warehouse. The software of proposed method is approved by the example of the DOC-format documents on the web-site of the Main Statistical Office in the Odessa region, which stores the operational statistics of socio-economic development of the region. For the experiments was created a public Web-portal of open data at the Odessa area on the basis of free software DKAN. As a result of automated analysis of documents with data tables were created open data sets. For more than half sets automatically semantic links have been established and carried out the union of these sets into a single data warehouse. It will allow a more qualitative analytical assessment of socio-economic processes using diagrams and cartographic type of visualization. The results of work can be used to create any kind of data warehouse in electronic document management systems.

**Keywords:** electronic documents, open data, linked data, data parser, data warehouse.

**Вступ.** На початку 2015 року з появою Закону «Про внесення змін до деяких законів України щодо доступу до публічної інформації у формі відкритих даних» держава приєдналася до всесвітнього процесу структуризації публічної інформації. Закон передбачає централізоване розміщення публічної інформації на Веб-порталах у формі електронних даних. За рік до появи цього Закону силами громадських організацій із грантовою підтримкою з'явився національний портал за адресою <http://data.gov.ua>, на якому було створено 100 наборів даних у 12 категоріях. Нажаль, поява Закону не стала поштовхом до відкриття даних і на порталі з'явилося лише декілька наборів. Наступна Постанова Кабінету Міністрів України № 835 від 21.10.2015 «Про затвердження Положення про набори даних, які підлягають оприлюдненню у формі відкритих даних» [1] зобов'язала державні установи розмістити публічні дані на порталі, надавши перевагу структурованим текстовим

форматам *CSV/XML/JSON* перед слабоструктурованими форматами *DOC(X)/XLS(X)/PDF*. Після виходу Постанови процес не прискорився і менше половини наборів так і залишається у нерекондованих неструктурованих форматах, що не дозволяє надати *API*-доступ у форматі *XML/JSON* для Веб/мобільних застосунків у соціально-економічних сферах, збільшуючи вартість їх супроводу та, відповідно, підвищуючи ризик зриву планів Кабінету Міністрів із реалізації *IT*-проектів створення *E*-сервісів на основі відкритих даних. Основною причиною низької якості у відкритті даних є:

1) значна трудомісткість ручного процесу перетворення даних з документів офісних систем у *CSV*-формат та наявність помилок користувачів, які пов'язані з різними форматами зберігання, кодування та структурами таблиць;

© О. Б. Кунгурцев, О. А. Блажко, С. В. Ковальчук, М. О. Скрипкін. 2016



2) відсутність автоматизованого процесу створення сховища даних наборів відкритих даних, яке зв'язує набори даних за семантичними зв'язками між наборами даних з метою отримання нової інформації та інтелектуальної аналітичної обробки.

Якщо першу проблему частково можна вирішити організаційними засобами через створення методичного забезпечення та проведення тренінгів з державними службовцями, то другу проблему можна вирішити лише технічно, що і стало темою цієї роботи.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Відомо, що сховища даних створюються з урахуванням таких особливостей [2]: джерел даних у формі традиційних систем реєстрації операцій, електронних документів або наборів даних, а також операцій з даними на рівні вилучення, перетворення, завантаження, аналізу і представлень результатів аналізу. У розподіленому середовищі зберігання джерел даних, яким є Веб-середовище, однією з основних проблем є

висока трудомісткість створення словників метаданих, що дозволяють комп'ютерам і користувачам розуміти структури даних, на основі яких будуть прийматися рішення в процесі використання сховищ даних.

Але говорячи про автоматизацію створення сховищ даних, на першому місці стоїть підтримка метаданих у формі, придатній для комп'ютерної обробки, що і стало причиною створення *RDF*-моделі представлення даних (англ. *Resource Description Framework*) [3]. Модель представлена висловлюваннями у вигляді триплетів «суб'єкт-предикат-об'єкт», які об'єднуються в семантичний граф. Але *RDF* - лише модель, тому для її ефективної програмної реалізації була запропонована архітектура порталів відкритих даних [4].

На рисунку 1 представлено ресурси та процеси, які повинні супроводжувати розвиток порталів відкритих даних в Україні для інформаційної підтримки державних *E*-сервісів та комерційних Веб/мобільних застосувань у соціально-економічних сферах.

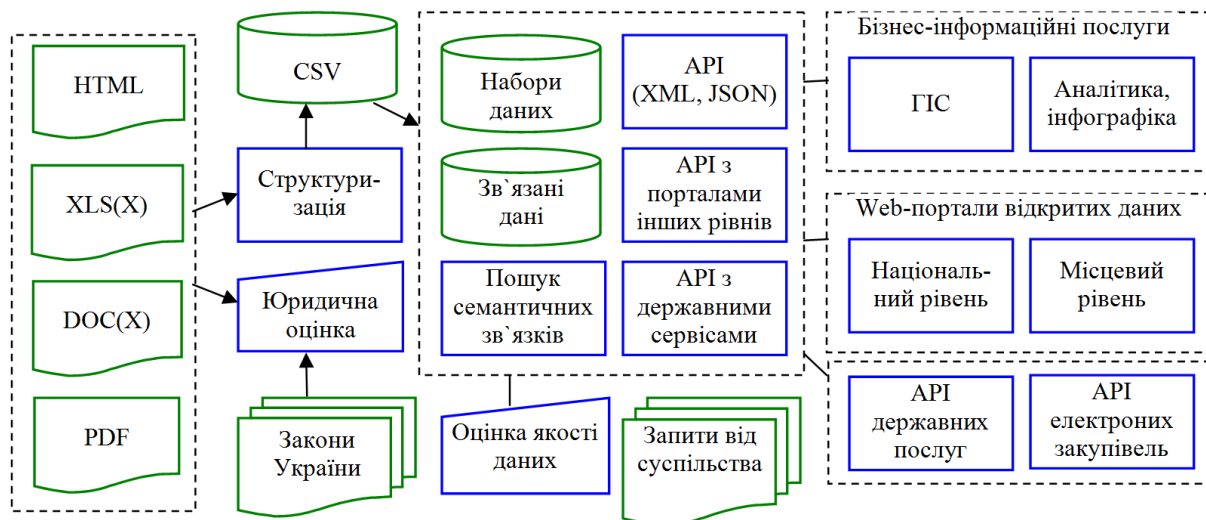


Рис. 1 – Ресурси та процеси із супроводу порталів відкритих даних

Програмне забезпечення Веб-порталів відкритих даних більшості країн світу створено на основі вільних продуктів: *CKAN* (<http://ckan.org>), наприклад, США (<http://data.gov>), Великобританія (<http://data.gov.uk>); *Socrata* (<http://socrata.com>), наприклад, НьюЙорк (<https://data.ny.gov>), Вашингтон (<https://data.wa.gov>), Сан Франциско (<https://data.sfgov.org>); *DKAN* (<http://nucivic.com/dkan>), наприклад, Італія (<http://dati.gov.it>). Зазначені продукти при реєстрації наборів відкритих даних вимагають створення їх паспортів, колонки яких відповідають структурі словника каталогу даних *DCAT* (англ. *Data Catalog Vocabulary*) [5], спроектованого з урахуванням *RDF*-моделі. Структура *DCAT* включає: ідентифікаційний номер набору даних; найменування набору даних; стислий опис змісту набору даних; відомості про мову інформації, яка міститься у наборі даних; формат (формати), в якому доступний набір даних; формат стиснення набору даних (за наявності такого стиснення); дата і час першого оприлюднення набору даних; дата і час внесення останніх змін до набору даних; дата актуальності даних у наборі даних; періодичність оновлення набору даних; ключові слова, які відображають основний зміст набору даних; гіперпо-

силання на набір даних (електронний документ для завантаження або *API*-інтерфейс); гіперпосилання на структуру набору даних (електронний документ для завантаження або *API*-інтерфейс); відомості про розпорядника інформації, у володінні якого перебуває набір даних; відомості про відповідальну особу з питань доступу до публічної інформації розпорядника інформації, яка відповідає за оприлюднення інформації та адреса її електронної пошти.

Створене програмне забезпечення щодо заповнення метаданих сховища наборів відкритих даних в *DCAT*-форматі дозволяє вручну заповнювати сховище без автоматизації процесу встановлення семантичних зв'язків між наборами даних. Властивість зв'язності даних (англ. *Linked Data*) у вигляді колекції взаємопов'язаних наборів даних в Інтернеті або опису методів публікації пов'язаних між собою структурованих даних було розглянуто в роботі [6] з узагальненням на технологічному рівні в роботі [7]. В роботі [8] процес встановлення зв'язності віднесений до задачі створення інструментів обробки природної мови, що стикається зі складнощами усунення неоднозначності сенсу слів для узгодження ресурсів різних наборів даних.

В роботі [9] розглядається метод визначення бли-

зкості контентів, пов'язаних з Веб-форумами. Однак автори вказують на наявність попередньо виявлених ключових слів. В той же час, аналіз паспортів наборів даних на Веб-порталах показує, що колонка з ключовими словами заповнена частково і тільки у вигляді одного слова, що не дозволяє використати вказаний метод. В роботі [10] розглянуто окремий випадок визначення близькості подій в новинному потоці для їх подальшого злиття, але у випадку з наборами даних немає необхідності виділяти події, тому для випадку з веб-порталом відкритих даних критерій близькості повинен визначатися іншим способом. Таким чином, створення нових методів встановлення зв'язку між наборами даних із ресурсами CSV-формату при створенні сховища даних на Веб-порталах відкритих даних є актуальною задачею.

**Ціль та задачі дослідження.** Метою роботи є автоматизація процесу встановлення зв'язку між наборами даних із ресурсами CSV-формату при створенні сховища даних з метою підвищення ефективності їх подальшої аналітичної обробки.

Для досягнення мети пропонується вирішити наступні задачі:

- виділити в наборах даних терміни з аналізованих текстів ресурсів CSV-формату (побудувати словник термінів);
- визначити близькість CSV-таблиць по кількості однакових термінів;
- виявити в CSV-таблицях з певним ступенем близькості подібні рядки і стовпці.

**Виділення термінів з аналізованих текстів наборів даних.** Найбільш інформативними словами в реченні є іменники та іменні групи. Саме вони складають основу термінологічної бази предметної області і повинні бути включені в словник. Термін – це слово, стійке словосполучення або скорочення, яке виражає і певною мірою класифікує в даній предметній області певне поняття чи сутність, відображаючи у своїй смисловій структурі характерні ознаки об'єкту і взаємозв'язку цього об'єкта з іншими з достатньою для взаємного спілкування точністю [11].

Відомі рішення побудови словників орієнтовані на англо-німецьку групу мов [12]. В роботах [13-15], орієнтованих на групи слов'янських мов, відсутня автоматизована класифікація текстів, визначення синонімів і значень термінів. В роботі [16] задача обмежена рамками спілкування користувача на природній мові з реляційною базою даних.

Для виділення термінів запропоновано проведення синтаксичного аналізу текстів документів з використанням програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом *Language Tool* з модулем *language-uk* [17] та *Cognitive Dwarf* [18].

Для побудови словника термінів передбачено два проходи по тексту.

У процесі першого проходу виконуються наступні дії:

- 1) розбивка тексту на слова;
- 2) видалення слів із списку, які повинні ігноруватись;
- 3) вибір окремого слова, коли проводиться морфологічний розбір слова. І, якщо слово є іменником, виконуємо для нього пункт 5, а якщо слово не іменник, то перехід до пункту 3;

4) перевірка чи є вхідне слово унікальним для результуючого списку, і якщо так, то додаємо його у список, а якщо ні, то збільшуємо значення змінної, яка накопичує кількість входжень слова у текст, на 1;

5) якщо у вхідному списку є ще слова, то перехід до пункту 3;

6) іменники, які рідко зустрічалися у тексті, виключаються зі словника.

Під час другого проходу для кожного іменника із словника будується комбінація слів, які оточують його зліва та справа. Підраховується кількість входження в текст для кожної комбінації слів.

Словосполучення з високою частотою входження (наприклад, рівним 50% від частоти іменника) вживаються як терміни.

**Встановлення зв'язності документів на основі синтаксичного аналізу текстів та знайдених термінів.** Таким чином, після аналізу вхідного тексту  $T$  та побудови словника термінів, отримуємо текст з результатом  $Tres$ , який містить в собі всі терміни в початковій формі з вказаною кількістю повторень в тексті для кожного.

**1) Близькість документів на основі порівнянь їхніх термінів**

Представимо текст з результатом  $Tres$  множиною записів:

$$Tres = \{term_i | i = 1, n\}, \quad (1)$$

де  $term_i$  – запис з унікальним терміном;  $n$  – кількість унікальних термінів в тексті  $Tres$ . Кожен запис  $term_i$  представляє собою кортеж:

$$term_i = \langle tx_i, m_i \rangle, \quad (2)$$

де  $tx_i$  – термін (одне або декілька слів);  $m_i$  – кількість повторень терміну.

Масив  $u$  з усіма результатами  $Tres$  має вигляд:

$$AllTres = \{Tres_j | j = 1, k\}. \quad (3)$$

Для кожного результату  $Tres$  можна підрахувати загальну кількість термінів  $N$ :

$$N_j = \sum_{i=0}^n m_i. \quad (4)$$

Кількість порівнянь між текстами  $Tres_j$  в масиві  $AllTres$  становить  $k * (k - 1)$ .

Здійснюємо перевірку кожен з кожним терміном між різними документами  $Tres$ , і знаходимо спільні терміни враховуючи меншу спільну кількість  $m_i$ .

Кількість порівнянь між двома документами становить добуток кількості унікальних термінів в текстах  $Tres$ , ( $n \in Tres_j * n \in Tres_{j+1}$ ).

Якщо термін з першого тексту співпадає з терміном іншого, тобто виконується умова  $tx_i \in Tres_j = tx_i \in Tres_{j+1}$ , порівнюємо кількість повто-



рень даного терміну в двох документах і обираємо меншу (якщо  $m_i \in Tres_j \leq m_i \in Tres_{j+1}$ , то результат  $m_i \in Tres_j$ , якщо  $m_i \in Tres_j > m_i \in Tres_{j+1}$ , то результат  $m_i \in Tres_{j+1}$ ). Після цього здійснюємо порівняння першого з іншими і т.д.

Всі порівняння заносимо в масив, результат порівняння має наступний вигляд:

$$Buf = \{res_z\} z = 1, x. \quad (5)$$

Кожен запис представляє собою кортеж:

$$res_z = \langle tx_z, m_z \rangle. \quad (6)$$

Після закінчення перевірки між двома документами, здійснюємо обрахунок усіх спільних термінів між ними  $Nres$  ( $Nres$  є спільним для двох документів  $Tres$ , які порівнювалися між собою):

$$Nres = \sum_{z=0}^x m_z. \quad (7)$$

У першому випадку за допомогою формул (4), (7) знаходимо відсоток повторень в кожному з двох аналізованих текстів без урахування ваги термінів  $proc_1$ :

$$proc_1 = \frac{Nres}{N} * 100\%. \quad (8)$$

Отже, для першого документа відносно другого відсоток буде становити:

$$proc_1 \in Tres_j = \frac{Nres}{N_j} * 100\%.$$

Для другого документа відносно першого відсоток буде становити:

$$proc_1 \in Tres_{j+1} = \frac{Nres}{N_{j+1}} * 100\%.$$

Формуємо результат у вигляді:

$$Tres_j(Tres_{j+1}) = proc \in Tres_j,$$

$$Tres_{j+1}(Tres_j) = proc \in Tres_{j+1}.$$

Недоліком є не врахування кількості повторень окремих термінів, так як враховується тільки загальна кількість повторень.

*Варіант з урахування ваги терміну.* Чим більша кількість повторень терміну тим вищий його відсоток відносно інших термінів. Потрібно здійснити обрахунок для кожного терміну і просумувати отримані відсотки.

Відсоток повторення для кожного терміну формується на підставі аналізу результатів формули (7):

$$procTerm_z = \frac{m_z}{N} * \frac{m_z}{Nres} * 100\%, \quad (9)$$

де  $\frac{m_z}{N}$  – відношення кількості повторень унікального

терміну відносно усіх знайдених термінів в  $Tres_j$ ;

$$\frac{m_z}{Nres}$$

– відношення кількості повторень унікального терміну відносно усіх спільних термінів між  $Tres_j$  та  $Tres_{j+1}$ .

Наступним етапом сумуємо всі відсотки унікальних термінів, де  $proc_2$  і буде відсотком близькості документів з урахуванням ваги термінів:

$$proc_2 = (procTerm_z + procTerm_{z+1} \dots procTerm_x) * kof, \quad (10)$$

де  $kof$  – коефіцієнт кількості спільних унікальних термінів.

Коефіцієнт  $kof$  обраховується з урахуванням кількості унікальних термінів в масиві  $Buf$  (5):

$$kof = \sqrt{x}, \quad (11)$$

де  $x$  – кількість унікальних термінів в  $Buf$ .

## 2) Виявлення подібних стовпців і рядків в таблицях

Після виявлення близькості текстів по термінах, потрібно здійснити перевірку по стовпцях і рядках двох текстів  $T_j$  і  $T_{j+1}$ . Для цього виявляємо всі таблиці в цих документах і по кожній з них записуємо усі заголовки рядків і стовпців.

Уявімо собі результат аналізу тексту  $T$  у вигляді множини знайдених таблиць  $Table$ :

$$Table = \{table_y\} y = 1, u, \quad (12)$$

де  $table_y$  – знайдена таблиця в тексті  $T$ .

Кожна знайдена таблиця представляє собою кортеж:

$$table_y = \langle rows_y, columns_y \rangle, \quad (13)$$

де  $rows_y$  – масив записів усіх заголовних рядків в таблиці  $table_y$ ;  $columns_y$  – масив записів усіх заголовних стовпців в таблиці  $table_y$ .

Наступним кроком здійснюється пошук термінів в кожному заголовку рядків і стовпців відповідно до попередніх результатів в  $Tres$ . Після цього формуються масиви  $rows_y$  і  $columns_y$ .

Представимо, що  $rows_y$  складається з множини заголовків рядків:

$$rows_y = \{row_q\} q = 1, w, \quad (14)$$

де  $row_q$  – масив термінів  $tx$  для заголовка рядка.

Відповідно до цього для  $columns_y$  отримуємо:

$$columns_y = \{column_e\} e = 1, r, \quad (15)$$

де  $column_e$  – масив термінів  $tx$  для заголовка стовпця.

Отже,  $row_q$  має вигляд:

$$row_q = \{tx_a\} a = 1, b. \quad (16)$$

Відповідно  $column_e$  має наступний вигляд:

$$column_e = \{tx_f\} f = 1, g. \quad (17)$$

Усі таблиці  $table_y$ , двох порівнювальних текстів  $T$ , порівнюються кожна з кожною по стовпцях і рядках. Для кожного заголовку рядка рахується відсоток близькості з іншим рядком, відповідні дії відбуваються і з заголовками стовпців. Якщо в заголовку рядка або стовпця немає термінів ( $b = 0, g = 0$ ), то обрахунок по формулі не здійснюється.

Відсоток близькості рахується наступним чином:

$$p = \frac{com}{mid} * 100\%, \quad (18)$$

де  $com$  – кількість спільних термінів між  $row_q \in Table_j$  та  $row_q \in Table_{j+1}$  для рядка, між  $column_e \in Table_j$  та  $column_e \in Table_{j+1}$  для стовпця;

$mid$  – середня кількість термінів між  $row_q \in Table_j$  та  $row_q \in Table_{j+1}$  для рядка, між  $column_e \in Table_j$  та  $column_e \in Table_{j+1}$  для стовпця;

Знайшовши відсоток  $p$  для кожного заголовку рядка та стовпця, здійснюємо обрахунок середнього відсотка близькості  $pMid$  заголовного рядка або стовпця:

$$pMid = (\sum p) / \arg, \quad (19)$$

де  $\arg$  – кількість не нульових порівнянь між заголовками рядків або стовпців.

Знайшовши середнє значення по заголовках рядків і стовпців, взнаємо значення близькості порівнювальних таблиць  $table_y \in Table_j$  та  $table_y \in Table_{j+1}$ :

$$TableP = \frac{pMid_{row} + pMid_{column}}{2}. \quad (20)$$

Якщо ні одного збігу не було виявлено, то зв'язок між порівнювальними таблицями становить 0.

В результаті знайшовши всі близькості між таблицями двох порівнювальних документів можемо обрахувати загальну близькість між документами  $T_j$  та  $T_{j+1}$ :

$$proc_3 = (\sum_{p=1}^k TableP_p) / k, \quad (21)$$

де  $k$  – кількість порівнянь між таблицями двох документів, становить добутку кількості таблиць в двох документах відповідно до формули (12)  $k = u \in Table_j * u \in Table_{j+1}$ .

**3) Додання нових термінів до словника синтаксичного аналізатора.** Аналіз документів показав, що словник *language tool* не містить ряд слів, які зустрічаються у документах. Найчастіше це особисті назви. Для вирішення вказаної проблеми розглянуто додання слів у файл із розширенням *.txt* в кодуванні *UTF-8*. Формат додання має наступний порядок: слово; початкова форма слова; інформація про слово. Недоліком такого рішення є те, що пошук по такому файлові буде здійснюватися занадто довго, і його розмір також буде великим при великій кількості слів.

Іншим рішенням є створення власного словника. Перевагою є набагато менший розмір і відповідно швидкість перегляду. Словник створюється за допомогою засобів *language tool*, шляхом застосування інструмента із вхідними параметрами: текстовим файлом (як у першому способі), і файлом у якому буде службова інформація (файл, який є у *language tool*). Необхідно тільки 2 інструменти і відповідно 2 їх виклики. За допомогою даного підходу реалізовано розширення словника синтаксичного аналізатора за рахунок назв із певних предметних областей, наприклад: назв районів, міст, областей.

**Висновки.** Запропонований в роботі розвиток методу порівняння текстів шляхом визначення інтегральної близькості структурованих текстів та їх елементів у вигляді рядків і стовпців CSV-таблиці із ресурсів різних наборів відкритих даних форматів *DOC(X)* було апробовано після включення його програмного забезпечення у вигляді 5-го модуля до програмного комплексу, який містить модулі: (1) представлення електронного документу в *HTML*-форматі, (2) структурно-семантичний аналіз документа, (3) створення CSV-таблиці, (4) створення паспорту набору, (5) пошук зв'язків між поточним набором та наборами зі сховища з подальшим оновленням сховища. Наприкінці листопада 2015 року було оновлено програмне забезпечення національного Веб-порталу та очищено сховище наборів даних. Тому апробацію було проведено на прикладі документів з сайту Головного управління статистики в Одеській області, розміщеного за адресою <http://od.ukrstat.gov.ua/>, у розділі «Експрес-випуски» за 2015 рік. Проаналізовано 65 документів *DOC*-формату, які містили 143 таблиці з даними за такими категоріями: освіта, ринок праці, зайнятість та безробіття, оплата праці та соціально-трудова відносина, соціальний захист, економічна діяльність, будівництво, внутрішня торгівля, діяльність підприємств, енергетика, капітальні інвестиції, навколишнє середовище, послуги, наука, промисловість, сільське, лісове та рибне господарство, транспорт, туризм, зовнішньоекономічна діяльність, національні рахунки, ціни. В результаті було створено 143 набори відкритих даних, з яких для 87 було автоматично встановлено семантичні зв'язки на рівні відкритих даних районів області. Знайдені набори створили сховище даних, яке дозволить проводити більш якісну аналітичну оцінку соціально-економічних процесів області з використанням діаграм та картографічних засобів візуалізації.

Автори даної роботи входять у волонтерську групу зі створення громадського Веб-порталу відкри-

тих даних Одеської області за адресою <http://data.ngorg.od.ua> на основі вільного програмного продукту *DKAN*, особливістю якого є фінансово-економічна оренда *PHP-hosting*-серверів. Тому всі створені набори було розміщено на вказаному порталі.

#### Список літератури:

1. Про затвердження Положення про набори даних, які підлягають оприлюдненню у формі відкритих даних [Електронний ресурс]: Постанова Кабінету Міністрів України від 21.10.2015 № 835. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/835-2015-%D0%BF>
2. Барсеян, А. А. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining [Текст] / А. А. Барсеян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2004. – 336 с.
3. RDF 1.1 Primer [Electronic resource] / W3C Working Group Note. – Available at: <http://www.w3.org/TR/rdf11-primer/>. – 24.06.2014.
4. Auer, S. DBpedia: A nucleus for a web of open data [Text]: International Semantic Web Conference / S. Auer, C. Bizer, G. Kobilarov, J. Lehmann, R. Cyganiak, Z. Ives // Lecture Notes in Computer Science. – 2007. – P. 722–735. doi:[10.1007/978-3-540-76298-0\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-540-76298-0_52)
5. Data Catalog Vocabulary (DCAT) [Electronic resource] / W3C Working Group Note. – Available at: <http://www.w3.org/TR/vocab-dcat/>. – 16.01.2014.
6. Bizer, C. Linked Data – the story so far [Text] / C. Bizer, T. Heath, T. Berners-Lee // International Journal on Semantic Web and Information Systems. – 2009. – Vol. 5, № 3. – P. 1–22. doi:[10.4018/jswis.2009081901](https://doi.org/10.4018/jswis.2009081901)
7. Wood, D. Linked Data. Structured Data on the Web [Text] / D. Wood, M. Zaidman, L. Ruth, M. Hausenblas. – Manning, 2014. – 276 p.
8. McCrae, J. P. Reconciling Heterogeneous Descriptions of Language Resources [Text] / J. P. McCrae, P. Cimiano, V. Rodriguez-Doncel, D. Vila Suero, J. Gracia, L. Matteis, P. Buitelaar // Proceedings of the 4th Workshop on Linked Data in Linguistics: Resources and Applications. – 2015. – P. 39–48. doi:[10.18653/v1/w15-4205](https://doi.org/10.18653/v1/w15-4205)
9. Пелецишин, А. М. Структурування інформаційного наповнення для покращення рангу веб-форуму [Текст] / А. М. Пелецишин, Ю. О. Серов, К. О. Слобода // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 6/8 (48). – С. 37–39. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/5763/5196>
10. Черенков, И. А. Подход выделения событий в новостном потоке [Текст] / И. А. Черенков, С. В. Орехов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 1/4 (61). – С. 62–64. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/9178/7968>
11. Ожегов, С. И. Толковый словарь русского языка [Текст] / С. И. Ожегов, Н. Ю. Шведова. – Москва: Мир, 2011. – 736 с.
12. JaLingo is a free OS independent dictionary application [Electronic resource] / JaLingo. – Available at: <http://jalingo.sourceforge.net/>. – 11.12.2006.
13. Кунгурцев, А. Б. Формирование словаря предметной области [Текст] / А. Б. Кунгурцев, И. В. Барыкина // Искусственный интеллект. – 2006. – № 1. – С. 144–151.
14. Кунгурцев, А. Б. Применение сетей фреймов для построения модели извлечения фактов из текстов на естественном языке [Текст] / А. Б. Кунгурцев, С. М. Бородавкин // Искусственный интеллект. – 2009. – № 4. – С. 202–207.
15. Кунгурцев, А. Б. Метод построения словарей предметных областей для извлечения фактов из текстов на естественном языке [Текст] / А. Б. Кунгурцев, С. Н. Бородавкин, А. П. Голуб // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 1/4 (43). – С. 32–36. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2550/2355>
16. Кунгурцев, А. Б. Интерфейс для общения пользователей с информационными системами на естественном языке [Текст] / А. Б. Кунгурцев, Я. В. Поточняк // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 14. – С. 74–81.
17. Development API [Electronic resource] / LanguageTool. – Available at: <http://www.languagetool.org/development/>
18. Программный пакет синтаксического разбора и машинного перевода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cs.isa.ru:10000/dwarf/>. – 24.04.2011.

#### Bibliography (transliterated):

1. Pro zatverdzhennia Polozhennia pro nabory danykh, yaki pidli-ahaiut opryliudnenniu u formi vidkrytykh danykh: Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 21.10.2015 No. 835. Available at: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/835-2015-%D0%BF>
2. Barsehian, A., Kupryanov, M., Stepanenko, V., Kholod, Y. (2004). Metodi y modeli analiza danykh: OLAP y Data Mining. Saint Petersburg: BHV-Peterburh, 336.
3. RDF 1.1 Primer (24.06.2014). W3C Working Group Note. Avail-able at: <https://www.w3.org/TR/rdf11-primer/>
4. Auer, S., Bizer, C., Kobilarov, G., Lehmann, J., Cyganiak, R., Ives, Z. (2007). DBpedia: A Nucleus for a Web of Open Data. Lecture Notes in Computer Science, 722–735. doi:[10.1007/978-3-540-76298-0\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-540-76298-0_52)
5. Data Catalog Vocabulary (DCAT). (16.01.2014). W3C Working Group Note. Available at: <https://www.w3.org/TR/vocab-dcat/>. Last accessed: 02.01.2016.
6. Bizer, C., Heath, T., Berners-Lee, T. (2009). Linked Data – The Story So Far. International Journal on Semantic Web and Information Sys-tems, 5 (3), 1–22. doi:[10.4018/jswis.2009081901](https://doi.org/10.4018/jswis.2009081901)
7. Wood, D., Zaidman, M., Ruth, L., Hausenblas, M. (2014). Linked Da-ta. Structured Data on the Web. Manning, 276.
8. McCrae, J. P., Cimiano, P., Rodriguez-Doncel, V., Vila Suero, D., Gracia, J., Matteis, L., Buitelaar, P. (2015). Reconciling Heterogeneous Descriptions of Language Resources. Proceedings of the 4th Workshop on Linked Data in Linguistics: Resources and Applications, 39–48. doi:[10.18653/v1/w15-4205](https://doi.org/10.18653/v1/w15-4205)
9. Peleshchishin, A., Serov, Iu., Sloboda, K. (2010). Structuring content for improving the rank web forum. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(8(48)), 37–39. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/5763/5196>
10. Cherenkov, Y., Orekhov, S. (2013). Approach for extracting events from news stream. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 1(4(61)), 62–64. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/9178/7968>
11. Ozhegov, S. I., Shvedova, N. Iu. (2011). Tolkovy slovar' russkogo iazyka. Moscow: Mir, 736.
12. JaLingo is a free OS independent dictionary application. (11.12.2006). JaLingo. Available at: <http://jalingo.sourceforge.net/>. Last accessed: 02.01.2016.
13. Kunhurtsev, A., Barikyna, Y. (2006). Formyrovanye slovaria predmetnoi oblasti. Iskusstvennyi intellekt, 1, 144–151.
14. Kunhurtsev, A., Borodavkin, S. (2009). Primenenie setei freimov dlia postroeniia modeli izvlecheniia faktov iz tekstov na estestvennom iazyke. Iskusstvennyi intellekt, 4, 202–207.
15. Kunhurtsev, A., Borodavkyn, S., Holub, A. (2010). Method of creation of domains dictionaries for extraction of the facts from texts in the natural language. Eastern-European Journal Of Enter-prise Technologies, 1(4(43)), 32–36. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2550/2355>
16. Kunhurtsev, A., Potochniak, Y. (2014). Interfeis dlia obshcheniia pol'zovatelei s informatsionnymi sistemami na estestvennom iazyke. Elektrotehnicheskie i komp'uternye sistemy, 14, 74–81.
17. Development API. LanguageTool. Available at: <https://www.languagetool.org/development/>. Last accessed: 02.01.2016.
18. Prohrammny paket syntaksyesheskoho razbora y mashynnoho perevoda. Available at: <http://cs.isa.ru:10000/dwarf/>. Last accessed: 24.04.2011

Надійшла (received) 06.01.2016

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Автоматизация создания хранилища данных электронных документов с Веб-порталов открытых данных/ А. Б. Кунгурцев, А. А. Блажко, С. В. Ковальчук, М. А. Скрипкин//** Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.31–37. – Бібліогр.: 18назв. – ISSN 2079-5459.

**Автоматизация створення сховища даних електронних документів з Веб-порталів відкритих даних/ О. Б. Кунгурцев, О. А. Блажко, С. В. Ковальчук, М. О. Скрипкин//** Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.31–37. – Бібліогр.: 180 назв. – ISSN 2079-5459.

**Automating of creation of electronic documents warehouse on web-portals of open data/ A. Kungurtsev, O. Blazhko, S. Kovalchuk, M. Skripkin//**Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P.31–37. – Bibliogr.: 18. – ISSN 2079-5459.

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Кунгурцев Олексій Борисович** – кандидат технічних наук, професор, Одеський національний політехнічний університет; професор кафедри системного програмного забезпечення, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; E-mail: [abkun@te.net.ua](mailto:abkun@te.net.ua).

**Кунгурцев Алексей Борисович** – кандидат технических наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет; профессор кафедры системного программного обеспечения, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044; E-mail: [abkun@te.net.ua](mailto:abkun@te.net.ua).

**Kungurtsev Alexei** – PhD in Technical Sciences, Professor of Department of System Software, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko avenue, 1, Odessa, Ukraine, 65044; E-mail: [abkun@te.net.ua](mailto:abkun@te.net.ua).

**Блажко Олександр Анатолійович** – кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет; доцент кафедри системного програмного забезпечення, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; E-mail: [blazhko@ieee.org](mailto:blazhko@ieee.org).

**Блажко Александр Анатоліевич** – кандидат технических наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет; доцент кафедры системного программного обеспечения, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044; E-mail: [blazhko@ieee.org](mailto:blazhko@ieee.org).

**Blazhko Oleksandr** – PhD in Technical Sciences, associate professor, Associate Professor of Department of System Software, Odessa National Polytechnic University, Str. Shevchenko avenue, 1, Odessa, 65044, Ukraine; E-mail: [blazhko@ieee.org](mailto:blazhko@ieee.org).

**Ковальчук Сергій Вікторович** – аспірант кафедри системного програмного забезпечення, Одеський національний політехнічний університет; пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; E-mail: [serhiy\\_kovalchuk@mail.ua](mailto:serhiy_kovalchuk@mail.ua).

**Ковальчук Сергей Викторович** – аспірант кафедры системного программного обеспечения, Одесский национальный политехнический университет; пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044; E-mail: [serhiy\\_kovalchuk@mail.ua](mailto:serhiy_kovalchuk@mail.ua).

**Kovalchuk Serhiy** – PhD student of Department of System Software, Odessa National Polytechnic University; Shevchenko avenue, 1, Odessa, Ukraine, 65044; E-mail: [serhiy\\_kovalchuk@mail.ua](mailto:serhiy_kovalchuk@mail.ua).

**Скрипкин Михайло Олександрович** – магістрант кафедри системного програмного забезпечення, Одеський національний політехнічний університет; проспект Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; E-mail: [mishkinstvo@outlook.com](mailto:mishkinstvo@outlook.com).

**Скрипкин Михаил Александрович** – магістрант кафедры системного программного обеспечения, Одесский национальный политехнический университет; пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044; E-mail: [mishkinstvo@outlook.com](mailto:mishkinstvo@outlook.com).

**Skripkin Mihailo** – master student of Department of System Software, Odessa National Polytechnic University; Shevchenko avenue, 1, Odessa, 65044, Ukraine; E-mail: [mishkinstvo@outlook.com](mailto:mishkinstvo@outlook.com).

УДК 004.89

И. В. БРЫГАРЬ, К. Е. ЗОЛОТЬКО

## ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕРФЕЙСУ ОНТОЛОГІЙ У ЕКСПЕРТНИХ СИСТЕМАХ ТУРОПЕРАТОРІВ

В работе рассмотрена роль онтологий в экспертных системах туроператоров, принципы построения интерфейса на основе онтологий, представления и использования, детально рассмотрены семантическую сеть для решения этой задачи. Актуальность темы заключается в том, что несмотря на то, что существует большое количество методов и алгоритмов для задачи составления результата по заданным параметрам, еще не существует универсального алгоритма, который бы осуществлял такую работу. Потому данное направление развивается в различных примерах использования и задачи такого типа предусматривают наличие выбора для пользователя, где свобода действий является существенной составляющей интеллектуальных задач. Очень важным фактором в интерфейсе онтологий в экспертных системах является интеллектуальный, простой графический вид, который с легкостью могут использовать начинающие, это является ключевым фактором проектирования системы, которая основана на знаниях. Это значит, что использование экспертных систем в компаниях и корпорациях позволяет избежать многих ошибок при принятии решений и таким образом повысить прибыль.

**Ключевые слова:** онтология, экспертная система, лингвистические переменные, картографический сервис, geocoding, google maps api.

У роботі розглянуто роль онтологій в експертних системах туроператорів, принципи побудови інтерфейсу на основі онтологій, представлення та використання, детально розглянуто семантичну мережу для вирішення цієї задачі. Актуальність теми полягає в тому, що не зважаючи на те, що є велика кількість методів та алгоритмів для задачі складання результату по заданим параметрам, ще не існує універсального алгоритму, який би здійснював таку роботу. Тому це дане напрямлення розвивається у різноманітних прикладах використання і задачі такого типу передбачають наявність вибору для користувача, де свобода дій є істотною складовою інтелектуальних завдань. Дуже важливим фактором в інтерфейсі онтологій у експертних системах являється інтелектуальний, простий графічний вид, який з легкістю можуть використовувати початківці, це є ключовим фактором проектування системи, яка заснована на знаннях. Це означає, що використання експертних систем в компаніях і корпораціях дозволяє уникнути багатьох помилок при прийнятті рішень і таким чином підвищити прибуток.

**Ключові слова:** онтологія, експертна система, лінгвістичні змінні, картографічний сервіс, geocoding, google maps api.

This article examines the role of ontologies tour operators in expert systems, principles of ontology based interface, presentation and use, detail the semantic network to solve this problem. Actuality is that despite the fact that a large number of methods and algorithms for the problem of the result on specified parameters, yet there is no universal algorithm that would have carried out such work. For, this napravlyannya develops various application examples and problems of this type include the availability of choice to the user, where discretion is an essential component of intellectual tasks. This means matched using expert systems in companies and corporations to avoid many mistakes in decision-making and thereby increase profits.

**Keywords:** ontology, expert systems, linguistic variables, mapping service, geocoding, google maps api.

**Вступ.** Тільки недавно онтології були переосмислені, і в комп'ютерних технологіях почали здобувати більш масовий характер, це досить нова і мало розроблена галузь прикладної лінгвістики. Онтології використовуються як джерела даних для різних комп'ютерних програм, наприклад – інформаційний пошук, аналіз текстів, витяг знань, – дозволяючи більш ефективно обробляти складну і різноманітну інформацію [1–5]. В даний час в цій області ведеться ряд масштабних розробок, в яких вирішується питання з приводу автоматизації. Існує велика кількість різних списків і баз даних, і виникає питання, як гарантувати їх відповідність сучасному стану речей, і бути впевненими, що вони точні й повні, а так само забезпечити достатню детальність представлених даних. Існуючі онтології вимагають постійного поповнення і вдосконалення. У зв'язку з цим, з'являються ідеї автоматичних та напівавтоматичних методів для не тільки поновлення онтологій, але і для їх створення [6–10].

**Мета задачі та дослідження.** В даний час велике число різних компаній і фірм починають надавати послуги з організації подорожей і поїздок в різні країни світу. При цьому, як у таких компаній, так і у людей, які відправляються в такі поїздки, виникає проблема вибору відповідного варіанту. Одним з можливих шляхів вирішення цієї проблеми є використання елементів штучного інтелекту та, зокрема експертних систем, для вибору відповідного варіанту.

У зв'язку з великим обсягом і, в більшості випадків, неструктурованість інформації, такі експертні системи можуть бути засновані на елементах нечітких множин, методи пошуку в просторі станів з використанням евристик і теорії графів [11–14]. Метою досліджень

було рішення задачі, за допомогою якої можна автоматизувати великий життєвий цикл роботи туроператорів роботи з клієнтами, внаслідок чого скорочується час пошуку туру, а також збільшується кількість релевантного вибору на основі онтологічного інтерфейсу в експертних системах з самонавчанням.

**Онтології та лінгвістичні змінні.** Під онтологією розуміється щось більше, ніж просто деталізований набір понять і відносин. У онтологію включаються і обмеження, що накладаються на відносини в рамках даної галузі. Це певний набір аксіом, який будується на базі понять і відносин між ними. Таким чином, наприклад, в рамках штучного інтелекту можна описати онтологію програми, визначивши безліч об'єктів і зв'язавши їх з описами, а також запровадивши формальні аксіоми, які обмежують інтерпретацію і спільне вживання цих термінів. У штучному інтелекті онтології використовуються для формальної специфікації понять і відносин, які характеризують певну область знань. Оскільки комп'ютер не може розуміти, як людина, стан речей в світі, йому необхідно подання всієї інформації в формальному вигляді. Таким чином, онтології є своєрідною моделлю навколишнього світу, а їх структура така, що легко піддаються машинній обробці і аналізу. Онтології забезпечують систему відомостями про добре описаної семантиці заданих слів і вказують ієрархічну будову області, взаємозв'язок елементів. Все це дозволяє комп'ютерним програмам за допомогою онтологій робити умовиводи з представленої інформації і маніпулювати ними [15–20].

Онтології працюють з лінгвістичними змінними, наприклад лінгвістична змінна «клімат» може мати



значення «холодний», «помірний», «жаркий», фрази, значення яких бере змінна, в свою чергу є іменами нечітких змінних і описується нечіткою множиною. У математичному визначенні лінгвістичної змінної є наступне:  $\{x, T(x), X, G, M\}$ , де  $x$  - ім'я змінної,  $T(x)$  – деякий безліч значень лінгвістичної змінної  $x$ , кожне з яких є нечіткою змінною на безлічі  $X$ ;  $G$  є синтаксичне правило для утворення імен нових значень  $x$ ;  $M$  є семантична процедура, що дозволяє перетворити нове ім'я, утворене процедурою  $G$ , в нечітку змінну (задати вид функції належності), асоціює ім'я з його значенням, поняттям.

В інформаційних системах онтології – це моделі (артефакти, штучні об'єкти) того, що існує в деякій предметній області та описується формальною мовою, а також надає назви вузлам та дугам у семантичній мережі або імена предикатам та константам у логічних формулах.

- *Формальна*: описується мовоюпредставлення знань та однозначно розуміється машинами.
- *Явна*: описує знання так, щоб це було зрозуміло машинам. Те, що присутнє неявно в онтології, не може інтерпретуватись машинами.
- *Є спільною*: онтологія відображає згоду між людьми про предметну область.
- *Концептуалізація*: онтологія оперує концепціями та відношеннями між ними; замість опису конкретних ситуацій, онтологія намагається охопити якомога ширші моменти.

При розробці та використанні онтології розглядаються по-різному, наприклад інженер по знаннях розглядає онтології у графічному вигляді. Для збереження та передачі онтології подаються за допомогою формальних мов. Система (механізм) виведення розглядає онтологію як множину аксіом, яка описує деяку логічну теорію.

У прикладі для подорожей задіяні декілька предметних областей:

- подорож залізницею, літаком чи авто;
- знання про ціни, валюти та методи оплати;
- географічні знання про місця, відстані.

За рівнями, онтології поділяються на наступні:

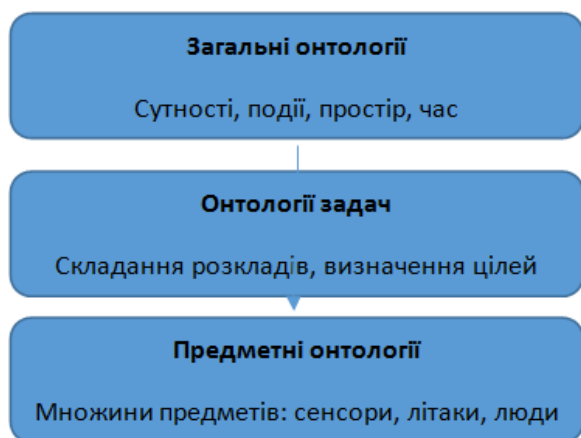


Рис. 1 – Рівні онтологій

За типами, онтології поділяються на:

- Онтології верхнього рівня: описує найбільш

загальні концепції, наприклад, час, простір, події, які є незалежними від конкретної області чи задачі. Є сенс уніфікувати онтологію верхнього рівня для великої кількості користувачів.

- Онтології області: описує словник, який пов'язаний із предметною областю, шляхом конкретизації концепцій з онтології верхнього рівня.

- Онтології задач: описує словник, який пов'язаний з загальною задачею чи активністю, шляхом конкретизації онтології верхнього рівня.

- Онтології рівня застосувань: це найбільш конкретні онтології. Концепції в онтології верхнього рівня часто відповідають ролям, які грають елементи предметної області під час певної дії.

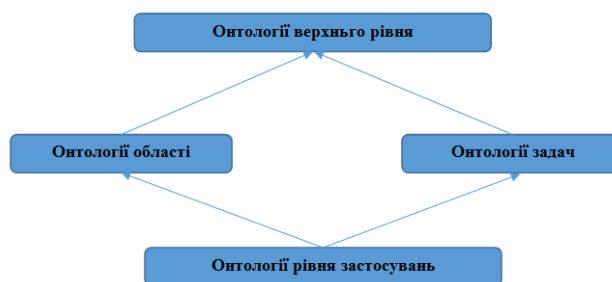


Рис. 2 – Типи онтологій

**Приклади використання онтологій. В ролі прикладів використання онтологій можна виділити наступні:**

- Інформаційна інтеграція – використання онтологій для інтеграції гетерогенних джерел інформації. Часто різні бази даних містять одну й ту саму інформацію, проте описують її різними моделями даних. Також, онтологія може використовуватись як медіатор (посередник) між схемами баз даних, дозволяючи інтегрувати та інтерпретувати інформацію з різних джерел. Так одна база даних може розглядати міста та країни як географічні місця різних типів, а інша – однакового типу, але з різними означенням властивості (бути містом чи країною).

- Видобування інформації з веб-документів – одна з головних галузей (завдяки Google). Ідея полягає у покращенні точності результатів пошуку та обробки інформації, ґрунтуючись на семантичній інформації, яка міститься в документах та запитах. При пошуку «столиця України» система поверне документи про Київ.

- Експертні системи – тут онтології можуть використовуватись для формалізації знань експерта. Запитання в межах предметної області можуть розглядатись як пошук або виведення в такій онтології. (додаткова інформація див. <http://journals.urau.ua/search/category/255>)

- Управління знаннями – в компаніях та інших організаціях, або в спільнотах, індивідуальні знання можуть розглядатись як стратегічний ресурс, який бажано поширювати між іншими членами та систематично підтримувати. Цей процес має назву «Управління знаннями». Онтології надають можливість уніфікувати цей процес під спільною концептуальною моделлю предметної області.

**Географічна онтологія.**

Географічна онтологія складається із наступного:

- включає країни та континенти з їх регіонами, а також елементами (ріками, шляхами, містами тощо);
- описує їх властивості (місто займає деякий регіон; географічний регіон європейського міста - Європа);

- включає конкретні екземпляри (міста, країни, континенти) та пов'язує їх.

Географічну онтологію можна представити у виді семантичної мережі [21-24, 19]:

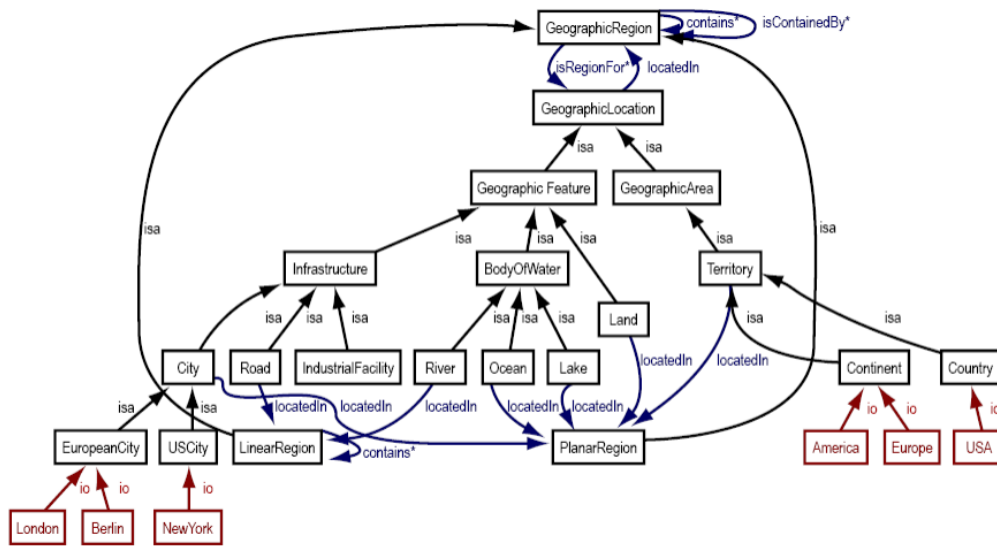


Рис. 3 – Семантична мережа географічної онтології

Представлення географічної онтології на мові OWL:

```

...
<owl:Class rdf:ID="City">
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty rdf:resource="#locatedIn"/>
      <owl:allValuesFrom rdf:resource="#PlanarRegion"/>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="#Infrastructure"/>
  <owl:disjointWith rdf:resource="#Road"/>
  <owl:disjointWith rdf:resource="#IndustrialFacility"/>
</owl:Class>
<owl:ObjectProperty rdf:ID="locatedIn">
  <rdf:type rdf:resource="#owl:FunctionalProperty"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#GeographicLocation"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#GeographicRegion"/>
  <owl:inverseOf rdf:resource="#isRegionFor"/>
</owl:ObjectProperty>
<EuropeanCity rdf:ID="London"/>
...

```

Представлення географічної онтології в логіці:

$\exists locatedIn.T$	$\sqsubseteq$	$GeographicLocation$
$T$	$\sqsubseteq$	$\forall locatedIn.GeographicRegion$
$\exists contains.T$	$\sqsubseteq$	$GeographicRegion$
$T$	$\sqsubseteq$	$\forall contains.GeographicRegion$
$GeographicLocation$	$\sqsubseteq$	$= 1 locatedIn$
$Continent$	$\sqsubseteq$	$GeographicLocation$
$Continent (Europe)$		
$PlanarRegion$	$\sqsubseteq$	$GeographicRegion$
$City$	$\sqsubseteq$	$GeographicLocation \sqcap \forall locatedIn.PlanarRegion$
$EuropeanCity$	$\equiv$	$City \sqcap \forall locatedIn.\exists contains^-. \exists locatedIn^- .\{Europe\}$

Наприклад вираз:

$$EuropeanCity \equiv City \sqcap \forall locatedIn.\exists contains^-. \exists locatedIn^- .\{Europe\}$$

на мові першого порядку має вигляд:

$$\forall x : (\text{EuropeanCity}(x) \leftrightarrow$$

$$\text{City}(x) \wedge \forall y : (\text{locatedIn}(x, y) \rightarrow \exists z : (\text{contains}(z, y) \wedge \text{locatedIn}(\text{Europe}, z))))$$

що означає: «Європейські міста – це міста, для яких всі регіони, в яких вони знаходяться, містяться в деякому географічному регіоні, в якому розташована Європа».

**Природні мови.** Природними називаються "звичайні", "розмовні" мови, які складаються стихійно і протягом довгого часу. Історія кожного такого мови невіддільна від історії народу, що володіє їм [24–31]. Природна мова, призначений, перш за все, для повсякденного спілкування, має цілий ряд своєрідних рис:

- Майже всі слова мають не одне, а кілька значень.
- Часто зустрічаються слова з неточним і неясним змістом.
- Значення окремих слів і виразів залежать не тільки від них самих, але і від їх оточення (контексту).
- Поширені синоніми (різне звучання - однаковий сенс) і омоніми (однакове звучання - різне значення).
- Одні й ті ж предмети можуть мати кілька назв.
- Є слова, що не позначають ніяких предметів.
- Багато угоди щодо вживання слів не формулюються явно, а тільки передбачаються і для кожного правила є винятки і т.д.

Основними функціями природної мови є:

- Комунікативна (функція спілкування).
- Когнітивна (пізнавальна функція).
- Емоційна (функція формування особистості).
- Директивна (функція впливу).

Будь-яка мова – і природний і штучний – має набір певних правил. Вони можуть бути явно і строго сформульованими (формалізованими), а можуть допускати різні варіанти їх використання.

**Бібліотеки та програми для роботи з картографічними сервісами.** Для робіт и з картографічними сервісами існує достатня кількість програм та бібліотек для використання. Розглянемо найбільш відомі та застосовувані.

Google Maps:

Сервіс являє собою карту та супутникові знімки всього світу. З сервісом інтегрований бізнес-довідник і карта автомобільних доріг, з пошуком маршрутів.

З сервісом також пов'язаний застосунок Google Earth – окрема програма для Microsoft Windows, а також GNU/Linux, Mac OS. Як і Google Maps, програма Google Earth дозволяє переглядати знімки земної поверхні, змінювати масштаб і будувати маршрути пересування. Її перевагою є тривимірне зображення земної поверхні (з урахуванням рельєфу), можливість спостереження під довільним кутом (а не тільки прямою згори), поступове уточнення зображення по мірі завантаження детальніших фотознімків, можливість плавної зміни масштабу.

Open StreetMap:

Відкритий проект зі створення загальнодоступних мап світу силами спільноти. На протипагу власницьким наборам даних, таким як Google Map Maker, ліцензія OpenStreetMap гарантує вільний доступ до

усіх наявних даних.

Геопросторові дані ліцензуються на умовах Open Database License[3], яка дозволяє їх використання з будь-якою, у т.ч. комерційною метою, за умови зазначення походження даних.

Документація, створені на основі геопросторових даних OpenStreetMap мапи, згенеровані тайли поширюються на умовах ліцензії Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.0 (CC-BY-SA).

Особливості:

- Проект охоплює всю поверхню Землі.
- OpenStreetMap, по суті, є не мапою у звичному розумінні, а базою геопросторових даних. Вона містить географічні координати окремих точок та інформацію про об'єкти вищого порядку — лінії, що з'єднують точки, зв'язки, які можуть включати точки й лінії, а також атрибути всіх зазначених об'єктів. Тому на основі одних і тих же даних OSM побудовані різноманітні сервіси, що відрізняються як способом відображення, так і функціональністю.

- Мапи двовимірні, без показу висот над рівнем моря, ізоліній. Хоча також набуває поширення позначення висотних характеристик окремих об'єктів та розвиваються проекти з їх рендерингу.

- Дані мап, як всієї Землі, так і окремих її ділянок, можуть бути завантажені як у внутрішньому форматі OSM, так і конвертованими в графічні формати або формати GPS-навігаторів.

Yandex Maps:

Користувачі можуть переглядати карту в будь-якому з трьох відображень: схему, супутниковий знімок і гібрид (поєднану). За допомогою сервісу можна шукати за адресами, вулицями міст, регіонами, країнами та організаціями, вимірювати відстані між географічними об'єктами та прокладати автомобільні маршрути. Для певних міст доступний індикатор ситуації на дорогах – сервіс Яндекс.Затори. Рівень завантаженості доріг подано як чотириколірну графічну та десятибальну цифрову шкалу. Дані Яндекс. Заторів можуть враховуватися під час автоматичного прокладання маршрутів. Інформація про дорожні події, що отримується з мобільних Яндекс. Карт, також впливає на рекомендований маршрут. На картах є інтерактивні схеми транспортних розв'язок з рекомендаціями, як оптимально ними проїхати. На сервісі можна в реальному часі переглядати зображення з веб-камер.

Кожен сервіс має Geocoding (геокодування), яке дозволяє призначити об'єкту карти (заданому, зазвичай, поштовою адресою або унікальною назвою) певного універсального географічного ідентифікатора (наприклад, географічні координати на земній кулі - широта і довгота).

Зворотне геокодування навпаки використовує географічні координати, щоб знайти опис місця розташування (наприклад, поштову адресу будівлі, назву поселення тощо).

**Висновки.** У роботі було розглянуто роль онтологій в експертних системах туператорів, принципи

побудови інтерфейсу на основі онтологій, представлення та використання, детально розглянуто семантичну мережу для вирішення цієї задачі.

Інтерес теми полягає в тому, що не зважаючи на те, що є велика кількість методів та алгоритмів для задачі складання результату по заданим параметрам, ще не існує універсального алгоритму, який би здійснював таку роботу. Тому що дане направлення розвивається у різноманітних прикладах використання і задачі такого типу передбачають наявність вибору для користувача, де свобода дій є істотною складовою інтелектуальних завдань.

Дуже важливим фактором в інтерфейсі онтологій у експертних системах являється інтелектуальний, простий графічний вид, який з легкістю можуть використовувати початківці, це є ключовим фактором проектування системи, яка заснована на знаннях.

Таким чином, що використання експертних систем в компаніях і корпораціях дозволяє уникнути багатьох помилок при прийнятті рішень і таким чином підвищити прибуток.

#### Список використаної літератури:

1. Стрижак, О. Є. Засоби онтологічної інтеграції і супроводу розподілених просторових та семантичних інформаційних ресурсів [Текст] / О. Є. Стрижак // Екологічна безпека та природокористування. – 2013. – № 12. – С. 166–176.
2. Попова, М. А. Онтологический интерфейс как средство представления информационных ресурсов в ГИС-среде [Текст] / М. А. Попова, А. Е. Стрижак // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. – 2013. – Т. 26, № 1 (65). – С. 127–135.
3. Поспелов, Д. А. Интеллектуальные интерфейсы для ЭВМ новых поколений [Текст] / Д. А. Поспелов // Электронная вычислительная техника. – 1989. – № 3. – С. 4–20.
4. Степашко, В. С. О задаче структуризации знаний эксперта в области моделирования по эмпирическим данным [Текст] / В. С. Степашко // Кибернетика и вычислительная техника. – 1991. – № 92. – С. 80–83.
5. Гаврилова, Т. А. Онтологический подход к управлению знаниями при разработке корпоративных систем автоматизации [Электронный ресурс] / Т. А. Гаврилова // Бизнес Инжиниринг Групп. – Режим доступа: \www/URL: [http://bigc.ru/publications/bigspb/km/ontol\\_podhod\\_to\\_uz.php](http://bigc.ru/publications/bigspb/km/ontol_podhod_to_uz.php)
6. Грибова, В. В. Онтологическая парадигма программирования [Текст]: материалы 2й Международной научно-технической конференции / В. В. Грибова, А. С. Клещев // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. – 2012. – С. 213–220.
7. Піднебесна, Г. А. Концепція використання онтологій для конструювання засобів індуктивного моделювання [Текст]: зб. наук. пр. / Г. А. Піднебесна // Індуктивне моделювання складних систем. – 2013. – № 5. – С. 248–255.
8. Варшавський, П. Метод поиска решений в интеллектуальных системах поддержки принятия решений на основе прецедентов [Текст] / П. Варшавский, Р. Алехин // International Journal "Information Models and Analyses". – 2013. – Т. 2, № 4. – С. 385–392.
9. Evangelos Petroustos. Google Maps: Power Tools for Maximizing the API [Text] / Evangelos Petroustos. – McGraw Hill Professional, 2014. – 464 с.
10. Sly, J. M. Getting around with Google Maps: A programmer's guide to the Google Maps API [Text] / J. M. Sly. – CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014. – 104 p.
11. Dincer, A. Google Maps JavaScript API Cookbook [Text] / A. Dincer, B. Uraz. – Packt Publishing, 2013. – 316 p.
12. Svennerberg, G. Beginning Google Maps API 3 (Expert's Voice in Web Development) [Text] / G. Svennerberg. – Apress, 2010. – 328 p. doi:[10.1007/978-1-4302-2803-5](https://doi.org/10.1007/978-1-4302-2803-5)
13. Udell, S. Beginning Google Maps Mashups with Maplets, KML, and GeoRSS: From Novice to Professional [Text] / S. Udell. – Apress, 2008. – 416 p.
14. Гома, Х. UML. Проектирование систем реального времени, параллельных и распределенных приложений [Текст] / Х. Гома. – Москва: ДМК Пресс, 2002. – 704 с.
15. Giarratano, J. C. Expert Systems: Principles and Programming [Text] / J. C. Giarratano, G. D. Riley. – Course Technolog, 2004. – 288 p.
16. Beard, M. Expert Systems: An introduction [Text] / M. Beard. – Matthew Beard, 2014. – 15 p.
17. Durkin, J. Expert Systems: Design and Development [Text] / J. Durkin. – Macmillan Coll Div, 1994. – 800 p.
18. Martin, J. Building Expert Systems: A Tutorial [Text] / J. Martin. – Prentice Hall, 1988. – 400 p.
19. Фаулер, М. UML в кратком изложении. Применение стандартного языка объектного моделирования [Текст]: пер. с англ. / М. Фаулер, К. Скотт. – Москва: Мир, 1999. – 191 с.
20. Перегудов, Ф. И. Введение в системный анализ [Текст] / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – Москва: Высшая школа, 1989. – 368 с.
21. Акименко, В. В. Основы системного анализа объектов и процессов компьютеризации [Текст]: конспект лекций / В. В. Акименко. – Киев: Европейский университет, 2002. – 96 с.
22. Месарович, У. Теория многоуровневых иерархических систем [Текст] / У. Месарович, И. Такахага, Д. Мако. – Москва: Мир, 1982. – 288 с.
23. Мусеев, Н. Н. Математические задачи системного анализа [Текст] / Н. Н. Мусеев. – Москва: Наука, 1981. – 488 с.
24. Bohhs, U. UML и Rational Rose [Text] / U. Bohhs, M. Bohhs. – Laura, 2000. – 580 p.
25. Маляшек, Л. А. Анализ требований и проектирование систем. Разработка информационных систем с использованием UML [Текст] / Л. А. Маляшек. – Москва: Вильямс, 2002. – 432 с.
26. Перегудов, Ф. И. Введение в системный анализ [Текст] / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – Москва: Высшая школа, 1989. – 368 с.
27. Розенберг, Д. Применение объектного моделирования с использованием UML и анализ прецедентов. [Текст] / Д. Розенберг, К. Скотт. – Москва: ДМК Пресс, 2002. – 436 с.
28. Дари, К. AJAX и PHP. Разработка динамических веб-приложений [Текст] / К. Дари, Б. Бринзаре, Ф. Черчез-Гоца, М. Бусика. – Москва: Символ-Плюс, 2006. – 336 с.
29. Веллинг, Л. Разработка web-приложений с помощью PHP и MySQL [Текст] / Л. Веллинг, Л. Томсон. – Москва: Вильямс, 2010. – 837 с.
30. Дунаев, В. Сценарии для Web-сайта: PHP и JavaScript [Текст] / В. Дунаев. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2008. – 576 с.
31. Сирота, С. В. Розробка генератора тестів для "MOODLE" на базі онтології [Текст] / С. В. Сирота, В. О. Ліскін // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 5/2 (77). – С. 44–48. doi:[10.15587/1729-4061.2015.51334](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51334)

#### Bibliography (transliterated):

1. Stryzhak, O. E. (2013). Means ontological integration and maintenance of distributed spatial and semantic information resources. Environmental and Natural Resources, 12, 166–176.
2. Popova, M. A., Strizhak, A. E. (2013). Ontologicheskii interfeis kak sredstvo predstavleniia informatsionnyh resursov v GIS-srede. Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo, 26(1(65)), 127–135.
3. Pospelov, D. A. (1989). Intellektual'nye interfeisy dlia EVM novyh pokolenii. Elektronnaia vychislitel'naia tehnika, 3, 4–20.
4. Stepashko, V. S. (1991). O zadache strukturizatsii znanii eksperta v oblasti modelirovaniia po empiricheskim danniam. Kibernetika i vychislitel'naia tehnika, 92, 80–83.
5. GavriloVA, T. A. Ontologicheskii podhod k upravleniiu znaniiami pri razrabotke korporativnyh sistem avtomatizatsii. Biznes Inzhenering Grupp. Available at: [http://bigc.ru/publications/bigspb/km/ontol\\_podhod\\_to\\_uz.php](http://bigc.ru/publications/bigspb/km/ontol_podhod_to_uz.php)
6. GriboVA, V. V., Kleshchev, A. S. (2012). Ontologicheskaiia paradigma programmirovaniia. Open Semantic Technologies for Intelligent Systems, 213–220.
7. Celestial, G. A. (2013). The concept of using ontologies for constructing of inductive modeling. Inductive modeling of complex systems, 5, 248–255.
8. Varshavskyy, P., Alekhin, R. (2013). Method in a Search-making support systems yntellektualnyh Adoption decisions based pretsedentov. International Journal "Information Models and Analyses", 2 (4), 385–392.
9. Evangelos Petroustos. (2014). Google Maps: Power Tools for Maximizing the API. McGraw Hill Professional, 464.



10. Sly, J. M. (2014). Getting around with Google Maps: A programmer's guide to the Google Maps API. CreateSpace Independent Publishing Platform, 104.
11. Dincer, A., Uraz, B. (2013). Google Maps JavaScript API Cookbook. Packt Publishing, 316.
12. Svennerberg, G. (2010). Beginning Google Maps API 3 (Expert's Voice in Web Development). Apress, 328. doi:[10.1007/978-1-4302-2803-5](https://doi.org/10.1007/978-1-4302-2803-5)
13. Udell, S. (2008). Beginning Google Maps Mashups with Maplets, KML, and GeoRSS: From Novice to Professional. Apress, 416.
14. Goma, X. (2002). Proektirovanie sistem real'nogo vremeni, paralelnykh i raspredelennykh prilozhenii. Moscow: DMK Press, 704.
15. Giarratano, J. C., Riley, G. D. (2004). Expert Systems: Principles and Programming. Course Technology, 288.
16. Beard, M. (2014). Expert Systems: An introduction. Matthew Beard, 15.
17. Durkin, J. (1994). Expert Systems: Design and Development. Macmillan Coll Div, 800
18. Martin, J. (1988). Building Expert Systems: A Tutorial. Prentice Hall, 400.
19. Fowler, M., Scott, K. (1999). UML Distilled. Applying the Standard Object Modeling Language. Moscow: Mir, 191.
20. Peregudov, F. I., Tarasenko, F. P. (1989). Introduction to systems analysis. Moscow: Higher School, 368.
21. Akimenko, V. V. (2002). Osnovy sistemnogo analiza ob'ektov i protsessov komp'yuterizatsii. Kyiv: Evropeyskyy University, 96.
22. Mesarovic, Y., Takahara, I., Mako, D. (1982). Teoriia mnogourovnevnykh ierarhicheskikh sistem. Moscow: Mir, 288.
23. Moiseev, N. N. (1981). Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza. Moscow: Nauka, 488.
24. Bohs, U., Bohs, M. (2000). UML и Rational Rose. Laura, 580.
25. Matsyashchek, L. A. (2002). Requirements analysis and system design. Development of information systems using UML. Moscow: Williams, 432.
26. Perehuda, F. I., Tarasenko, F. P., (1989). Introduction to systems analysis. Moscow: High School, 368.
27. Rosenberg, D., Scott, K. (2002). Application object modeling using UML analysis and unprecedented. Moscow: DMK Press, 436.
28. Dari, K., Brinzare, B., Cherchez-Toza, F., Busika, M. (2006). AJAX i PHP. Razrabotka dinamicheskikh veb-prilozhenii. Moscow: Simvol-Plus, 336.
29. Welling, L., Thomson, L. (2010). Development of web-applications using PHP and MySQL. Moscow: Williams, 837.
30. Dunaev, V. (2008). Scripts for Web-site. JavaScript. Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 576.
31. Syrota, S., Liskin, V. (2015). Development of ontology based quiz generator for "Moodle. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(2(77)), 44–48. doi:[10.15587/1729-4061.2015.51334](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51334)

Поступила (received) 08.01.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Використання інтерфейсу онтологій у експертних системах туруператорів/ І. В. Бригар, К. Є. Золотко**// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.38–43. – Бібліогр.: 31 назв. – ISSN 2079-5459.

**Использование интерфейса онтологий в экспертных системах тероператоров/ И. В. Брыгарь, К. Е. Золотко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.38–43. – Бібліогр.: 31 назв. – ISSN 2079-5459.

**Use of ontology interface in expert systems of tourism operators/ I. V. Brygar, K. E. Zolotko**//Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No 4 (1176). – P. 38–43. – Bibliogr.: 31. – ISSN 2079-5459.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Брыгарь Иван Валериевич** – магістр, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, кафедра компьютерных технологий, пр. Гагарина, 72, г. Днепр, Украина, 49010; e-mail: [smitbmx@gmail.com](mailto:smitbmx@gmail.com).

**Золотко Константин Евгеньевич** – кандидат технических наук, доцент, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, кафедра компьютерных технологий, пр. Гагарина, 72, г. Днепр, Украина, 49010; e-mail: [zolt66@gmail.com](mailto:zolt66@gmail.com).

**Бригар Иван Валерійович** – магістр, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, кафедра комп'ютерних технологій, пр. Гагаріна, 72, м Дніпро, Україна, 49010; e-mail: [smitbmx@gmail.com](mailto:smitbmx@gmail.com).

**Золотко Костянтин Євгенійович** – кандидат технічних наук, доцент, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, кафедра комп'ютерних технологій, пр. Гагаріна, 72, м Дніпро, Україна, 49010; e-mail: [zolt66@gmail.com](mailto:zolt66@gmail.com).

**Brygar Ivan Valeriiovich** – master, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, department of computer technology, Gagarina, 72, of the Dnipro, Ukraine, 49010;. e-mail: [smitbmx@gmail.com](mailto:smitbmx@gmail.com).

**Zolotko Konstantin Evgenevich** – Ph.D., Associate Professor, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Department of Computer Technologies, Gagarina, 72, of the Dnipro, Ukraine, 49010;. e-mail: [zolt66@gmail.com](mailto:zolt66@gmail.com).



УДК 004.021

О. В. МИНЬКО, К. Е. ЗОЛОТЬКО

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РАЗРЕЖЕННЫХ МАТРИЦ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ OPENMP

Работа посвящена параллельному вычислению разреженных матриц. В ходе работы были спроектированы и оптимизированы с помощью языка программирования C алгоритмы для работы с разреженными матрицами для следующих операций: транспонирование, умножение разреженных матриц, умножение разреженной матрицы на плотный вектор, сложение разреженных матриц. Для хранения данных разработан гибкий алгоритм, который применяет наиболее оптимальный вариант хранения для конкретного типа операций. Были применены процедуры выделения плотных подматриц в разреженных матрицах. Для ускорения работы программы используется технология параллельного вычисления OpenMP, которая дает возможность на аппаратном уровне минимизировать ресурсы и время выполнения.

**Ключевые слова:** разреженные матрицы, формат crs, операции над разреженными матрицами, параллельная реализация, openmp.

Робота присвячена паралельному обчисленню розріджених матриць. В ході роботи були спроектовані і оптимізовані за допомогою мови програмування C алгоритми для роботи з розрідженими матрицями для наступних операцій: транспонування, множення розріджених матриць, множення розрідженої матриці на щільний вектор, додавання розріджених матриць. Для зберігання даних розроблений гнучкий алгоритм, який застосовує найбільш оптимальний варіант збереження для конкретного типу операцій. Були застосовані процедури виділення щільних підматриць в розріджених матрицях. Для прискорення роботи програми використовується технологія паралельного обчислення OpenMP, яка дає можливість на апаратному рівні мінімізувати ресурси і час виконання.

**Ключові слова:** розріджені матриці, формат crs, операції над розрідженими матрицями, паралельна реалізація, openmp.

The work is dedicated to parallel computing sparse matrices. The work has been designed and optimized using the C programming language algorithms for working with sparse matrices for the following operations: transposition, multiplication of sparse matrices and sparse matrix multiplication on a tight vector addition of sparse matrices. For data storage it developed a flexible algorithm that uses the most appropriate option to save for a specific type of operation. Selection procedures were applied in dense submatrices sparse matrices. To speed up the program using parallel computing technology OpenMP, which makes it possible to minimize the hardware resources and execution time.

**Keywords:** sparse matrices, crs format operations on sparse matrices, parallel implementation, openmp.

**Введение.** Будем рассматривать произвольные разреженные матрицы (sparse matrix). Разреженная матрица определяется как матрица с преимущественно нулевыми элементами. Среди специалистов нет единства в определении того, какое именно количество ненулевых элементов делает матрицу разреженной. Одним из возможных вариантов для  $m \times n$  матриц является  $o(m \cdot n)$  ненулевых элементов.

Методы хранения и обработки разреженных матриц в течение последних десятилетий вызывают интерес у широкого круга исследователей [1–4]. В ходе работы было разработано программно-математическое обеспечение для работы с основными операциями с разреженными матрицами и применены гибкие процедуры выделения плотных матриц с целью повышения производительности разработанного программного обеспечения.

В качестве программного средства для распараллеливания и ускорения программного обеспечения используется технология OpenMP.

**Цель и задачи исследования.** Качество исходной конфигурации будем рассматривать произвольную разреженную матрицу  $A^{m \times n} = \|A_{ij}\|$  (вообще говоря  $m$  не равно  $n$ ) элементы которой представляют собой элементы множества  $\{0,1\}$ . Если интерпретировать матрицу как матрицу «субъекты-объекты», то множество  $U$  (множество строк матрицы) будет представлять собой множество субъектов  $R$  множество - множество объектов.

Как правило, ненулевые элементы не образуют четкой структуры и представляют собой случайно разбросанные точки. Однако, возможно существуют такие перестановки строк  $\{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}\}$  и столбцов  $\{r_{j1}, r_{j2}, \dots, r_{jn}\}$  исходной матрицы, что подмножества единичных элементов будут образовывать сущности некоторой формы. Назовём эквивалентными преобразованиями матрицы подстановки местами её строк или столбцов.

Цель данной работы состоит в разработке и анализе алгоритмов параллельной обработке разреженных матриц, а также исследование методов, которые эквивалентными преобразованиями перемещают единичные элементы так, чтобы сформировать некоторые конфигурации из единичных элементов, которые будут образовывать «плотные» подматрицы.

**Формат хранения данных.** Для хранения разреженной матрицы в работе будет применяться широко распространенный формат под названием CSR (Compressed Sparse Rows) или CRS (Compressed Row Storage), который использует три массива. Первый массив хранит значения элементов построчно (строки рассматриваются по порядку сверху вниз), второй – номера столбцов для каждого элемента, а третий – индексы первых элементов каждой строки.

Оценим объем памяти, необходимый для хранения разреженной матрицы в формате CRS:  $M = 8 \text{ NZ} + 4 \text{ NZ} + 4 (N + 1) = 12 \text{ NZ} + 4 \text{ N} + 4$ .

Пример изображен на рис. 1.

Матрица A

1				2	
		3	4		
			8	5	
	7	1			6

1	2	3	4	8	5	7	1	6
---	---	---	---	---	---	---	---	---

A.Value

0	4	2	3	3	5	1	2	5
---	---	---	---	---	---	---	---	---

A.Col

0	2	4	4	6	6	9
---	---	---	---	---	---	---

A.RowIndex

Рис. 1 – Формат CRS

© О. В. Минько, К. Е. Золотко. 2016

**Генерація модельних даних.** Для проведення експериментів был написан генератор модельных данных, работа которого заключается в следующем:

генерируются случайные разреженные матрицы со сгущениями, размеры которых  $m$  и  $n$  лежат в некотором диапазоне.

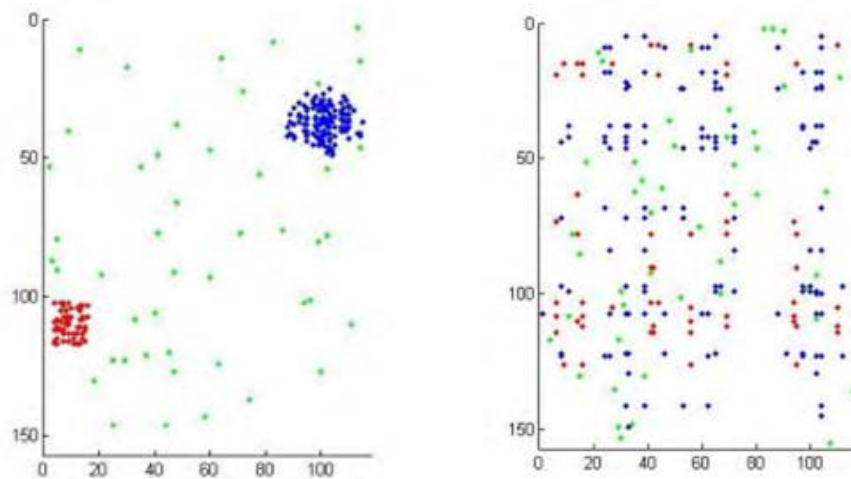


Рис. 2 – Пример сгенерированной разреженной матрицы с двумя сгущениями после третьего и четвертого этапов (матрицы А и В)

Генерация осуществляется следующей последовательностью действий:

- сгенерировать матрицу с равномерно распределёнными ненулевыми элементами;
- выбрать несколько случайных подматриц размеры, которых лежат в некотором диапазоне; при этом порядок размеров подматриц меньше порядка матрицы, например  $O(\sqrt{n})$  или  $O(n^\alpha)$ , где  $\alpha \leq 1 - \varepsilon$ , где  $\varepsilon \geq 0$  - некоторый порог;
- заполнить данные подматрицы некоторым количеством единиц; заполнение можно вести по определённому закону с определённой степенью интенсивности заполнения (например, можно использовать алгоритмы дискретизации изображений (Брезенхэма и др.), [7] (обозначим: А - матрица, полученная на данном этапе);
- осуществить большое случайных число транспозиций строк и столбцов (обозначим: В - матрица, полученная на данном этапе).

Пример генерации матрицы представлен на рис. 2. Элементы, принадлежащие разным сгущениям, визуализированы разными цветами. Шумовые элементы визуализированы зелёным цветом. Размер матрицы  $153 \times 112$ , число ненулевых элементов – 233.

**Алгоритм выделения плотных матриц.** Идея данного алгоритма выделения сгущений заключается в том, чтобы собрать ненулевые элементы как можно ближе к главной диагонали. Введём матрицу весов элементов  $W^{m \times n}$ . Зададим значение элементов таким образом, чтобы они возрастали по мере удаления от главной диагонали (например, линейно,  $a_i = k|i|$ , или экспоненциально,  $a_i = a^{|i|}$ , причём положим  $a_0 = 0$ ), матрица В. Умножим поэлементно матрицу В на матрицу W, просуммируем все элементы текущей матрицы, получим вес текущей конфигурации. Также введём переменную-счётчик k. На каждом шаге будем генерировать случайную перестановку из двух номеров строк или столбцов.

Очевидно, что вес будет уменьшаться в том случае, если единичные элементы будут располагаться ближе к центральной диагонали матрицы. Возможны некоторые модификации данного алгоритма, основанные на других методах глобальной оптимизации. На рис. 3 приведены результаты работы данного алгоритма (визуализированы только исходная и конечная матрицы). Как можно заметить из экспериментов, сгущения получают более разреженные, чем при работе алгоритмов, основанных на сходстве.

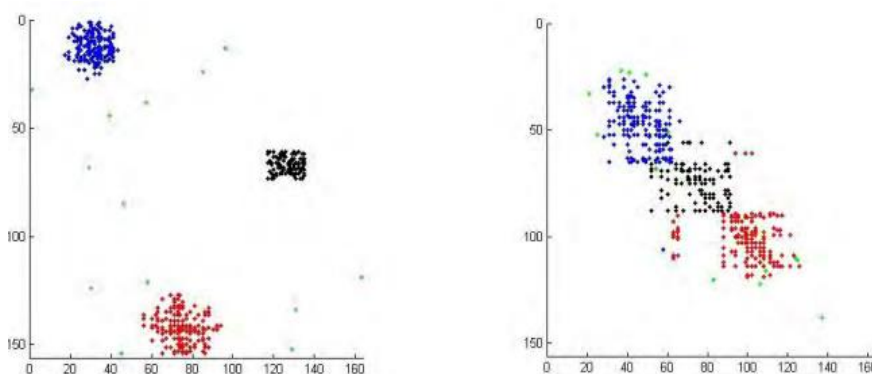


Рис. 3 – Результат выделения плотных матриц

**Умножения разреженной матрицы на разреженную матрицу и параллельная реализация.** Пусть дано матрица  $A_{p \times q}$  и матрица  $B_{q \times r}$ . Результат умножения матрица  $C_{p \times r}$  имеет элементы изображены на (1).

$$c_{ik} = \sum_{j=1}^q a_{ij} b_{jk}, \quad i = 1, \dots, p, k = 1, \dots, r. \quad (1)$$

Эта формула выражает элемент  $c_{ik}$  как скалярное произведение  $i$ -й строки  $A$  и  $k$ -го столбца  $B$ . Однако, если  $B$  задана строчным форматом, то к ее столбцам нет прямого доступа. Одно возможное решение этой проблемы заключается в транспонировании  $B$ . Тогда уравнение (1) будет иметь вид (2).

$$c_{ik} = \sum_{j=1}^q a_{ij} (B^T)_{kj}, \quad (2)$$

и использует только строки  $A$  и  $B^T$ .

Учитывая, что  $C$  хранится в формате CRS, важно избежать переупаковок. Для этого нужно обеспечить пополнение матрицы  $C$  ненулевыми элементами последовательно, по строкам - слева направо, сверху вниз. Нужно брать первую строчку матрицы  $A$  и умножить ее поочередно на все столбцы матрицы  $B$  (строки матрицы  $B^T$ ). В этом случае обеспечивается последовательное пополнение матрицы  $C$ , что позволяет дописывать элементы в массивы  $Values$  и  $Cols$ , а также формировать массив  $RowIndex$ .

Алгоритм умножения разреженной матрицы на разреженную матрицу:

1. Создать 2 вектора ( $Value$ ,  $Col$ ) и массив  $RowIndex$  длины  $N + 1$  для сохранения матрицы  $C$ .
2. транспонировать матрицу  $B$ .

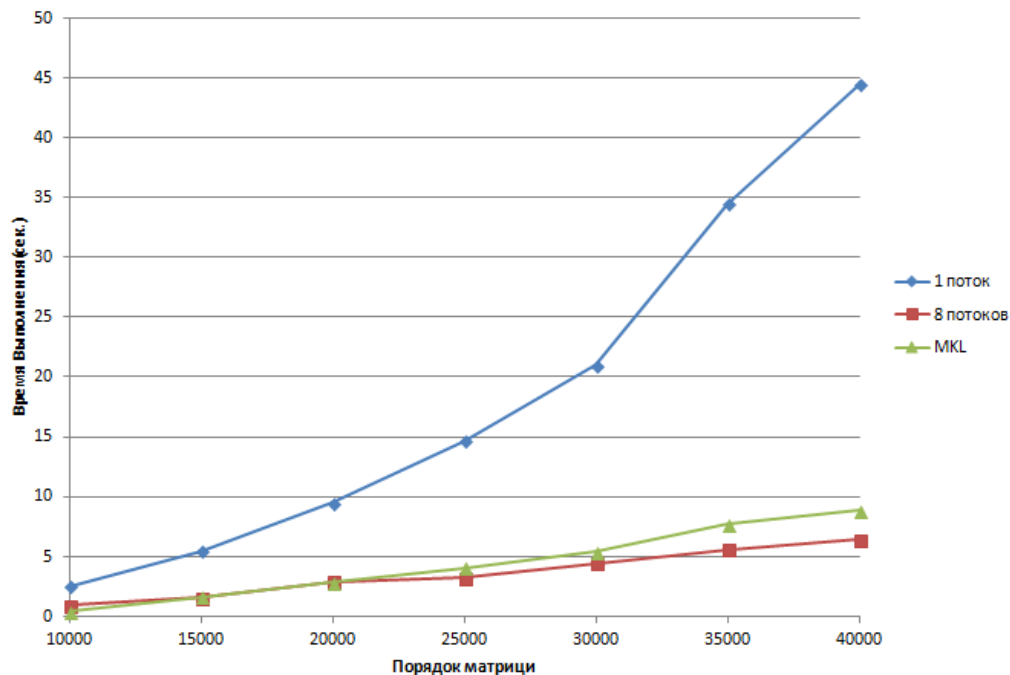


Рис. 4 – Сравнение времени умножения разреженных матриц (инфраструктура №1)

Проанализировав полученные результаты приходим к выводу, что наша реализация работает

3. в цикле по  $i$  от 0 до  $N - 1$  перебирайте все строки матрицы  $A$ . Для каждого  $i$  в цикле по  $j$  от 0 до  $N - 1$  перебираем все строки матрицы  $B^T$ . Вычислить скалярное произведение векторов - строк  $A_i$  и  $B_j$ , пусть оно равно  $V$ . Если  $V$  отлично от нуля, то добавляем в вектор  $Value$  элемент  $V$ , а в вектор  $Col$  - элемент  $j$ . При окончании цикла по  $j$ , копируем значение  $RowIndex [i + 1]$ , записав туда текущее значение числа ненулевых элементов  $V$ .

**Результаты исследования.** Проведя эксперименты, используя для вычисления матрицы разного порядка и сравнивая время выполнения работы программы на 1 потоке, на 8 потоках и с помощью библиотеки MKL. Результаты эксперимента приведены на рис. 1. и рис. 2.

Проанализировав полученные результаты приходим к выводу, что наша реализация работает медленнее для матриц, порядок которых меньше 20000, а переходя этот порядок идет выигрыш во времени для 8 потоков.

Вычислительные эксперименты проводились с использованием следующих инфраструктур, характеристики которых приведены в табл. 1. и табл. 2

Таблица 1 – Тестовая инфраструктура №1

Процессор	Intel(K) core(TM) i7-3632QM CPU @ 2.20Ghz
Память	8 Gb
Программная среда	Visual Studio Premium 2012
ОС	Windows 8 x64

Результаты работы программы на тестовой инфраструктуре № 1

времени для 8 потоков, за счет оптимизации и минимизации внутренних операций обработки матриц. Подробнее приведенную зависимость, которую можно увидеть на рис. 4.

Проведем вычислительные эксперименты для описанной задачи и сравним полученные результаты на более слабой тестовой инфраструктуре. И проследим в какой степени зависят реализованные методы от инфраструктуры и производительности системы для получения более объективной картины исследований.

Таблица 2 – Тестовая инфраструктура №2

Процессор	Intel® Core™ i5-5250U Processor (3M Cache, up to 2.70 GHz)
Память	4 Gb
Программная среда	Visual Studio Premium 2012
ОС	Windows 8.1 x64

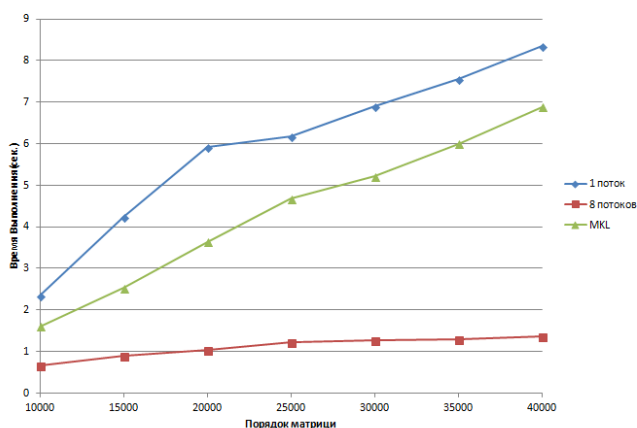


Рис. 5 – Сравнение времени умножения разреженных матриц (инфраструктура №1)

Аналогично проанализировав полученные результаты приходим к выводу, что наша реализация работает медленнее для 8 потоков любого порядка матриц чем реализация в MKL.

На рис. 5. показано решении задачи с помощью разработанных реализаций с использованием разного количества потоков, реализации MKL и последовательной реализации.

Таблица 3 – Результаты работы алгоритма выделения плотных подматриц

Пороги схождения по строкам и столбцам	Число строк	Число столбцов	Плотность
(2,2)	313	481	0.0158
(2,3)	132	90	0.0573
(2,4)	36	24	0.2174
(2,5)	18	6	0.4259
(2,6)	13	3	0.7179
(3,2)	178	481	0.0242
(3,3)	62	90	0.0935
(3,4)	24	24	0.2413
(3,5)	6	6	0.5833
(3,6)	13	3	0.7179

Время, сек

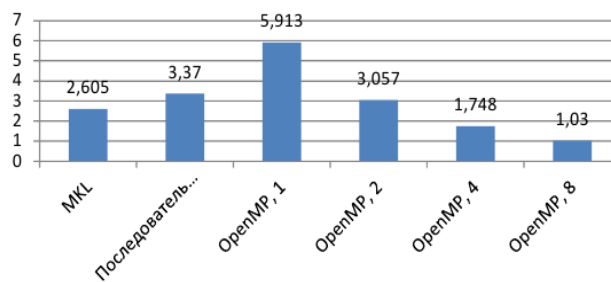


Рис. 6 – Сравнение времени умножения разреженных матриц на основе различного количества потоков реализации MKL и последовательной реализации.

На рис. 6 показано время решения задачи с помощью разработанных реализаций. Во-первых, отметим тот факт, что однопоточная OpenMP-реализация (OpenMP, 1) работает в 1.75 раза медленнее последовательной.

Предположительно такой эффект связан с тем, что компилятор для последовательной версии формирует более оптимальный код. Проверка или опровержение данной гипотезы требует дополнительных исследований, что выходит за рамки лабораторной работы. Во-вторых, OpenMP-реализация имеет не совсем линейную масштабируемость. Параллельная реализация, запущенная в 2 потока (OpenMP, 2), работает примерно в 1.93 раза быстрее однопоточной версии, в 4 потока (OpenMP, 4) – 3.38 раза, в 8 потоков (OpenMP, 8) – 5.74. Одна из возможных причин плохой масштабируемости – это неэффективная работа с памятью, т.к. элементы строки распределены по всей длине, поэтому потоки обращаются к ячейкам массива в произвольном порядке.

Результаты работы алгоритма выделения плотных подматриц.

Протестируйте алгоритм с разными порогами схождения на матрице размера  $9424 \times 31867$ , число ненулевых элементов 11549. результаты приведены в табл. 3.

Как можно видеть, с ростом порога схождения плотность подматрицы максимального размера увеличивается, однако уменьшается её размер рис. 7.



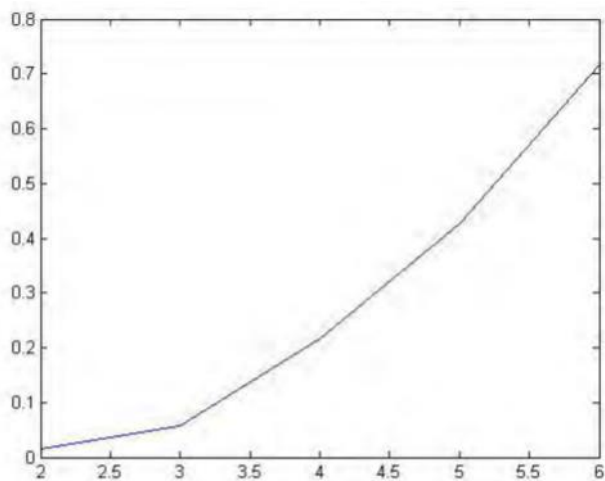


Рис. 7 – Зависимости размеров сгущения с увеличением порога

**Выводы.** При анализе результатов было замечено, что специальные алгоритмы обработки разреженных матриц работают гораздо быстрее их аналоги для обработки обычных (плотных матриц) рис. 1. и рис. 2. чем больше разреженность входных матриц, тем эффективнее работают реализованы алгоритмы. И наоборот, чем более плотная матрица, тем эффективнее будут стандартные алгоритмы ее обработки. В общем случае следует учитывать структуру матрицы перед тем, как использовать тот или иной подход для ее обработки.

Полученные результаты могут быть использованы при решении задач линейной и нелинейной оптимизации, где входными параметрами являются разреженные матрицы. Еще одной из сфер применения является многочисленными реализации методов математической физики, а именно при применении: метода конечных элементов; метода сеток.

#### Список использованной литературы:

1. Писсанецкы, С. Технология разреженных матриц [Текст] / С. Писсанецкы. – Москва: Мир, 1988. – 410 с.
2. Джордж, А. Численное решение больших разреженных систем уравнений [Текст] / А. Джордж, Дж. Лю. – Москва: Мир, 1984. – 333 с.
3. Тьюарсон, Р. Разреженные матрицы [Текст] / Р. Тьюарсон. – Москва: Мир, 1977. – 191 с.
4. Хортон, А. Visual C++ 2010: полный курс [Текст] / А. Хортон. – Диалектика, 2011. – 1216 с.
5. Антонов, А. С. Паралельное программирование с использованием технологии OpenMP [Текст]: учебное пособие / А. С. Антонов. – Москва: МГУ, 2009. – 77 с.
6. Голуб, Дж. Матричные вычисления [Текст] / Дж. Голуб, Ч. Ван Лоун. – Москва: Мир, 1999. – 548 с.
7. Потемкин, В. Г. Справочник по MATLAB [Электронный ресурс] / В. Г. Потемкин. – 164 с. – Режим доступа: [http://ui-engineers.ddns.net/ld/1/143\\_Matlab.pdf](http://ui-engineers.ddns.net/ld/1/143_Matlab.pdf)
8. Касперски, К. Техника оптимизации программ. Эффективное использование памяти [Текст] / К. Касперски. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2003. – 464 с.
9. Хортон, А. Visual C++ 2005: базовый курс [Текст] / А. Хортон. – Вильямс, 2007. – 1152 с.
10. Demmel, J. W. Applied Numerical Linear Algebra [Text] / J. W. Demmel. – SIAM, 1997. – 431 p.
11. Demmel, J. U. C. Applications of Parallel Computers [Electronic resource] / J. U. C. Demmel. – Spring, 2014. – Available at: [https://people.eecs.berkeley.edu/~demmel/cs267\\_Spr14/](https://people.eecs.berkeley.edu/~demmel/cs267_Spr14/)
12. Tewarson, R. P. Sparse Matrices [Text] / R. P. Tewarson. – Academic Press, 1973. – 160 p.
13. Buttari, A. A Class of Parallel Tiled Linear Algebra Algorithms for Multicore Architectures [Text]: technical report / A. Buttari, J., Langou, J., Kurzak, J., Dongarra. – University of Tennessee, 2007. – 191 p.
14. Керниган, Б. Язык программирования С [Текст] / Б. Керниган, Д. Ритчи. – Вильямс, 2009. – 304 с.
15. Гербер, Р. Оптимизация ПО. Сборник рецептов [Текст] / Р. Гербер, А. Бик, К. Смит, К. Тиан. – Санкт Петербург: Питер, 2010. – 352 с.
16. Bik, A. J. C. The Software Vectorization Handbook: Applying Multimedia Extensions for Maximum Performance [Text] / A. J. C. Bik. – Intel Press, 2006. – 236 p.
17. Воронцов, К. В. Математические методы обучения по прецедентам (теория обучения машин) [Электронный ресурс]: курс лекций / К. В. Воронцов. – 141 с. – Режим доступа: [www/URL: http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/Voron-ML-1.pdf](http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/Voron-ML-1.pdf)
18. Дьяконов, А. Г. Анализ данных, обучение по прецедентам, логические игры, системы WEKA, RapidMiner и MatLab [Текст] / А. Г. Дьяконов. – МАКСПресс, 2010. – 278 с.
19. Журавлёв, Ю. И. Избранные научные труды [Текст] / Ю. И. Журавлёв. – Москва: Магистр, 1998. – 420 с.
20. Журавлёв, Ю. И. Корректные алгебры над множествами некорректных (эвристических) алгоритмов [Текст] / Ю. И. Журавлёв // Кибернетика. – 1978. – № 2. – С. 35–43.
21. Рудаков, К. В. Об алгебраической теории универсальных и локальных ограничений для задач классификации [Текст] / К. В. Рудаков // Распознавание, классификация, прогноз. – 1989. – № 1. – С. 176–201.
22. Рудаков, К. В. Полнота и универсальные ограничения в проблеме коррекции эвристических алгоритмов классификации [Текст] / К. В. Рудаков // Кибернетика. – 1987. – № 3. – С. 106–109.
23. Петров, С. О. Дослідження застосування операторів згортки в задачах виділення границь на зображенні [Текст] / С. О. Петров, І. О. Марченко, Б. О. Діброва // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 6/4 (78). – С. 27–31. doi:10.15587/1729-4061.2015.56548

#### Bibliography (transliterated):

1. Pissanetski, S. (1988). Sparse matrix technology. Moscow: Mir, 410.
2. George, A., Liu, J. (1984). Numerical solution of large sparse systems of equations. Moscow: Mir, 333.
3. Tewarson, R. (1977). Sparse matrix. Moscow: Mir, 191.
4. Horton, I. (2011). Visual C++ 2010: full course. Dialektika, 1216.
5. Antonov, A. S. (2009). Paralelne programming using technology OpenMP. Moscow: MGY, 77.
6. Golub, J., Van Loan, C. (1999). Matrix calculations. Moscow: Mir, 548.
7. Potemkin, V. G. Guide to the MATLAB, 164. Available at: [http://ui-engineers.ddns.net/ld/1/143\\_Matlab.pdf](http://ui-engineers.ddns.net/ld/1/143_Matlab.pdf)
8. Kaspersky, K. (2003). Technique optimization programs. Efficient use of memory. Saint Petersburg: BHV-Petersburg, 464.
9. Horton, I. (2007). Visual C++ 2005: full course. Williams, 1152.
10. Demmel, J. W. (1997). Applied Numerical Linear Algebra. SIAM, 431.
11. Demmel J. U.C. (2014). Applications of Parallel Computers. Available at: [https://people.eecs.berkeley.edu/~demmel/cs267\\_Spr14/](https://people.eecs.berkeley.edu/~demmel/cs267_Spr14/)
12. Tewarson, R. P. (1973). Sparse Matrices. Academic Press, 160
13. Buttari, A., Langou, J., Kurzak, J., Dongarra, J. (2007). A Classof Parallel Tiled Linear Algebra Algorithms for Multicore Architectures. University of Tennessee, 191.
14. Kernighan, B., Ritchie, D. (2009). The C Programming Language. Williams, 304.
15. Gerber, R., Bik, A. J. C., Smith, K. B., Tian, X. (2010). The Software Optimization Cookbook. Saint Petersburg: Piter, 352
16. Bik, A. J. C. (2006). The Software Vectorization Handbook: Applying Multimedia Extensions for Maximum Performance. Intel Press, 236.
17. Vorontsov, K. V. Mathematical methods of training on precedents (machine learning theory), 141. Available at: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/Voron-ML-1.pdf>
18. Deacons, A. (2010). The data analysis, training on precedents, logic games, WEKA system, RapidMiner and MatLab. MAKSPress, 278.
19. Zhuravlev, Y. (1998). Selected scientific works. Moscow: Magistr, 420.
20. Zhuravlev, Y. (1978). Correct algebras over sets incorrect (heuristic) algorithms. Cybernetics, 2, 35–43.
21. Rudakov, K. (1989). On the algebraic theory of universal and local constraints for classification problems. Recognition, classification, prognosis, 1, 176–201.



22. Rudakov, K. (1987). Completeness and universal constraints in the problem of correction heuristic algorithms classification. *Cybernetics*, 3, 106–109.
23. Petrov, S. O., Marchenko, I. O., Dibrov, B. O. (2015). The use of convolution operators in the tasks of edge detection. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(4(78)), 27–31. doi:[10.15587/1729-4061.2015.56548](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56548)

Поступила (received) 08.01.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Розробка програмно-математичного забезпечення для паралельної обробки розріджених матриць за допомогою технології OpenMP/ О. В. Мінько, К. Є. Золотько// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.44–49. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Разработка программно-математического обеспечения для параллельной обработки разреженных матриц с помощью технологии OpenMP/ О. В. Минько, К. Е. Золотько// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.44–49. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2079-5459.**

**The development of mathematical software for parallel processing of sparse matrices using OpenMP technology/ O. V. Minko, K. E. Zolotko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P.44–49. – Bibliogr.: 23. – ISSN 2079-5459.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Минько Олег Владимирович** – магістр, кафедра комп'ютерних технологій, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, г. Дніпр, Україна, 49010; e-mail: [minko.oleg@gmail.com](mailto:minko.oleg@gmail.com).

**Золотько Константин Евгеньевич** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра комп'ютерних технологій, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, г. Дніпр, Україна, 49010; e-mail: [zolt66@gmail.com](mailto:zolt66@gmail.com).

**Минько Олег Владимирович** – магістр, кафедра комп'ютерних технологій, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, м. Дніпро, Україна, 49010; e-mail: [minko.oleg@gmail.com](mailto:minko.oleg@gmail.com).

**Золотько Константин Евгеньевич** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра комп'ютерних технологій, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, м. Дніпро, Україна, 49010; e-mail: [zolt66@gmail.com](mailto:zolt66@gmail.com).

**Minko Oleh Volodymyrovych** – master, department of computer technology, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Gagarina, 72, of the Dnipro, Ukraine, 49010; e-mail: [minko.oleg@gmail.com](mailto:minko.oleg@gmail.com).

**Zolotko Konstantin Evgenevich** – Ph.D., Associate Professor, Department of Computer Technologies, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Gagarina, 72, of the Dnipro, Ukraine, 49010; e-mail: [zolt66@gmail.com](mailto:zolt66@gmail.com).

УДК 656.212:681.3

**Н. В. МОСКАЛЕЦ**

**МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ДОСТУПА В СИСТЕМЕ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ**

Розглядаються питання організації просторово-часового доступу в системах мобільного зв'язку на основі адаптивної антенної решітки і алгоритмів просторово-часової обробки з оптимальною процедурою розрахунку вектора вагових коефіцієнтів. Проводиться оцінка ефективності адаптивної антенної решітки за обраним критерієм мінімального середньоквадратичного відхилення. Отримано результати коефіцієнта ступеня зменшення сумарних завдань на виході адаптивної антенної решітки з оптимальними ваговими коефіцієнтами в сталому режимі та незмінній сигнально-завадовій обстановці.

**Ключові слова:** просторово-часовий доступ, адаптивна антенна решітка, вагові коефіцієнти, просторово-часова обробка.

Рассматриваются вопросы организации пространственно-временного доступа в системах мобильной связи на основе адаптивной антенной решетки и алгоритмов пространственно-временной обработки с оптимальной процедурой расчета вектора весовых коэффициентов. Проводится оценка эффективности адаптивной антенной решетки по выбранному критерию минимального среднего квадратического отклонения. Получены результаты коэффициента степени подавления суммарных помех на выходе адаптивной антенной решетки с оптимальными весовыми коэффициентами в установившемся режиме и неизменной сигнально-помеховой обстановке.

**Ключевые слова:** пространственно-временной доступ, антенная решетка, весовые коэффициенты, пространственно-временная обработка.

It is considered the analysis of methods organization space-time multiple access (SDMA) are in mobile communication.

Ability is shown on the Implementation of the given method is based on N-elements adaptive antenna array independently from second used purposing methods, something result attraction extended resource spatial-time parameters.

We studied a method of organizing SDMA for each subscriber station for access to the resources of the base station in a mobile communication system using the group receiving adaptive antenna array (AAA).

The proposed method consists in the formation of the individual distribution structure of the field received on the basis of the optimum evaluation procedure signal weight vector by the criterion of the minimum mean square deviation.

© Н. В. Москалец. 2016

The analysis of the effectiveness of SDMA on the basis of indicators characterizing the degree of suppression of interference and interference immunity for each of the received signals, which are allowed to evaluate the attenuation of useful signal when using space-time processing. The practical significance of the issues developed is derived estimates of the degree of suppression of aggregate interference to the output AAA with optimal weights in the steady state at a constant signal and noise conditions. Research results provide conditions for the development of scientific and technical advice for the implementation of methods of space-time with regard to access mobile communication systems.

**Keywords:** space-time multiple access, adaptive antenna array, coefficients of weights, the space-time processing.

**Введение.** Многопользовательский доступ к общему ресурсу телекоммуникационных систем обеспечивает максимальный количественный охват потребителей информационных услуг. Среди известных различают методы доступа с закрепленными ресурсами и методы представления ресурсов по требованию. Проблемы доступа к общему ресурсу базовой станции беспроводной телекоммуникационной системы реализуются на основе различения сигналов абонентских станций (АС). Для различения этих сигналов используются те или иные физические параметры. К числу таких различительных признаков относятся:

- временные параметры, когда устанавливается соответствующий порядок доступа: многостанционный доступ с временным разделением (МДВР). Наиболее часто используют методы со случайным множественным доступом (СМД), к числу которых относятся методы ALOHA, метод двойной экспоненциальной отсрочки (ВЕВ), древовидные методы и др.;

- частотные параметры, когда сигналы станций доступа различаются по частоте (МДЧР);

- структурные параметры, когда станции доступа используют широкополосные по частоте (ППРЧ) или времени (ШПС) структуры сигналов;

- пространственные или поляризационные параметры, когда сигналы станций доступа различают по их пространственным или поляризационным параметрам: (МДПР). Иными словами: сигналы станций различаются по углу прихода на базовую станцию, по их пеленгу, или по поляризации.

В настоящее время в мобильных системах уже внедрены методы TDMA, FDMA, CDMA. Они используются индивидуально или в различных сочетаниях. Пространственные методы доступа (SDMA) до настоящего времени являются предметом дальнейших исследований. Хотя сами пространственные параметры давно используются в задачах разнесенного приема, MIMO, при построении микро и фемтосот и др.

Наиболее простой, очевидной реализацией метода организации ПВД может быть использование на базовой станции многолучевой антенны, диаграмма направленности (ДН) которой образует веер лепестков. В пределах каждого из лепестков можно осуществлять прием сигналов АС, локализованных в выделенном пространстве, как это проиллюстрировано на рис. 1. Данная схема может быть, реализована, например, с помощью кольцевой антенной решетки (КАР) и соответствующей диаграммо-образующей схемы, например матрицы Батлера.

Такая схема является относительно простой, а соседние лучи (лепестки ДН КАР) достаточно хорошо развязаны между собой. Многолепестковая антенна (МЛА) отлично работает в условиях, когда известны азимуты на корреспондирующие станции, а прием их

сигналов осуществляется в пределах главного максимума выделенного лепестка ДН.

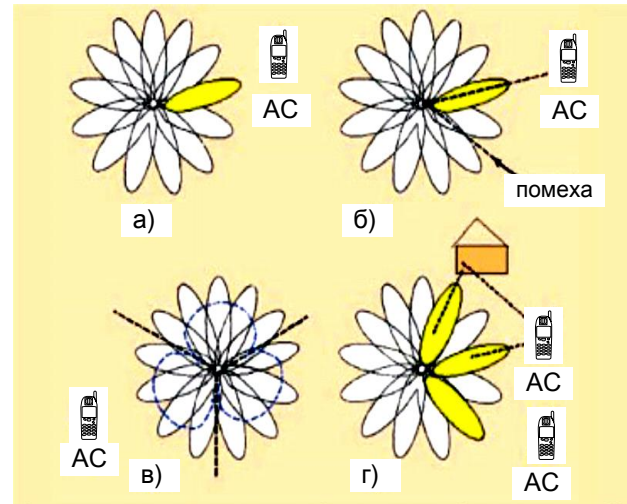


Рис. 1 – Варианты организации МЛА: а – с переключением лепестков; б – с адаптивным формированием ДН; в – с конструкторным формированием ДН; г – многолепестковая ДН с многостанционным приемом

Применение указанной схемы с фиксированными лепестками МЛА для связи с подвижными объектами системы мобильной связи не может считаться конструктивным, поскольку азимут АС часто изменяется и при этом будет происходить потеря связи из-за ухода сигнала АС за пределы максимума данного лепестка ДН. Кроме того, при переходе с одного лепестка на другой необходимо осуществлять соответствующие манипуляции с алгоритмом управления, подобную процедуре роуминга.

Таким образом, схема с фиксированными лепестками ДН МЛА для задач ПВД не подходит, требуется реализация ПВД с учетом динамики азимутальных параметров АС.

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Во многих научных работах предпринималась попытка активного использования пространственных параметров сигналов для решения различных задач в том числе и пространственно-временных методов доступа [1, 2].

В работе [3] предлагается новая концепция кластерной множественного доступа с ортогональным разделением следующих поколений сотовых сетей. Предлагаемая концепция предусматривает использовать совместное кодирование антенны с целью усиления ортогональности SDMA лучей с целью повышения спектральной эффективности сигналов будущих сотовых сетей.

В работе [4] статье представлен краткий отчет о интеллектуальной антенной системе (SA) в контексте адаптивного формирования диаграммы направленно-

сти по критерию минимума среднеквадратического отклонения (LMS). Исследованы характеристики адаптивной антенны в присутствии компонентов многолучевого распространения, и нескольких корреспондентов, а так же возможности применения в сетях когнитивного радио с системой OFDMA

В работе [5] проводится оценка пространственной фильтрации для мобильной связи на основе обработки сигналов массива с алгоритмами оценок направления прихода сигнала (DOA) полученных волн от мобильных пользователей. Рассмотрена линейная антенная решетка на базовой станции, функционирующая в типичной ячеистой сотовой структуре.

Однако многие из посвященных данной тематике работ носили автономный, частный часто не связанный с общесистемными задачами мобильной связи характер.

В данном исследовании мы интегрируем задачи пространственно-временного доступа в общесистемную проблематику, с целью получения положительного эффекта от предлагаемого доступа и существенного роста производительности мобильной сети, экономии радиочастотного спектра, обеспечения высокой помехоустойчивости, электромагнитной совместимости и, соответственно, возможности предоставления качественных услуг потребителям информации.

Задачами проводимого исследования является анализ вариантов организации и возможностей построения системы пространственно-временного доступа совместно с адаптивной пространственно-временной обработкой принимаемых антенной решеткой (АР) сигналов применительно к системам мобильной связи и оценка её эффективности.

**Концептуальные основы организации пространственно-временного доступа.** То или иное свойство ААР достигается соответствующим выбором комплексных весовых коэффициентов (ВК)  $w_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , включенных на выходе приемных антенных элементов (АЭ) и перед общим сумматором (рис. 2).

С помощью адаптивного процессора ВК обеспечивают соответствующее формирование суммарной ДН и поляризационной диаграммы, т.е. ВК вместе с общим сумматором представляют собой диаграммообразующую схему.

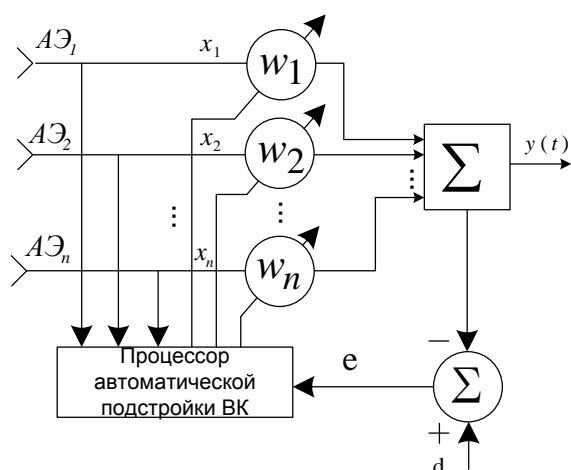


Рис. 2 – Включение ВБК в ААР

В то же время определение назначения ВК можно интерпретировать как задачу формирования таких соотношений между принимаемыми  $N$ -реализациями полезного сигнала  $S_i(t)$   $N$ -антенных элементах, суммой  $j$  узкополосных анизотропных помех  $\sum_{j=1}^j n_j(t)$  и шумом  $v(t)$ , которые после сложения на общем сумматоре позволяют обеспечить желаемое свойство обеспечить максимум отношения сигнал/(помеха+шум), минимум среднеквадратического отклонения принятого сигнала от заданного или другой критерий:

$$y(t) = \sum_{i=1}^N w_i x_i(t) \quad (1)$$

где

$$x_i(t) = s(t) + \sum_{j=1}^j n_{ij}(t) + v_i(t) \quad (2)$$

С помощью ВК формируются их векторы (ВБК):

$$W^T(t) = (w_1(t), w_2(t), \dots, w_N(t)) \quad (3)$$

В общем случае ВБК  $W(t)$  должен обладать возможностью изменять как амплитуды, так и фазы принимаемых сигналов, т.е. он должен быть комплексным. Скорость этих изменений должна быть согласована со скоростью изменения сигнально-помеховой ситуации, а диапазон согласовывается с динамическим диапазоном изменений уровней сигналов и помех, а также фазовых соотношений в различных элементах адаптивной антенной решетки (ААР). Очевидно, идеальной является ситуация, когда скорость изменений ВБК бесконечно велика, а динамический диапазон изменений амплитудно-фазовых характеристик неограничен. Однако на практике исходя из возможностей технической реализуемости и других причин приходится ограничивать эти характеристики, что, вообще говоря, приводит к соответствующему снижению эффективности ААР. В этом смысле говорят об ААР с ограничениями.

В отличие от других проблем антенной техники, где конечным результатом решаемых задач является синтез ДН при различных ограничениях на конструкцию, габариты, спектральный состав сигналов и помех и другие параметры конечная цель использования ААР состоит в том, чтобы обеспечить необходимые качественные характеристики (максимизировать их) полезных сигналов на выходе антенны, т.е. получить выходное соотношение:

$$y(t) = y(w_i, t) = (w(t), x^*(t)) = W^T(t) x^*(t) = w_1(t)x_1(t) + w_2(t)x_2(t) + \dots + w_N(t)x_N(t) \quad (3)$$

где выражение в скобках обозначает скалярное произведение векторов, удовлетворяющее заранее вы-

бранному критерию; звездой обозначает комплексное сопряжение. При этом суммарная ДН ААР, как таковая, может вообще не рассматриваться, хотя как промежуточная характеристика она безусловно представляет интерес. Так, ДН ААР может быть получена с помощью скалярного произведения ВВК  $W(t)$  на вектор  $f(\theta)$ :

$$F(\theta) = (W^T(t), f^*(\theta)), \quad (4)$$

где  $f^T(\theta) = (f_1(\theta), f_2(\theta)e^{i\phi_{01}}, \dots, f_N(\theta)e^{i\phi_{N0}})$ ;

$f_i(\theta)$  – ненормированные ДН приемных элементов ААР;

$\phi_{i01}$  – фазы огибающей волны единичной амплитуды, отсчитываемые от фазы сигнала с выхода 1-го элемента (при  $\phi_{i01} = 0$ ), зафиксированные на выходах приемных элементов за счет пространственных различий [6].

Важным свойством ААР является инвариантность некоторых критериев функционирования по отношению к суммарной ДН. Это имеет большое практическое значение, связанное с возможностью произвольного, в том числе и случайного, расположения антенных элементов. При этом отпадает необходимость применения жестких креплений, сокращается время развертывания и т.д.

В ААР число антенных элементов  $N$  может быть минимальным (например,  $N \geq 2$ ) и выбирается исходя из ожидаемого количества воздействующих помех. Значение  $N$  в ААР рассматривается как число степеней свободы, поскольку именно оно определяет количество независимых формируемых нулей ДН, т.е. количество помех, которое способна подавить ААР с одним выходом, составляет  $J \leq N - 1$ .

Вместе с тем АЭ могут быть многократно использованы и на каждом из них может быть подавлено  $N-1$  помех. Следует, однако, указать на то, что при этом кратно падает уровень принимаемого сигнала и отношение сигнал/шум.

Задачу подавления помех в ААР можно решать по-разному. Так, используя принцип разделения [7] можно сначала оценить  $\theta_j$ , ( $j = \overline{1, J}$ ) – направление прихода этих помех и их поляризацию, а затем решить задачу управления ВВК ААР и нахождения ее ДН и ПД с нулями, ориентированными в направлении прихода помех. Однако решение этой задачи достаточно сложно, связано с обращением матриц и это решение [8] удается найти далеко не для всякой ситуации. На практике применяется более конструктивное решение, основывающееся не на декомпозиции, а на непосредственном нахождении оценки ВВК  $\hat{W}(t)$ . В настоящее время известно несколько решений, различающихся: как выбранными критериями эффективности, так и предполагаемыми ограничениями. К наиболее распространенным критериям относятся:

– максимум отношения уровней полезного сигнала к сумме помех (МОСП) на выходе ААР;

– минимум среднего квадрата отклонения (МСКО) принятого сигнала от заданного эталонного  $y_3(t)$  на выходе ААР;

– минимум мощности помех на выходе ААР (МВМ);

– максимум правдоподобия;

– различные другие модификации критериев.

Синтезируемые при этом алгоритмы функционирования ААР получаются из решения статистических задач. Среди всего многообразия решений можно выделить два основных направления, исторически первыми появились. Асимптотические решения, связанные с именами Ширмана, Хоуэлса, Эпплбаума, Уидроу и др., предполагают наличие гипотезы эргодичности сигнально-помеховой ситуации. Эти решения в большинстве своем основываются на нахождении оценки корреляционной матрицы (или ее обращения), характеризующей сигнально-помеховую ситуацию или других, например градиентных, процедурах в указанных рамках. В литературе по настоящее время основное внимание уделяется развитию именно этого направления [3].

Другое направление основано на предположении Марковской аппроксимации принимаемой реализации и динамике изменений ВВК. Отказ от эргодичности позволяет эффективно решать нестационарные задачи с использованием хорошо разработанного аппарата рекуррентной линейной или нелинейной фильтрации. С использованием этого подхода получено ряд результатов по пространственно-временной и поляризационно-временной обработке [9, 10].

Метод организации ПВД с использованием синтезируемой ДН многоэлементной антенны. Вопросы синтеза ДН достаточно хорошо представлены в классических работах [6]. Для  $N$  – элементной АР и межэлементных расстояний равных  $d/\lambda$  может быть синтезирована ДН имеющая вид

$$E(\beta) = \frac{\sin[Nn(d/\lambda)\sin\beta]}{N \sin[n(d/\lambda)\sin\beta]}. \quad (5)$$

При такой ДН, при направлении прихода сигнала по нормали к плоскости АР ширина главного лепестка  $\beta$  зависит от параметров АР ( $\beta_{\text{рад}} = 0,886/(Nd/\lambda)$ ;  $\beta_{\text{град}} = 50,8/(Nd/\lambda)$ ) и диапазона частот. На рис. 3 представлена структура алгоритма ПВД с синтезом многолучевой ДН.

Среди известных методов синтеза существуют методы ориентированные на получение необходимого АФР по элементам АР, методы фазового распределения и амплитудного распределения. Известны алгоритмы синтеза ДН: парциальных диаграмм, собственных функций, интеграла Фурье, эвристические и др. [6].

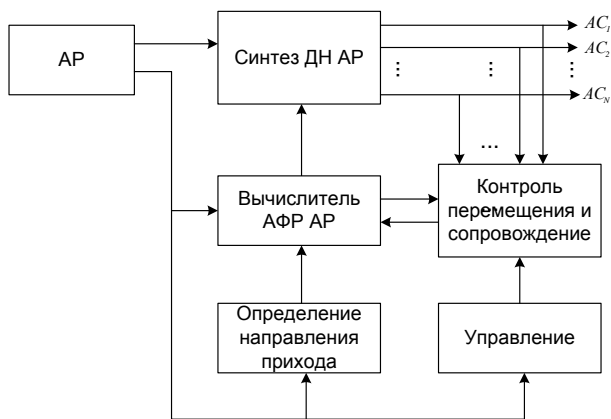


Рис. 3 – Структура алгоритма ПВД с синтезом многолучевой ДН

Достоинствами методов ПВД с синтезом ДН являются хорошо отработанные известные методики синтеза и высокая точность с ориентацией на статические сигнально-помеховые ситуации.

Недостатками методов ПВД:

- 1) большая вычислительная сложность, приводящая к временным и алгоритмическим затратам;
- 2) трудность использования метода в условиях динамической СПО, связанная с перемещением АС, а также при наличии значительной многолучевости;
- 3) критерии функционирования ориентированные на промежуточный результат;
- 4) проигрыш в отношении сигнал/помеха+шум (ОСПШ) при приеме по максимуму главного лепестка (ГЛ);
- 5) синтез ДН для  $N$ - направлений представляет собой различные алгоритмы каждый из которых решает свою задачу;
- 6) получение целостного выигрыша для  $N$  абонентов проблематично;
- 7) принятый в задачах синтеза ДН детерминированный подход приводят к заметным потерям при наличии случайной пространственно-поляризационной компоненты сигналов и помех.

Наличие данных недостатков не дает основание рекомендовать данный метод синтеза ДН при решении задач ПВД.

Метод ПВД с использованием адаптивных методов с пространственно-временной обработкой сигналов. Обнаружение и оценка многомерных сигналов, требует исчерпывающей априорной информации о пространственных и временных характеристиках сигналов, шума и помех. Однако фактически имеются сведения лишь о некоторых из этих характеристик, и поэтому недостающая информация должна быть получена в процессе функционирования системы. Широкое использование для этой цели методов адаптации привело к созданию систем адаптивной пространственно-временной обработкой сигналов (ПВОС), при синтезе которых применяется весь арсенал адаптивных методов: расширение числа оцениваемых параметров, использование итеративных процедур, эмпирических оценок и др. [11, 12].

Реализация сопоставления произвольно искаженного сигнала с произвольными характеристиками АР осуществимо только статистически за счет ис-

пользования матричного взвешивания входных данных, адаптирующегося к характеристикам принятого сигнала [13]. Это принято называть статистически оптимальным формированием ДН, где выбор весовых векторов базируется на статистике принятого сигнала на фоне действующего шума и помех. Весовые коэффициенты выбираются с целью оптимизации отклика формирователя ДН таким образом, чтобы выход решетки содержал минимальные шумовые составляющие и сигналы, поступающие с направлений, отличных от направления на источник полезного сигнала [14].

На рис. 4 представлена структурная схема оптимального алгоритма приема  $i$ -й АС с оценкой вектора ВВК.

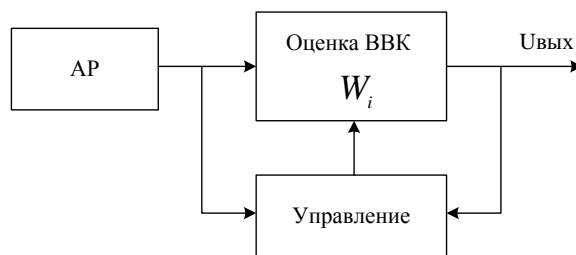


Рис. 4 – Структурная схема оптимального приема  $i$ -го сигнала АС

Для обеспечения ПВД при азимутальных перемещениях АС может быть предложена многолучевая антенная решетка (МЛАР) ДН, которой корректируется в соответствии с динамикой пространственных изменений принимаемых сигналов АС. В данном случае реализуется групповая ПВОС с большим объемом вычислений с ограничением на качество приема для решения электродинамической задачи (рис. 5).

Достоинство:

1. Нахождение группового решения одновременно для  $N$ -абонентских станций в одном алгоритме является более прямым, коротким, чем сумма решений по каждому вызывному сигналу  $N$  АС. Этому подтверждением является неравенство треугольника (неравенство Коши-Буняковского:  $\|x\| \times \|y\| \geq |x, y|$ ).

**2. Минимальное время сходимости к установившемуся режиму.** Недостатком является высокое требование к вычислителю.

Конструктивным представляется метод основанный на организации индивидуального ПВД для каждого приема конкретной АС, при этом сигналы остальных АС следует рассматривать как мешающие. Таким образом, организуется одновременно  $N$  независимых каналов ПВОС соответствующих числу сигналов принимаемых АС, каждая из которых оптимизирована под конкретный сигнал АС. Для каждого конкретного абонента организовывается отдельный алгоритм ПВД.

Данный метод пространственно-временной обработки предполагает нахождение индивидуальной оценки вектора весовых коэффициентов (ВВК)  $W_i$  ориентированного для каждого  $i$ -го корреспондента. Алгоритм оценки  $W_i$ ,  $i = \overline{1, N}$  реализуется в виде  $i$ -параллельных процедур, выполненных на время сеанса связи с  $i$ -й АС (рис. 6)



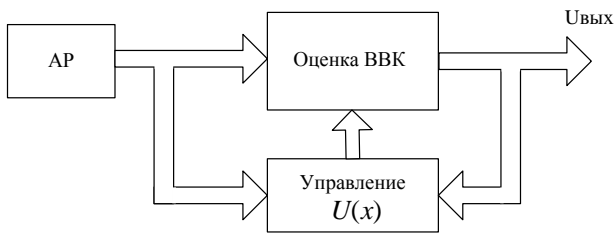


Рис. 5 – Структурная схема ПВД при оптимальной групповой обработке  $N$ -сигналов АС

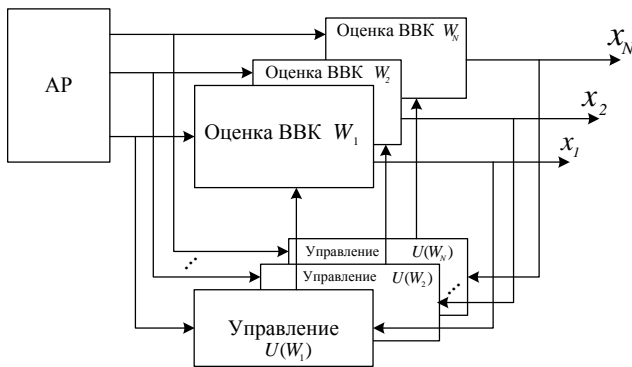


Рис. 6 – Структурная схема ПВД при оптимальном приёме  $N$ -сигналов АС с ПВД с нахождением индивидуальных значений оценки ВВК  $i$ -го сигнала АС

При таком методе ПВОС все сигналы других АС работающие в данном частотном канале представляют собой помехи для приема сигналов данной конкретной АС, обрабатываемой соответствующим ВВК  $W_i$  (рис. 7).

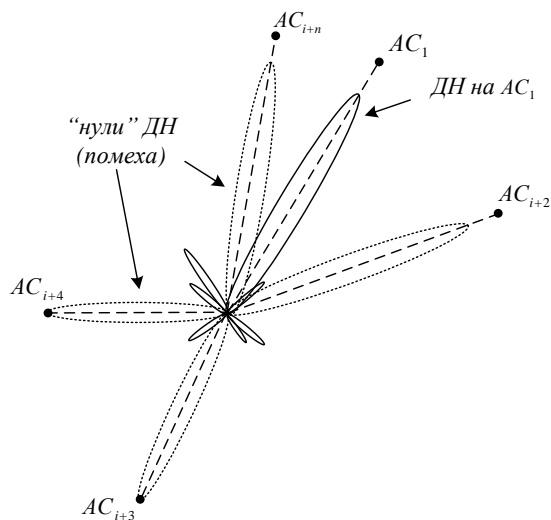


Рис. 7 – Вариант распределения уровней приема ААР при обработке принимаемых сигналов от АС

Достоинства методов ПВД с использованием индивидуальной оценки ВВК являются:  
 оптимальность алгоритма;  
 цельность алгоритма управления ВВК без необходимости получения промежуточных значений ДН и др.;  
 возможность согласованности с динамикой сигнально-помеховых ситуаций;

критерий эффективности ориентированные на качество приема сигналов, а не на значение ДН;  
 нахождение группового решения для  $N$  АС в едином алгоритме;  
 минимальное время сходимости в установившемся режиме состоящее из 2–6 итераций.

Недостатки:

- 1) одиночный алгоритм, ориентированный для приема одной АС;
- 2) возможность неустойчивой работы при плохой обусловленности матрицы и в целом задачи.

Критерии эффективности пространственно-временной обработки сигналов. Наиболее популярным при решении различных задач радиосвязи, радиолокации и др. является критерий минимума среднеквадратического отклонения (МСКО) предложенный Уидроу [15]. Его популярность объясняется не только тем, что синтезированные на базе МСКО алгоритмы имеют достаточно простую структуру, но и тем, что полученные решения хорошо вписываются в общие критерии, по которым функционируют мобильные телекоммуникационные системы. Другой важный критерий минимума вероятности ошибки  $\min p_{ou}$  функционально связан с энергетическим соотношением сигнала и помехи. Для простейших ситуаций качество приема зависит от отношения сигнал/шум  $p_{ou} = \phi(h^2)$ , где  $h^2 = P_c/P_{u}$ . В данном случае важным является тот факт, что при использовании МСКО остаточные результирующие помехи, после ПВОС, носят характер обновляющего процесса и могут быть аппроксимированы процессом типа «белого» шума. ПВОС – алгоритм функционирующий по критерию МСКО основывается на получении невязки  $v(t)$ . Самым простым решением может служить процедура сравнения принятой после взвешивания реализации  $W^T(t)X(t)$  с эталонным сигналом  $y_3$ :

$$v(t) = W^T X(t) - y_3(t) \tag{6}$$

Найдем последовательно квадрат этой невязки и ее математическое ожидание:

$$v^2(t) = W^T X(t) X^T(t) W(t) - 2y_3 W^T(t) X(t) + y_3^2 \tag{7}$$

$$M[v^2(t)] = W^T(t) R_{xx} W(t) - 2W^T(t) r_{xy} + \overline{y_3^2(t)} \tag{8}$$

где  $r_{xy}$  – вектор ковариации между вектором принятых сигналов и желаемым эталонным сигналом,

$$r_{xy} = (x_1(t)y_3(t); x_2(t)y_3(t); \dots; x_N(t)y_3(t)) \tag{9}$$

где  $R_{xx}$  – корреляционная матрица сигналов, принятых ААР,  $R_{xx} = \overline{X(t)X^T(t)}$ .

Найдем минимум невязки из выражения (7). В данном случае он будет единственным, поскольку

функція (7) является квадратичной относительно  $W(t)$ , а матрица  $R_{xx}$  – положительно определена. Приравнявая градиент (7) к нулю, найдем минимальное ее значение;

$$dv^2/dW(t) = \nabla \omega(\overline{v^2(t)}) = 2R_{xx}W(t) - 2r_{xy} = 0 \quad (10)$$

$$\hat{W}_{opt} = R_{xx}^{-1}r_{xy} \quad (11)$$

Выражение (11) является решением векторно-матричного уравнения Винера – Хопфа. При этом оптимальная ДН ААР может быть вычислена с помощью выражения (4).

Уравнение (11) можно представить и в другом виде, если положить, что эталонный сигнал  $\overline{y}_3 = S(t)$ . Тогда из (3) получим

$$\hat{W}_{opt}(t) = sR_{xx}^{-1}V \quad (13)$$

где

$V^T = (1, e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_{N-1}})$  – вектор фазовых набегов, отсчитываемых от 1-го элемента ААР, входящий в выражение (4).

С учетом равенства

$$r_{xy} = E\{x(t)y_3(t)\} = sV(t) \text{ получим}$$

$$\hat{W}_{opt}(t) = sR_{xx}^{-1}V(t) \quad (14)$$

С помощью данного критерия могут быть разработаны процедуры, имеющие рекуррентную форму, в частности процедуры стохастической аппроксимации, линейной или нелинейной фильтрации, процедуры

Калмана-Бьюси, в том числе методы рекуррентного обращения корреляционной матрицы.

Анализ эффективности ААР, выполненных по критерию МСКО. Для практических целей большой интерес представляет анализ степени подавления суммарных помех на выходе ААР с оптимальными весовыми коэффициентами в установившемся режиме при неизменной сигнально-помеховой обстановке.

Такая ситуация типична для случая приема полезных сигналов  $i$ -й АС при наличии мешающих воздействий от других АС. Поэтому анализ эффективности ААР проведем путем сравнения соответствующих соотношений сигнал/(помеха + шум) на входе и выходе решетки. Для анализа выберем линейный алгоритм ААР с оценкой ВВК по формуле (11).

Анализ эффективности ПВОС будем проводить по следующим двум показателям:

$$\eta_0(t) = \frac{W^T(t)R_{ss}W(t)/W^T(t)R_{rr}W(t)}{W^T(0)R_{ss}W(0)/W^T(0)R_{rr}W(0)} \quad (15)$$

$$\eta_i(t) = \frac{W^T(t)R_{ss}^{(i)}W(t)/W^T(t)R_{rs}^{(i)}W(t)}{W^T(0)R_{ss}^{(i)}W(0)/W^T(0)R_{rs}^{(i)}W(0)} \quad (16)$$

где  $W(t)$  – значение ВВК после адаптации;

$W(0)$  – значение ВВК до адаптации;

$R_{ss} = E\{S_n(t)S_n^T(t)\}$  – КМ – сигналов;

$S_n(t) = [S_{n1}(t), S_{n2}(t), \dots, S_{nL}(t)]$  – суммарный вектор напряжений сигналов на выходе элементов ААР;

$R_{ss}^{(i)} = E\{S^{(i)}(t)S^{(i)T}(t)\}$  КМ  $i$ -го сигнала;

$R_{rs}^{(i)} = E\{[P(t) + S^{(-i)}(t)][P(t) + S^{(-i)}(t)]^T\}$  – КМ

помех и всех сигналов кроме  $i$ -го;  $i = \overline{1, I_c}$ .

Показатель (15) является общепринятым при анализе эффективности ПВОС [10, 11] и характеризует степень подавления помех (коэффициент помехозащиты) при использовании методов ПВОС. Показатель (16) характеризует, коэффициент помехозащиты для каждого из сигналов и позволяет оценить ослабление полезных сигналов при применении ПВОС.

Рассмотрим вначале значения показателей эффективности из выражений (15), (16) при воздействии одной ( $J = 1$ ) сосредоточенной узкополосной помехи  $n(t)$  и шума  $v(t)$ . Численные значения коэффициентов  $\eta_0(t)$  и  $\eta(t)$  получим для различных уровней сигналов и помех, а также углов прихода вводной плоскости  $X$ . Очевидно, для плоскости  $Y$  результаты будут аналогичны. Направление прихода сигнала выберем  $\theta_s = 0$ .

На рис. 8-10 представлены графики зависимостей коэффициентов  $\eta_0(t)$  и  $\eta(t)$  от значения разницы угла направлений прихода сигнала и помехи  $\Delta\theta^0$  для различного числа антенных элементов  $N$ . Из анализа зависимостей можно видеть, что с увеличением числа  $N$  значения коэффициентов  $\eta_0(t)$  и  $\eta(t)$  существенно возрастают.

При этом теоретически могут быть получены значительные превышения уровней подавления помех по отношению к сигналу при различных направлениях их прихода  $\theta_n$  и  $\theta_s$ , достигающие 50 дБ и более (рис. 8). Однако при любом числе  $N$  характерно снижение всех выбранных коэффициентов эффективности с приближением направления прихода помехи  $\theta_n$  к сигналу  $\theta_s$  (при  $(\theta_n - \theta_s) \rightarrow 0$ ), что можно интерпретировать как «ослепление» ААР. С увеличением уровня помех по сравнению с шумом  $P_n/P_u = 10$  дБ и  $P_n/P_u = 100$  (рис. 9) показатель  $\eta(t)$  растет, что объясняется точностью оценки значений  $\hat{W}_i(t)$ .

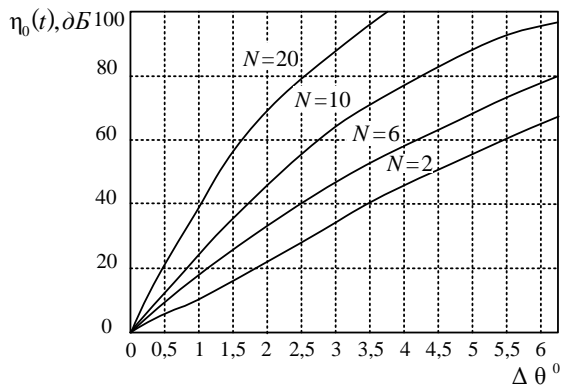


Рис. 8 – Графики зависимостей коэффициента подавления помех  $\eta_0(t)$  от значения различия угла прихода сигнала и помехи  $\Delta\theta$

В данном случае обработка способствует уменьшению относительного уровня помехи на выходе ААР, хотя абсолютное значение ее, являющееся одним из компонентов шума наблюдения  $V_n$ , увеличивается за счет роста дисперсии ошибки оценки  $K_{ij}(t)$  (рис. 9)

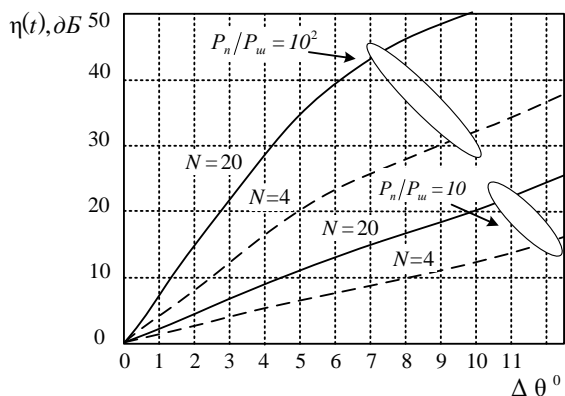


Рис. 9 – Графики зависимостей коэффициента помехозащиты  $\eta(t)$  от значения различия угла прихода сигнала и помехи  $\Delta\theta$

На рис. 10 представлены графики  $\eta(t)$  для случая воздействия двух помех  $n^{(1)}(t)$  и  $n^{(2)}(t)$  в зависимости от изменения нававления прихода одной из них при фиксированном направлении другой ( $\theta_s = 5^\circ$ ). Графики, приведенные на рис. 10, отличаются от изображенных на рис. 9, тем, что при совпадении направлений прихода помех ( $\theta_1 = \theta_2 = 5^\circ$ ) отмечается увеличение эффективности ААР на 10-15 дБ. В данном случае воздействие нескольких помех, приходящих с одного и того же направления, воспринимается как воздействие одной помехи с суммарной мощностью  $P_{n\Sigma} = P_{n1} + P_{n2}$ . То есть воздействие нескольких помех, приходящих с различных направлений ( $\theta_{n1} \neq \theta_{n2}$ ), приводит к большим потерям по сравнению со случаем воздействия одной помехи суммарной мощности.

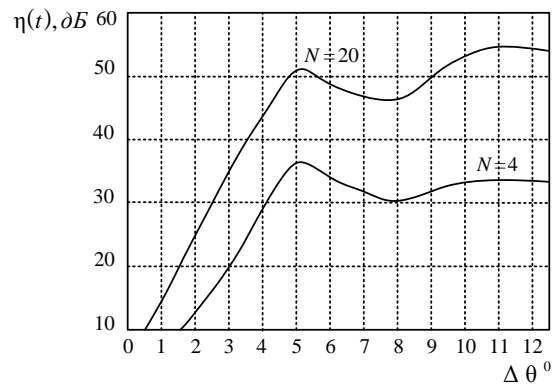


Рис. 10 – Графики зависимостей коэффициента помехозащиты  $\eta_0(t)$  от значения различия угла прихода сигнала и помехи  $\Delta\theta$

Численные значения коэффициентов (11), (15) и (16) получены без учета технологических погрешностей антенных систем, конечной развязки между антенными элементами ААР и других ограничений, встречающихся на практике. Все эти ограничения соответствующим образом снижают эффективность ААР. Поэтому значения приведенных показателей можно рассматривать как потенциально возможные.

### Выводы

1. Пространственно временной доступ в системах мобильной связи может быть реализован на существующей технической и технологической базе независимо от других используемых методов, что является результатом привлечения дополнительного ресурсного множества пространственно-временных параметров. Методы пространственно-временного доступа АС к ресурсам базовой станции (БС) основываются на использовании алгоритмов пространственно-временной обработки принимаемых сигналов, реализуемых на основе  $N$ -элементных адаптивных антенных решетках.

2. Проведен обзор наиболее популярных методов синтеза ААР, различающихся как назначением, так и критериями эффективности функционирования ААР. В основе всех методов положена оценка комплексного вектора весовых коэффициентов, включенных на выходе АЭ антенной решетки, включаемых в трактах приема каждого АЭ и управляемых по алгоритмам МСКО, МВМ, МОСП.

3. Суть задачи ПВД каждой из АС к ресурсам БС состоит в групповом использовании приемной антенной решетки, при котором для каждой из АС формируется индивидуальное распределение структуры принимаемого поля сигнала с помощью выбора ВВК  $W_i$ . Таким образом, одновременно формируется столько вариантов распределений, сколько на данный момент принимается сигналов АС. Каждое из этих распределений обеспечивает максимально удачное соотношение сигнал/помеха+шум для сигнала принимаемой АС и установления нулевых уровней приема для прочих АС.

4. Анализ качества ПВД проведен по критериям уровней подавления прочих излучений при приеме

сигнала АС. Из графиков следует, что эти уровни теоретически могут достигать значительных величин: 40-60 дБ и более. Реальные уровни очевидно следует ожидать на уровне теплового шума, т.е. на уровне 20-27 дБ.

5. Анализ эффективности задач ПВД и ПВОС показывает, что при близких по азимуту приема АС или при совпадении этих азимутов возникает эффект “ослепления” ААР. Данный эффект может быть преодолен различными методами, к числу которых относятся пространственно-поляризационные методы, процедурами случайного конкурентного доступа: АЛОНА, ВЕВ, древовидными алгоритмами и др. Качество обработки возрастает пропорционально числу АЭ. При реализации АР на БС для ПВД число АЭ следует выбирать от 20 единиц.

#### Список литературы:

1. Стрелковская, И. В. Сплэйн-аппроксимация диаграммы направленности антенны базовой станции сотовой сети [Текст] / И. В. Стрелковская, Э. А. Сукачѳ, А. О. Макоганюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Том 2. – № 2(50). – С. 4–8. Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/1723/1620>
2. Хлапонин, Ю. И. Формирование диаграммы направленности антенных систем технологии ММО сети LTE [Текст] / Ю.И. Хлапонин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Информационно-управляющие системы. – 2015. – Том 1. – № 9(73). – С. 23–26. doi:10.15587/1729-4061.2015.37375
3. Shree, K. Sh. Multiple Access Techniques for Next Generation Wireless: Recent Advances and Future Perspectives [Text] / K. Sh. Shree, M. Patwary, S. Chatzinotas // EAI Endorsed Transactions on Wireless Spectrum. – 2016. – № 2(7). – P. 151002. doi:10.4108/eai.19-1-2016.151002
4. Rupal, S. Performance Analysis of LMS Adaptive Beamforming Algorithm [Text] / S. Rupal, Mr. R. Mohan, Mr. S. Sharma // International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering. – 2013. – Vol. 4(5). – P. 1377–1381.
5. Prasanna kumar, A. M. Performance Analysis of Adaptive DOA Estimation Algorithms For Mobile Applications [Text] / A. M. Prasanna kumar, Dr. K. Ramesha // International Journal of Engineering Research and Applications. – 2015. – Vol. 5(7). – P. 68–73.
6. Марков, Г. Т. Антенны [Текст]: Учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: «Энергия», 1975. – 528 с.
7. Поповський, В. В. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем [Текст] / В. В. Поповський, С. О. Сабурова, Ю. Ю. Коляденко та ін. / За загальною редакцією В. В. Поповського. Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.
8. Popovskij, V. Control and adaptation in telecommunication system: Mathematical foundations [Text] / V. Popovskij, A. Barkalov, L. Titarenko. USA: Springer Science & Business Media, 2011. – Vol. 94. doi:10.1007/978-3-642-20614-6
9. Родимов, А. П. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех [Текст] / А. П. Родимов, В. В. Поповский. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
10. Марчук, Л. А. Пространственно-временная обработка сигналов в линиях радиосвязи [Текст] / Л. А. Марчук. Л.: ВАС, 1991. – 136 с.
11. Монзинго, Р. А. Адаптивные антенные решетки. Введен в теорию [Текст] / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер. М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
12. Кремера, И. Я. Пространственно-временная обработка сигналов [Текст] / Под ред. И. Я. Кремера. М.: Радио и связь. – 1984. – 224 с.
13. Баланис, К. А. Введение в смарт-антенны [Текст] / К. А. Баланис, П. И. Иоанидес. Москва: Техносфера, 2012. – 201 с.
14. Поповский, В. В. Математические основы управления и адаптации в телекоммуникационных системах [Текст]: учебник / В. В. Поповский, В. Ф. Олейник. Харьков: СМІТ, 2011. – 362 с.
15. Уидроу, Б. Адаптивная обработка сигналов [Текст] / Б. Уидроу, С. Стирнз. М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Strelkovskaja, I. V., Sukachjov, Je. A., Makoganjuk, A. O. (2011). Splajn-approssimacija diagrammy napravlenosti anteny bazovoj stancii sotovoj seti. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2/2(50), 4–8. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/1723/1620>
2. Khlaponyn, Yu. Y. (2015). Formirovanye dyahrammy napravlenosti an-tennykh system tekhnolohyy MIMO sety LTE. East-ern-European Journal of Enterprise Technologies, 1/9 (73), 23–26. doi:10.15587/1729-4061.2015.37375
3. Sharma, S. K., Patwary, M., Chatzinotas, S. (2016). Multiple Access Techniques for Next Generation Wireless: Recent Advances and Future Perspectives. EAI Endorsed Transactions on Wireless Spectrum, 2(7), 151002. doi:10.4108/eai.19-1-2016.151002
4. Rupal, S. Mr. Mohan, R., Mr. Sharma, S. (2013). Performance Analysis of LMS Adaptive Beamforming Algorithm. International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering, 4(5), 1377–1381.
5. Prasanna kumar, A. M., Dr. Ramesha, K. (2015). Performance Analysis of Adaptive DOA Estimation Algorithms For Mobile Applications. International Journal of Engineering Research and Applications, 5(7), 68–73.
6. Markov, G. T., Sazonov, D. M. (1975). Antenny. Moscow: «Энергия», 528.
7. Popovs'kyj, V. V., Saburova, S. O., Kolyadenko, Yu. Yu., et al. Eds. Popovs'kyj, V. V. (2006). Matematy'chni osnovy` teoriyi telekomunikacijny`h sy'stem. Kharkiv: TOV «Kompaniya SMIT», 564.
8. Popovskij, V., Barkalov, A., Titarenko, L. (2011). Control and Adaptation in Telecommunication Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer Science & Business Media, 94. doi:10.1007/978-3-642-20614-6
9. Rodimov, A. P., Popovskij, V. V. (1984). Statisticheskaja teorija poljarizacionno-vremennoj obrabotki signalov i pomeh. Moscow: Radio i svjaz', 272.
10. Marchuk, L. A. (1991). Prostranstvenno-vremennaja obrabotka signalov v liniyah radiosvjazi. Leningrad: VAS, 136.
11. Monzingo, R. A., Miller, T. U. (1986). Adaptivnye antennye reshetki. Vveden v teoriju. Moscow: Radio i svjaz', 448.
12. Eds. Kremera, I. Ja. (1984). Prostranstvenno-vremennaja obrabotka signalov. Moscow: Radio i svjaz', 224.
13. Balanis, K. A., Ioanides, P. I. (2012). Vvedenie v smart-antenny. Moscow: Tehnosfera, 201.
14. Popovskij, V. V., Olejnik, V. F. (2011). Matematicheskie osnovy upravlenija i adaptacii v telekommunikacionnyh sistemah. Khar-kov: SMIT, 362.
15. Uidrou, B., Stirnz, S. (1989). Adaptivnaja obrabotka signalov. Moscow: Radio i svjaz', 440.

Поступила (received) 14.01.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Методи організації просторово-часового багатостанційного доступу в системі мобільного зв'язку/ М. В. Москалець**// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.49–58. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-5459.

**Методи організації просторово-часового множинного доступу в системі мобільної зв'язи/ Н. В. Москалец// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.49–58. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-5459.**

**The methods of spatial-time multiple access in mobile communication system/ M. V. Moskalets// Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P.49–58. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-5459.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Москалец Микола Вадимович** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри телекомунікаційних систем, пр. Науки, 14, м Харків, Україна, 61166; е-пошта: [mykola.moskalets@nure.ua](mailto:mykola.moskalets@nure.ua).

**Москалец Николай Вадимович** – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры телекоммуникационных систем, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: [mykola.moskalets@nure.ua](mailto:mykola.moskalets@nure.ua).

**Moskalets Mykola Vadymovych** – candidate of technical sciences, associate professor, Kharkov National University of Radioelectronics, associate professor of the department of telecommunication systems, avenue of Science, 14, Kharkov, Ukraine, 61166; e-mail: [mykola.moskalets@nure.ua](mailto:mykola.moskalets@nure.ua).

УДК 005.8:902.034

**А. В. НАДТОЧИЙ**

## МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ В ПРОЕКТАХ ГЛИБОКОВОДНИХ АРХЕОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗАСОБІВ МОРСЬКОЇ РОБОТОТЕХНІКИ

Виконано аналіз існуючих моделей управління ризиками при проведенні глибоководних досліджень з використанням ненаселених підводних апаратів. На підставі виконаних досліджень розроблені моделі управління ризиками в проектах глибоководних археологічних досліджень, які пов'язані з погодними та гідрологічними умовами в районі досліджень, а також технологічним забезпеченням. Зниження вірогідних збитків в запропонованих моделях досягається шляхом мінімізації вартостей носія підводного апарату, підводного апарату та додаткового обладнання і послуг у відповідності до району та вибраної технології досліджень.

**Ключові слова:** управління ризиком проекту, моделювання, підводна археологія, телекерований ненаселений підводний апарат.

Выполнен анализ существующих моделей управления рисками при проведении глубоководных исследований с использованием необитаемых подводных аппаратов. На основании выполненных исследований разработаны модели управления рисками в проектах глубоководных археологических исследований, связанных с погодными и гидрологическими условиями в районе исследований, а также технологическим обеспечением. Снижение возможных убытков в предложенных моделях достигается путем минимизации стоимости носителя подводного аппарата, подводного аппарата и дополнительного оборудования и услуг в соответствии с районом и выбранной технологией исследований.

**Ключевые слова:** управление риском проекта, моделирование, подводная археология, телеуправляемый необитаемый подводный аппарат.

The analysis of existing risk management models at underwater works using marine robotics is conducted. Leading role of underwater remotely operated vehicle in underwater archaeological research is shown. The structure of risk management model in underwater archeology projects related to weather and hydrological conditions in the investigated area is developed. The basis of the model is selection process of timing of deep archaeological researches, which are favorable for meteorological and hydrological conditions and satisfy the conditions to ensure the minimum cost of the project by defining rational terms of attracting, underwater remotely operated vehicles, vessels and their crews. The structure of risk management model is developed for risks associated with technological support of underwater archaeological research. The initial data for the model is the task to conduct archaeological research, geographic coordinates and its timing. The key parameters of the model are information about characteristics of investigated artifacts, their value for classification features. The model assumes a sequence of iterative processes in pre-development of technology for underwater archaeological research, as well as determining required characteristics of robotics, support vessels and additional equipment on its basis.

**Keywords:** project risk management, modeling, underwater archeology, underwater remotely operated vehicle.

**Вступ.** Результати виконання проектів суттєво залежать від ефективності розробленої і прийнятої системи проектного менеджменту, яка впливає на організаційне та техніко-технологічне забезпечення проектів, їх вартість, якість та терміни виконання [1, 2].

Досвід управління проектами показує, що в більшості випадків фактор предметного поля проекту потребує вдосконалення або розробки нових методів та моделей управління ризиками, які враховують особливості цільової спрямованості проектів [3, 4].

Підводна археологія, яка базується на використанні телекерованих ненаселених підводних апаратів (НПА), інтенсивно розвивається у провідних морських країнах світу, а також за останні роки почала за

стосовуватись в Україні [5–9]. Її застосування забезпечує наукові дослідження підводної культурної спадщини та, разом з тим, як і всі глибоководні проекти, супроводжується значною кількістю ризиків [10–13]. Ці обставини актуалізують потребу вирішення низки питань теоретичного і прикладного характеру їх ідентифікації, якісного та кількісного аналізу, створення моделей та механізмів управління ними.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** На теперішній час існує велика кількість методологій управління проектами, в рамках яких питанням управління ризиками приділяється значна увага. При цьому, визначені в них моделі носять інтеграційний характер і потребують їх диференціації та удосконалення. При

© А. В. Надточий. 2016





У відповідності до моделі за розробленим регламентом робіт визначається необхідний термін часу для проведення глибоководних археологічних досліджень –  $T_i$ , де  $i$  – порядковий номер можливого варіанту проведення ГД.

При статистичному дослідженні метеорологічні та гідрологічні умови в загальному випадку є функцією координат проведення глибоководних археологічних досліджень та їх попередньо визначеного терміну:

$$[M],[G]=f(((x_1 y_1),(x_1 y_2),(x_2 y_1), (x_2 y_2))), \quad (1)$$

де  $[M],[G]$  – множина метеорологічних та гідрологічних умов;  $((x_1 y_1), (x_1 y_2), (x_2 y_1), (x_2 y_2))$  – координати району досліджень;  $\tau_0, \tau_1$  – попередній час початку та закінчення виконання досліджень, відповідно.

При попередньо визначеному часу початку  $\tau_0$  та закінчення виконання досліджень  $\tau_1$  за допомогою різного роду інформаційних систем [14–16] та наявних карт гідрологічних умов в районі досліджень проводиться аналіз статистичних даних прогнозованих показників множин  $[M],[G]$  на їх відповідність до умов, визначених у розробленому регламенті робіт. При цьому, їх відповідність визначається на перспективу та на короткостроковий термін з врахуванням тенденцій змін метеорологічних та гідрологічних умов в районі досліджень:

$$M_{\tau_0, \tau_1} = \begin{bmatrix} I^H(\tau_0, \tau_1) \\ \dots \\ I^S(\tau_0, \tau_1) \end{bmatrix}, \quad progn M_{\tau_0, \tau_1} = \begin{bmatrix} I^H(\tau_0), I^H(\tau_1), \dots, I^H(\tau_1) \\ \dots \\ I^S(\tau_0), I^S(\tau_1), \dots, I^S(\tau_1) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$G_{\tau_0, \tau_1} = \begin{bmatrix} Y^H(\tau_0, \tau_1) \\ \dots \\ Y^S(\tau_0, \tau_1) \end{bmatrix}, \quad progn G_{\tau_0, \tau_1} = \begin{bmatrix} Y^H(\tau_0), Y^H(\tau_1), \dots, Y^H(\tau_1) \\ \dots \\ Y^S(\tau_0), Y^S(\tau_1), \dots, Y^S(\tau_1) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де  $M_{\tau_0, \tau_1}, G_{\tau_0, \tau_1}, progn M_{\tau_0, \tau_1}, progn G_{\tau_0, \tau_1}$  – множини метеорологічних та гідрологічних умов, які визначені в регламенті проведення ГД, та прогнозовані множини метеорологічних та гідрологічних умов, відповідно;  $I^H(\tau_0, \tau_1), \dots, I^S(\tau_0, \tau_1), Y^H(\tau_0, \tau_1), \dots, Y^S(\tau_0, \tau_1)$  – показники метеорологічних та гідрологічних умов, які визначені в регламенті проведення ГД,  $I^H(\tau_0), I^H(\tau_1), \dots, I^S(\tau_0), I^S(\tau_1), \dots, I^S(\tau_1), Y^H(\tau_0), Y^H(\tau_1), \dots, Y^H(\tau_1), Y^S(\tau_0), Y^S(\tau_1), \dots, Y^S(\tau_1)$  – про-

гнозовані показники метеорологічних та гідрологічних умов за термін  $T$  ( $\tau_0 \dots \tau_1$ ) проведення ГД.

В разі незадоволення термінами робіт генеруються альтернативні терміни початку та закінчення робіт, які виступають вихідними даними для нового циклу роботи моделі. Якщо терміни проведення ГД за метеорологічними та гідрологічними показниками задовольняють прийнятим в регламенті робіт, моделлю управління ризиками передбачається визначення «вартості термінів складових проекту», тобто визначення вартості основних технічних ресурсів, необхідних для проведення досліджень, та їх відповідність умовам:

$$C_n = f(T_i) \leq \max C_n, \quad C_{нна} = f(T_i) \leq \max C_{нна}, \quad (4)$$

$$C_d = f(T_i) \leq \max C_d,$$

де  $C_n, C_{нна}, C_d$  – вартість носія, вартість НПА та команди, що його обслуговує, а також вартість додаткового обладнання та послуг, що пов'язані з виконанням проекту ГД у визначений термін початку  $\tau_0$  та закінчення робіт  $\tau_1$ ;  $\max C_n, \max C_{нна}, \max C_d$  – максимально припустимі вартості складових бюджету проекту: носія, вартості НПА та команди, що його обслуговує, а також вартості додаткових послуг, пов'язаних з виконанням проекту ГД.

В разі виконання умов, терміни погоджуються, включаються до моделей визначення бюджету часу проведення ГД та архівуються. В разі незадовільних результатів порівняльного аналізу пропонується новий цикл моделювання з альтернативними варіантами можливих носіїв, НПА та членів команди, додаткового обладнання та послуг, термінів робіт.

Задача вибору термінів проведення ГД може налічувати процеси оптимізації вибору мінімальних значень вартостей:

$$C_n(T_i) \rightarrow \min, \quad C_{нна}(T_i) \rightarrow \min, \quad C_{до}(T_i) \rightarrow \min \text{ при наявності відносно значної кількості носіїв, НПА та додаткового обладнання.}$$

Слід відмітити, що показники метеорологічних та гідрологічних умов носять вірогідний характер, що потребує максимально можливого отримання кількості їх значень в районі досліджень на вірогідний період проведення глибоководних археологічних досліджень.

Серед визначених ризиків, які виникають при глибоководних археологічних дослідженнях, слід відмітити ризики, пов'язані з їх технологічним забезпеченням. Збитки від настання цих ризиків є наслідком помилок планування робіт та призводять до збільшення бюджету і термінів проекту, втрати артефакту, тощо. Виконаний аналіз існуючих моделей управління ризиками дозволив розробити модель управління ризиками, пов'язаними з технологічним забезпеченням ГД (рис. 2).

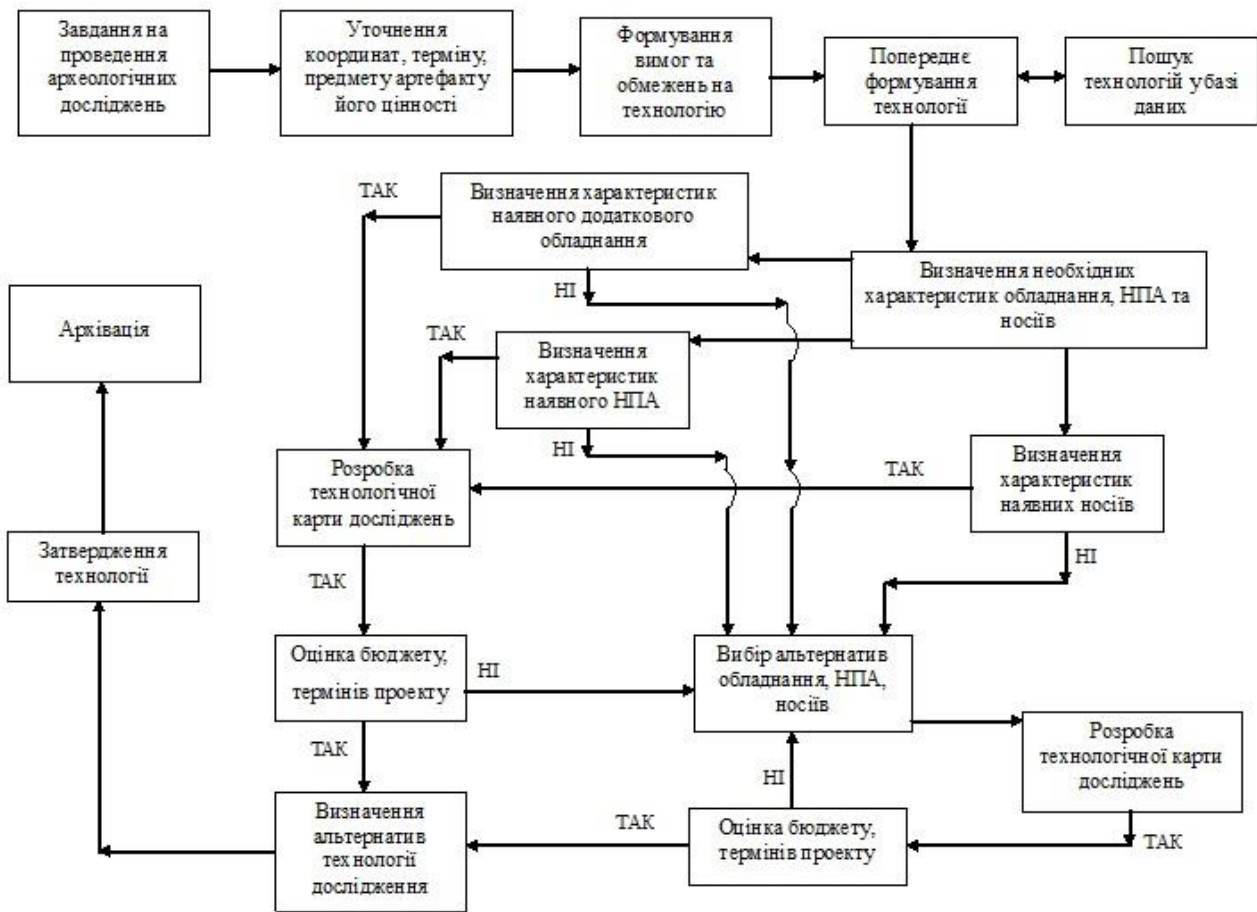


Рис. 2 – Структура моделі управління ризиками, пов’язаними з технологічним забезпеченням

Вихідними даними для користування моделлю слід вважати завдання на проведення ГД, координати проведення досліджень  $((x_1, y_1), (x_1, y_2), (x_2, y_1), (x_2, y_2))$  термін їх виконання  $(\tau_0, \tau_1)$ . Ключовим фактором, який впливає на визначення технології проведення ГД слід вважати інформаційну складову про предмет артефакту, його основні характеристики  $[A]$  та рівень його цінності за класифікаційними ознака-

$$N_H = \begin{bmatrix} S_i^H, S_{i+1}^H, \dots, S_{i+n}^H \\ \dots \\ P_i^H, P_{i+1}^H, \dots, P_{i+n}^H \end{bmatrix}, N_{HПА} = \begin{bmatrix} S_i^{HПА}, S_{i+1}^{HПА}, \dots, S_{i+n}^{HПА} \\ \dots \\ P_i^{HПА}, P_{i+1}^{HПА}, \dots, P_{i+n}^{HПА} \end{bmatrix}, N_{DO} = \begin{bmatrix} S_i^{DO}, S_{i+1}^{DO}, \dots, S_{i+n}^{DO} \\ \dots \\ P_i^{DO}, P_{i+1}^{DO}, \dots, P_{i+n}^{DO} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де  $N_H, N_{HПА}, N_{DO}$  – множини структурно-параметричних показників носія, НПА та додаткового обладнання за визначеною технологією ГД, відповідно;  $S_i^H, S_{i+1}^H, \dots, S_{i+n}^H$  – структурні показники носія,  $P_i^H, P_{i+1}^H, \dots, P_{i+n}^H$  – параметричні показники носія, за визначеною технологією ГД;  $S_i^{HПА}, S_{i+1}^{HПА}, \dots, S_{i+n}^{HПА}$  – структурні показники НПА,  $P_i^{HПА}, P_{i+1}^{HПА}, \dots, P_{i+n}^{HПА}$  – параметричні показники НПА, визначені за технологією ГД;

ми  $Q_i = f[A]$ . Тобто  $Z = f(Q_i)$ , де  $Z$  – варіант технології проведення ГД. Моделлю передбачена послідовність ітераційних процесів попередньої розробки технології проведення глибоководних археологічних досліджень, а також визначення на її підставі необхідних структурно-параметричних показників НПА, носіїв НПА та додаткового обладнання:

$S_i^{DO}, S_{i+1}^{DO}, \dots, S_{i+n}^{DO}$  – структурні показники додаткового обладнання,  $P_i^{DO}, P_{i+1}^{DO}, \dots, P_{i+n}^{DO}$  – параметричні показники додаткового обладнання, визначені за технологією ГД.

Визначені показники є базою для перевірки структурно-параметричних показників носіїв, НПА та додаткового обладнання, встановлених за моделлю управління ризиками, пов’язаними з погодними та гідрологічними умовами. В разі, якщо вони задовольняють вимогам та обмеженням на технологію проекту вони виступають основою для розробки технологічної карти досліджень, в протилежному випадку –

формується альтернативні варіанти носіїв, НПА та додаткового обладнання, цикл процесів повторюється до моменту можливого прийняття їх структурно-параметричних характеристик.

Після процесу розробки технологічної карти досліджень, аналогічно до моделі управління ризиками, пов'язаними з погодними та гідрологічними умовами, виконується перевірка відповідності вартості основних ресурсів, необхідних для проведення досліджень, за прийнятною технологічною картою:

$$\begin{aligned} C_H &= f(Z_i) \leq \max C_H, \\ C_{НПА} &= f(Z_i) \leq \max C_{НПА}, \\ C_{ДО} &= f(Z_i) \leq \max C_{ДО}, \end{aligned} \quad (6)$$

де – варіант технологічної карти проведення ГД.

При наявності відносно значної кількості носіїв, НПА та додаткового обладнання вирішується задача мінімізації їх вартостей:

$$\begin{aligned} C_H(Z_i) &\rightarrow \min, \\ C_{НПА}(Z_i) &\rightarrow \min, \\ C_{ДО}(Z_i) &\rightarrow \min, \end{aligned} \quad (7)$$

Розроблені моделі пройшли апробацію та підтвердили свою ефективність при виконанні низки проектів глибоководних археологічних проектів.

### Висновки

1. Розроблена модель управління ризиками, пов'язаними з погодними та гідрологічними умовами в районі глибоководних археологічних досліджень, знижує вірогідність та абсолютні значення збитків проекту шляхом гармонізації вибору термінів досліджень та вартості основних ресурсів у визначений термін початку та закінчення робіт.

2. Розроблена модель управління ризиками, пов'язаними з технологічним забезпеченням глибоководних археологічних досліджень, знижує вірогідність та абсолютні значення збитків проекту шляхом мінімізації вартості носіїв НПА, НПА та додаткового обладнання, необхідних для проведення досліджень за прийнятною технологічною картою, яка враховує основні характеристики та рівень цінності артефакту.

### Список літератури:

1. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство РМВОК) [Электронный ресурс]. – 5-е изд. – Project Management Institute, 2013. – 176 с. – Режим доступа: [http://static2.ozone.ru/multimedia/book\\_file/1012041519.pdf](http://static2.ozone.ru/multimedia/book_file/1012041519.pdf)
2. ISO 31000:2009. Менеджмент риска. Принципы и руководство [Текст]. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 24 с.
3. Арчибальд, Р. Д. Управление высокотехнологичными программами и проектами [Текст] / Р. Д. Арчибальд. – Москва: ДМК Пресс, 2002. – 464 с.
4. Харитонов, Ю. Н. Идентификация рисков при управлении проектами реконструкции систем теплоснабжения [Текст] / Ю. Н. Харитонов // Вестник инженерной академии Украины. – 2009. – № 2. – С. 299–301.
5. Green, J. N. Maritime Archaeology, Second Edition [Text]: A Technical Handbook / J. N. Green. – Academic Press, 2004. – 470 p.
6. Бліщов, В. С. Базові технології застосування підводних апаратів-роботів для задач морської археології [Текст]: матеріали міжнародної науково-технічної конференції / В. С. Бліщов, С. О. Воронов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. – Миколаїв: НУК, 2010. – С. 389–391.
7. Green, J. Underwater Archaeology: the NAS Guide to Principles and Practice [Text] / J. Green // International Journal of Nautical

- Archaeology. – 2009. – Vol. 38, № 1. – P. 191–193. doi:10.1111/j.1095-9270.2008.220.13.x
8. Зеленко, С. М. Подводная археология Крыма [Текст] / С. М. Зеленко. – Киев: Стило, 2008. – 272 с.
9. Воронов, С. О. Дослідження підводно-археологічної експедиції біля південного узбережжя Криму [Текст] / С. О. Воронов // Археологічні дослідження в Україні 2010. – 2011. – С. 58–60.
10. Manley, J. E. The Role of Risk in AUV Development and Deployment [Text] / J. E. Manley. – OCEANS 2007 – Europe. – 2007. doi:10.1109/oceanse.2007.4302219
11. Griffiths, G. Towards a Risk Management Process for Autonomous Underwater Vehicles [Electronic resource] / G. Griffiths, A. Trembanis. – Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.330.4576&rep=rep1&type=pdf>
12. Grove, W. Risk implications in site characterization and analysis for offshore engineering and design [Electronic resource]: Research report 286 / W. Grove, A. Road. – WS Atkins Consultants Ltd., 2004. – 116 p. – Available at: <http://docplayer.net/16111516-Research-report-286-risk-implications-in-site-characterisation-and-analysis-for-offshore-engineering-and-design-hse.html>
13. Hirvonen, J. Inspection of risers with submarine robotics; technology, risks and regulations [Electronic resource] / J. Hirvonen, T. Riittamaki, K. Mollestad. – Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2014. – 24 p. – Available at: <http://in3.dem.ist.utl.pt/docs/rmt2014finalprojects/p7.pdf>
14. Климатические тренды [Электронный ресурс] / Гидрометцентр России. – Режим доступа: <http://meteoinfo.ru/climate/2015-05-25-13-36-16>
15. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане [Электронный ресурс] / ЕСИМ. – Режим доступа: <http://hmc.meteor.ru/sea/storm/index.php>
16. Бліщов, О. В. Узагальнена методика оцінки ефективності підводної техніки у проектах глибоководної археології [Текст] / О. В. Бліщов, А. В. Надточій // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 1/3 (67). – С. 25–29. doi:10.15587/1729-4061.2014.21045

### Bibliography (transliterated):

1. Project Management Institute. (2013). *Rukovodstvo k Svodu znanyi po upravleniyu proektamy (Rukovodstvo PMBOK)*. Piatoe izdanie. Project Management Institute, 176. Available at: [http://static2.ozone.ru/multimedia/book\\_file/1012041519.pdf](http://static2.ozone.ru/multimedia/book_file/1012041519.pdf)
2. ISO 31000:2009. Risk management. Principles and guidelines. (2012). Moscow: Standartinform, 24.
3. Archibal'd, R. D. (2002). *Upravlenie vysokotekhnologichnymi programmami i proektami*. Moscow: DМК Press, 464.
4. Haritonov, Ju. N. (2009). *Identifikacija riskov pri upravlenii proektami rekonstrukcii sistem teplosnabzhenija*. Vestnik inzhenernoi akademii Ukrainy, 2, 299–301.
5. Green, J. N. (2004). *Maritime Archaeology, Second Edition*. Academic Press, 470.
6. Blintsov, V. S., Voronov, S. O. (2010). *Bazovi tekhnologii zastosuvannia pidvodnykh aparativ-robotiv dlia zadach morskoiy arkeolohii*. Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi. Mykolaiv: NUK, 389–391.
7. Green, J. (2009). *Underwater Archaeology: the NAS Guide to Principles and Practice*. International Journal of Nautical Archaeology, 38 (1), 191–193. doi:10.1111/j.1095-9270.2008.220.13.x
8. Zelemko, S. M. (2008). *Podvodnaja arheologija Kryma*. Kiev: Stilos, 272.
9. Voronov, S. O. (2011). *Doslidzhennja pidvodno-arkeologichnoji ekspedycji bilja pidnennogho uzberezhzhja Krymu*. Arkeologichni doslidzhennja v Ukraini 2010, 58–60.
10. Manley, J. E. (2007). *The Role of Risk in AUV Development and Deployment*. OCEANS 2007 – Europe. doi:10.1109/oceanse.2007.4302219
11. Griffiths, G., Trembanis, A. *Towards a Risk Management Process for Autonomous Underwater Vehicles*. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.330.4576&rep=rep1&type=pdf>
12. Grove, W., Road, A. (2004). *Risk implications in site characterization and analysis for offshore engineering and design*. Research report 286. WS Atkins Consultants Ltd., 116. Available at: <http://docplayer.net/16111516-Research-report-286-risk-implications-in-site-characterisation-and-analysis-for-offshore-engineering-and-design-hse.html>



13. Hirvonen, J., Riuttamaki, T., Mollestad, K. (2014). Inspection of risers with submarine robotics; technology, risks and regulations. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 24. Available at: <http://in3.dem.ist.utl.pt/docs/rnt2014finalprojects/p7.pdf>
14. Klimaticheskie trendy. (25.05.2015). Gidrometsentr Rossii. Available at: <http://meteoinfo.ru/climate/2015-05-25-13-36-16>
15. Edinaja gosudarstvennaja sistema informacii ob obstanovke v Mirovom okeane. ECIM. Available at: <http://hmc.meteorf.ru/sea/storm/index.php>
16. Blintsov, O. V., Nadochii, A. V. (2014). The generalized underwater technics efficiency estimation methodology of deep sea archaeological projects. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(3(67)), 25–29. doi:[10.15587/1729-4061.2014.21045](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.21045)

Надійшла (received) 08. 01. 2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Моделювання управління ризиками в проектах глибоководних археологічних досліджень з використанням засобів морської робототехніки/ А. В. Надточий// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.63–67. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Моделирование управления рисками в проектах глубоководных археологических исследований с использованием средств морской робототехники/ А. В. Надточий// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.63–67. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Modelling of risk management in projects of deep archaeological research using marine robotics funds/ Anatoly Nadochyy// Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P. 63–67. – Bibliogr.: 16. – ISSN 2079-5459.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Надточий Анатолій Вікторович** – Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, старший викладач **кафедри «Автоматики та електроустаткування»**; пр. Ушакова, 44, м. Херсон, Україна, 73022; e-mail: [tasman.85@mail.ru](mailto:tasman.85@mail.ru).

**Надточий Анатолій Вікторович** – Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, старший преподаватель кафедры «Автоматики и электрооборудования»; пр. Ушакова, 44 м. Херсон, Украина, 73022; e-mail: [tasman.85@mail.ru](mailto:tasman.85@mail.ru).

**Nadochiy Anatoliy** – Kherson branch of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, senior lecturer in "Automation and electrical equipment"; Ukraine, Kherson, Ushakova Avenue, 44, 73022

УДК 621. 519.816

**И. Ш. НЕВЛЮДОВ, А. В. ПОНОМАРЕВА, В. О. БОРТНИКОВА**

**МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЭМС АКСЕЛЕРОМЕТРОВ**

В статье предложена модель принятия решения о технологическом процессе (ТП) изготовления микроэлектромеханических (МЭМС) акселерометров на базе типизации ТП по результатам кластерного анализа объекта производства. Кластеризация акселерометров позволяет сгруппировать в рамках отдельных кластеров объекты по конструктивно-эксплуатационным признакам и предложить варианты ТП изготовления акселерометров, присущих конкретному кластеру. Результаты разработанного метода позволяют автоматизировать процесс проектирования ТП изготовления МЭМС акселерометров.

**Ключевые слова:** микроэлектромеханический акселерометр, микроэлектромеханические системы, типовой технологический процесс, кластерный анализ, компьютерное моделирование, дендрограмма, метод Варда, матрица расстояний, корреляция.

У статті запропонована модель прийняття рішення про технологічний процес (ТП) виготовлення мікроелектромеханічних (МЕМС) акселерометрів на базі типізації ТП за результатами кластерного аналізу об'єкта виробництва. Кластеризація акселерометрів дозволяє згрупувати в рамках окремих кластерів об'єкти по конструктивно-експлуатаційним ознаками і запропонувати варіанти ТП виготовлення акселерометрів, властивих конкретному кластеру. Результати розробленого методу дозволяють автоматизувати процес проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів.

**Ключеві слова:** мікроелектромеханічний акселерометр, мікроелектромеханічні системи, типовий технологічний процес, кластерний аналіз, комп'ютерне моделювання, дендрограма, метод Варда, матриця відстаней, кореляція.

The paper is devoted to tasks of decision making automation at the stage of MEMS accelerometer production technological process design. For the task solving we propose approach based on technical process typing by cluster analysis results for production object – MEMS accelerometers. Accelerometers clustering allows to group in separate clusters objects by constructive and operational features and to propose accelerometer production technological processes inherent in a particular cluster.

The method is realized on the basis of hierarchical clustering. It allows to represent results in dendrogram form, that clearly shows the dependence of the obtained clusters and their decomposition. On the basis of performed researches it's clear for task solving for MEMS accelerometers production typical technological process design automation the best method is Ward's method.

Proposed method results allow to automate MEMS accelerometers production technological process design.

**Keywords:** accelerometer, microelectromechanical systems, typical technological process, cluster analysis, computer modeling, dendrogram, Ward's methods, the matrix distances correlation.



**Введение.** Проектирование технологического процесса изготовления микроэлектромеханических акселерометров представляет собой сложную оптимизационную задачу, основанную на использовании расчетных аналитических методов проектирования. Оптимальный вариант технологического процесса изготовления МЭМС акселерометра выбирается из нескольких вариантов технологий. Одним из альтернативных вариантов разработки ТП является разработка новых методов и инструментов для автоматизированного проектирования с использованием информации о типовой ТП и его существующих реализациях. Такой подход позволяет упростить сам процесс проектирования ТП, снизить временные затраты на проектирование и учитывать предыдущие опыты проектирования за счет использования информации о результатах реализаций ТП.

**Теоретическое обоснование предложенного метода.** Одним из эффективных вариантов проектирования ТП является использование типовых ТП. Типизация технологических процессов основана на классификации объектов производства и заключается в разделении их по конструктивным признакам на отдельные группы, для которых возможна разработка общих технологических процессов или операций.

Пусть множество акселерометром  $Ak = \{Ak_1, Ak_2, Ak_3, \dots, Ak_n\}$  обозначает  $n$  существующих акселерометров МЭМС. Обозначим символом  $a_{ij}$  параметры  $i$ -й характеристики акселерометра  $Ak_j$ . А вектор  $A_j = [a_{ij}]$  отвечает каждой группе параметров для  $j$ -го акселерометра.

Таким образом, для множества  $Ak$  акселерометров существуют вектора его параметров  $A_j = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ , которые описывают множество параметров акселерометров  $Ak$ .

В работах [1–5] предложены параметрические модели акселерометров  $Ak$ , и учитывают ряд конструктивно-эксплуатационных параметров. Вектор параметров  $A_j = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  является исходными данными для классификации акселерометров и формирования отдельных кластеров. Тогда  $N$  параметров акселерометра  $A_1, A_2, \dots, A_n$  можно представить в виде матрицы

$$A_j = [A_1, A_2, \dots, A_n] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{Nn} \end{bmatrix},$$

где каждая строка матрицы – вектор параметров  $N$ -го акселерометра.

Пусть множеству акселерометров  $Ak$  принадлежат некоторые акселерометры  $Ak_j$  и  $Ak_k$ , которые описаны параметрами  $a_{ij}$ , тогда для каждого

множества акселерометров  $Ak$  будет задана метрика, если для любой пары акселерометров, которые принадлежат множеству  $Ak$  определено неотрицательное число  $d_{ij}$ . Тогда расстояние между элементами множества акселерометров  $A_i$  и  $A_j$  будет неотрицательное число, а матрица расстояний между парами векторов групп размеров акселерометров  $\Delta$  симметричная и задана в следующем виде:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

где  $d_{ij} = 0$  для  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Следовательно, имея матрицу расстояний  $d(A_i, A_j)$  возможно построить дендрограмму  $Dn(d(A_i, A_j))$ , которая позволяет в графическом виде отобразить связи между объектами из заданного множества акселерометров в виде последовательность объединения (разделения) кластеров акселерометров.

Тогда запишем метод выбора типового ТП, который представляет собой описание совокупности приёмов и операций, применяемых при автоматизированном проектировании ТП для МЭМС акселерометров. Он заключается в следующем:

1. Составление вектора параметров акселерометра  $Ak_n$ . Каждый  $A_j$  параметр задается индексом  $A_j = A_j^n$  если  $x \leq A_j^n \leq y$ , тогда в вектор параметров записывается значение  $A_j = n$ . В случае отсутствия  $j$ -го параметра в вектор записывается ноль.

2. Формирование матрицы параметров.

3. Расчёт вектора корреляционного расстояния  $d(A_i, A_j)$  между парами параметров исходного множества данных, заданных матрицей  $A_j$ . Тогда, расстояние рассчитывается:

$$d(A_i, A_j) = 1 - \frac{(a_i - \bar{a}_i)(a_k - \bar{a}_k)'}{[(a_i - \bar{a}_i)(a_i - \bar{a}_i)']^{1/2} [(a_k - \bar{a}_k)(a_k - \bar{a}_k)']^{1/2}} \quad (1)$$

где  $A_i$  и  $A_k$  – это  $i$  и  $j$  строки матрицы  $A_j$ ;  $a_{ir}$  и  $a_{ks}$  –  $r$  и  $s$  объектов в кластере  $i, k$ .

4. Формирование иерархического дерева кластеров с использованием метода Варда [7]. Входным аргумент является вектором расстояний  $d(A_i, A_k)$ .

5. Построение дендрограммы и анализа полученных кластеров для определения типового ТП, присутствующих данному кластеру.

**Результаты имитационного моделирования предложенного метода.** Проведено имитационное моделирование данного метода. Входной информацией для моделирования послужила техническая документация РСВ Piezotronics Inc на МЭМС акселерометры с разными конструкторско-эксплуатационными параметрами.

Сформирована матрица параметров  $91 \times 34$ , где 91 – размер выборки акселерометров фирмы PCB Piezotronics Inc [9], 34 – значения параметров МЭМС акселерометров. Некоторые из выбранных параметров: тип назначения, количество осей, материал чувствительного элемента и его конструкция, тип акселерометра, рабочие характеристики, параметры корпуса, параметры крепления, климатические факторы внешней среды, масса.

В ходе моделирования использованы различные методики расчета матриц расстояний,

результаты которых экспериментально обосновали теоретические положения метода. Также проведен анализ различных методов формирования кластеров при построении дендрограмм. Проведенный анализ результатов кластеризации показал, что метод Варда наиболее полно учитывает особенности рассматриваемых объектов. Дендрограмма, полученная с использованием метода Варда представлена на рис. 1.

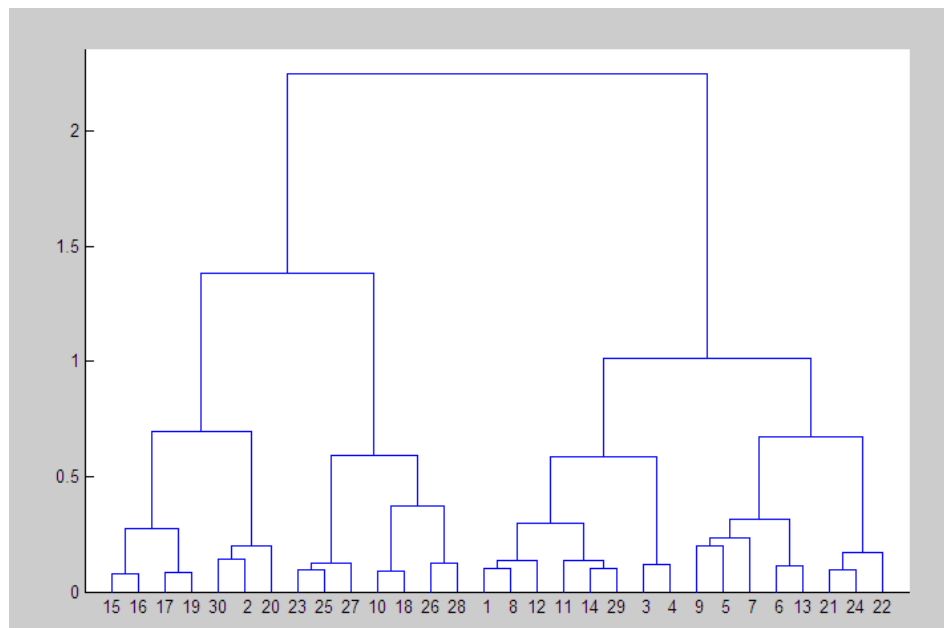


Рис. 1 – Дендрограмма по методу Варда

Выделено 30 кластеров, в каждом из которых содержится различное количество акселерометров. Например, в кластер №3 входят акселерометры 54 (модель 357B03) и 65 (модель 357A05). Варьируя границу дальности связи можно укрупнять кластеры. Так, для порогового значения дальности связи на уровне 1,2 можно выделить 3 кластера: кластер 1 (15, 16, 17, 19, 30, 2, 20), кластер 2 (23, 25, 27, 10, 18, 26, 28), кластер 3 (1, 8, 12, 11, 14, 29, 3, 4, 9, 5, 7, 6, 13, 21, 24, 22).

Основываясь на полученных результатах возможно провести анализ технологий, которые используются для того или иного кластера, что позволит обоснованно выбрать типовой ТП для

проектирования нового ТП изготовления акселерометра.

Тогда можно сделать предположение, что в один и тот же кластер могут попасть акселерометры с разными технологиями, а следовательно и отличными ТП. Тогда обозначим разные технологии как  $T_1, T_2, \dots, T_n$  в рамках каждого кластера. В рамках кластера можно выявить процентное соотношение используемых технологий. Это даст возможность сформировать рекомендацию по выбору типового ТП, под определенные конструктивно-эксплуатационных параметры нового акселерометра (табл. 1).

Таблица 1 – Пример предложенного подхода в рамках 3 кластеров

Кластер	Номер акселерометра	Технологии
1	15, 16, 17, 19, 30, 2, 20	$T_1$ – 68 % $T_2$ – 22% $\Rightarrow$ предлагается выбор ТПП $T_1$ $T_3$ – 10%
2	23, 25, 27, 10, 18, 26, 28	$T_6 \Rightarrow$ предлагается выбор ТПП $T_6$
3	1, 8, 12, 11, 14, 29, 3, 4, 9, 5, 7, 6, 13, 21, 24, 22	$T_2$ – 18% $T_4$ – 56% $\Rightarrow$ предлагается выбор ТПП $T_4$ $T_5$ – 26%

Следовательно, построение ТП изготовления новой модели акселерометра сводится к задаче

формирования вектора параметров акселерометра, процесса кластеризации и выявлению подходящей

технологии, а также последующему изменению параметров типового технологического процесса и решению оптимизационных задач на базе аналитических методов проектирования.

**Выводы.** В работе предложена модель принятия решения о выборе типового технологического процесса изготовления МЭМС акселерометров на этапе проектирования. Проведено имитационное моделирование и обоснованы теоретически положения разработанной модели. Кластерный анализ параметров 91 образца МЭМС акселерометров позволил сформировать 30 кластеров, которые в свою очередь за счет выбора порогового значения дальности связи можно укрупнить. Так для уровня дальности связи кластеров 1,2 сформировано 3 кластера. Результаты кластеризации по конструктивно-эксплуатационным параметрам акселерометров предложено использовать для выбора типового ТП при проектировании нового ТП изготовления акселерометра. Это позволит автоматизировать процесс проектирования ТП изготовления МЭМС акселерометров с учетом не только его проектных конструктивных параметров, но и с учетом фактически достигнутых значений данных параметров при предыдущих реализациях типовых ТП изготовления схожих МЭМС акселерометров.

#### Список литературы:

1. Бортникова, В. О. Математическая модель акселерометра для разработки модуля САПР ТП [Текст]: Сборник материалов форума: 19-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» / В. О. Бортникова. Харьков: ХНУРЭ, 2015. – С. 119–120.
2. Бортникова, В. О. Математическая модель чувствительности акселерометра для разработки модуля САПР [Текст]: материалы конференций: Дні науки в ДонНТУ / В. О. Бортникова. Красноармійськ: «ДонНТУ», 2015. – С. 380–382.
3. Бортникова, В. О. Математическая модель диапазона измеряемых ускорений акселерометра для разработки модуля САПР МЭМС [Текст]: Збірник матеріалів Всеукраїнської студентської наукової конференції: Наукова Україна / В. О. Бортникова, Д. Ю. Резников. Дніпропетровськ: «SeKum Software», 2015. – С. 364–366.
4. Бортникова, В. О. Математическая модель метода нагрузки на чувствительный элемент акселерометра [Текст]: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції: Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку / В. О. Бортникова. Черкаси, 2015. – С. 98–99.
5. Евсеев, В. В. Математическая модель климатических факторов внешней среды для решения задач автоматизации технологии производства акселерометров на основе микроэлектромеханических систем [Текст]: Proceedings XXV international conference «New leading technologies in machine building» / В. В. Евсеев, В. О. Бортникова // Koblevo-Kharkov, Ukraine 2015. – 54 с.
6. Ким, Дж.-О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ [Текст]: Пер. с англ. / Дж.-О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка и др.; Под ред. И. С. Енюкова. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
7. Ward, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function / J.H. Ward// Journal of the American statistical association. – 1963. – Vol. 58, № 301. – P. 236–244. doi:10.2307/2282967
8. Nevlyudov, I. Accelerometer parameters decomposition model for technological process design automation [Текст] / I. Nevlyudov, V. Yevsieiev, S. Miliutina, V. Bortnikova// Вісник національного університету «Львівська політехніка». Збірник наукових праць. Серія: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2015. – № 828. – С. 11–15.
9. PCB Piezotronics [Electronic resource]. Available at: <http://www.pcb.com/products/productfinder.aspx?tx=14>
10. Лотов, А. В. Многокритериальные задачи принятия решений [Текст] / А. В. Лотов, И. И. Пospelov. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 197 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Bortnikova, V. O. (2015). Matematicheskaja model' akselerometra dlja razrabotki modulja SAPR TP. Radioelektronika i molodezh' v XX veke. Khar'kov: HNURJe, 119–120.
2. Bortnikova, V. O. (2015). Matematicheskaja model' chuvstvitel'nosti akselerometra dlja razrabotki modulja SAPR. Dni nauky` v DonNTU. Krasnoarmijs'k: «DonNTU», 380–382.
3. Bortnikova, V. O., Reznikov, D. Ju. (2015). Matematicheskaja model' diapazona izmerjaemyh uskorenij akselerometra dlja razrabotki modulja SAPR MJeMS. Naukova Ukrainy. Dnipropetrovs'k: «SeKum Software», 364–366.
4. Bortnikova, V. O. (2015). Matematicheskaja model' metoda nagruzki na chuvstvitel'nyj jelement akselerometra. Avtomaty`zacija ta komp'yuterno-integrovani tehnologiyi u vy`robny`czvti ta osviti: stan, dosyagnennya, perspekty`vy`rozvy`tku. Cherkasi, 98–99.
5. Evseev, V.V., Bortnykova, V.O. (2015). Matematycheskaia model' klymatycheskykh faktorov vneshnei sredey dlja resheniya zadach avtomatyzatsyy tekhnolohyy proyzvodstva akselerometrov na osnove mykroelektronekhanycheskykh system. New leading technologies in machine building. Koblevo-Kharkov, 54.
6. Kym, Dzh.-O., Miuller, Ch. U., Klekka, U. R. Eds. Eniukova, Y. S. (1989). Faktorny, dyskrymynantnyy y klasternyy analiz. Moscow: Fynansy y statystyka, 215.
7. Ward, J. H. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. Journal of the American Statistical Association, 58(301), 236. doi:10.2307/2282967
8. Nevlyudov, I., Yevsieiev, V., Miliutina, S., Bortnikova, V. (2015). Accelerometer parameters decomposition model for technological process design automation. Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika». Zbirnyk naukovykh prats, 828, 11–15.
9. PCB Piezotronics. Available at: <http://www.pcb.com/products/productfinder.aspx?tx=14>
10. Lotov, A. V., Pospelov, I. I. (2008). Mnogokriterial'nye zadachi prinjatija reshenij. Moscow: MAKSS Press, 197.

Поступила (received) 15.01.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Модель принятия решения на этапе проектирования технологического процесса изготовления МЭМС акселерометров/ И. Ш. Невлюдов, А.В. Пономарева, В. О. Бортникова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.63–67. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Модель принятия решения на этапе проектирования технологического процесса изготовления МЭМС акселерометров/ И. Ш. Невлюдов, Г.В. Пономарьова, В. О. Бортникова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.63–67. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Decision making model at the mems accelerometers production technological process design stage/ I. Nevlyudov, A. Ponomarova, V. Bortnikova//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176) .– P. 63–67. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.**

**Невлюдов Игорь Шакирович** – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, заведующий кафедрой технологии и автоматизации производства радиоэлектронных и электронно-вычислительных средств; пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: igor.nevliudov@nure.ua

**Пономарева Анна Викторовна** – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры технологии и автоматизации производства радиоэлектронных и электронно-вычислительных средств; пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: ganna.ponomaryova@nure.ua

**Бортникова Виктория Олеговна** – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры технологии и автоматизации производства радиоэлектронных и электронно-вычислительных средств; пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: viktorii.bortnikova@nure.ua

**Невлюдов Игор Шакирович** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри технології та автоматизації виробництва радіоелектронних та електронно-обчислювальних засобів; пр. Науки, 14, м Харків, Україна, 61166; e-mail: igor.nevliudov@nure.ua

**Пономарьова Ганна Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри технології та автоматизації виробництва радіоелектронних та електронно-обчислювальних засобів; пр. Науки, 14, м Харків, Україна, 61166; e-mail: [ganna.ponomaryova@nure.ua](mailto:ganna.ponomaryova@nure.ua).

**Бортникова Вікторія Олегівна** – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри технології та автоматизації виробництва радіоелектронних та електронно-обчислювальних засобів; пр. Науки, 14, м Харків, Україна, 61166; e-mail: [viktorii.bortnikova@nure.ua](mailto:viktorii.bortnikova@nure.ua)

**Nevliudov Igor** – Dr. Sc., Professor, Kharkiv National University of Radioelectronics, Head of Department of Technology and Automation of Production of Radio-electronic and Computing devices; address: Nauky avenue, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166; e-mail: [igor.nevliudov@nure.ua](mailto:igor.nevliudov@nure.ua)

**Ponomareva Anna** – Ph.D., associate professor, Kharkiv National University of Radioelectronics, associate professor of technology and automation of production of radio-electronic and computing means; address: Nauky avenue, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166; e-mail: [ganna.ponomaryova@nure.ua](mailto:ganna.ponomaryova@nure.ua)

**Bortnikova Viktoriia** – Kharkov National University of Radio Electronics, post graduate student of the department of technology and automation of production of radio-electronic and computing means; address: Nauky avenue, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166; e-mail: [viktorii.bortnikova@nure.ua](mailto:viktorii.bortnikova@nure.ua)

УДК 656.212:681.3

*М. Ф. БУЛАНИЙ, О. В. ХМЕЛЕНКО, С. Г. ПЛАХТІЙ, Н. В. ГАРАЩЕНКО, С. Є. ФЕСЕНКО*

## РОЗРОБКА ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ПРИСТРОЮ ОХОЛОДЖЕННЯ ОПТИЧНОГО ДЕТЕКТОРА

В роботі подано результати розробки системи термоелектричного охолоджувача за допомогою елементів Пельтьє лінійного приймача оптичного випромінювання на базі приладу з зарядовим зв'язком типу ILX 511 фірми SONY. Крім того, був виготовлений вимірний модуль, який складався з вакуумної камери, лінійного детектора ILX 511, елементів Пельтьє, алюмінієвого холодопроводу та температурних сенсорів фірми Honeywell HEL-776A-1000. Керування модулем оптичного детектора здійснювалось за допомогою мікроконтроллера типу PIC18F4550 та аналого-цифрового перетворювача типу MCP-3208 фірми Microchip.

**Ключові слова:** прилад з зарядовим зв'язком, елемент Пельтьє, мікроохолоджувач, оптична система, приймач оптичного випромінювання.

В работе приведены результаты разработки системы термоэлектрического охладителя с помощью элементов Пельтье линейного приемника оптического излучения на базе устройства с зарядовой связью типа ILX 511 фирмы SONY. Кроме того, был изготовлен измерительный модуль, состоящий из вакуумной камеры, линейного детектора ILX 511, элементов Пельтье, алюминиевого холодопровода и температурных сенсоров фирмы Honeywell HEL-776A-1000. Управление модулем оптического детектора осуществлялось с помощью микроконтроллера типа PIC18F4550 и аналого-цифрового преобразователя типа MCP-3208 фирмы Microchip.

**Ключевые слова:** устройство с зарядовой связью, элемент Пельтье, микроохладитель, оптическая система, приемник оптического излучения.

In the course of this work, theoretical calculations of cascade thermopiles batteries were performed. Based on these calculations we showed the results of development of thermoelectric cooling using linear Peltier elements receiver optical radiation based on charge-coupled type ILX 511 company SONY. In addition, the measurement module was made, which consisted of the vacuum chamber, the linear detector ILX 511 Peltier items, aluminum cold conductor and temperature sensors firm by Honeywell HEL-776A-1000. Management of module of optical detector is delivered in the PIC18F4550 of MCU type and analogue-to-digital converter type of MCP-3208 of Microchip company.

Tests have shown good results, comparable with foreign analogues. Revealing that cooling devices, radiation detectors significantly increase the signal / noise ratio and the overall sensitivity of the whole filing system. It is shown that the construction elements of the cooling devices radiation detectors should be used thermoelectric Peltier elements.

**Keywords:** charge-coupled device, Peltier element, microcooler, optical radiation.

**Вступ.** Узагальнена структурна схема Оптико-електронного приладу (ОЕП) залежить від методу роботи. При пасивному методі вона включає оптичну систему, приймач випромінювання, електронний тракт і вихідний пристрій. При активному методі в схему додається передавальна система (джерело випромінювання).

Таким чином, в обох випадках у структурну схему включене джерело випромінювання й приймач випромінювання, які являють собою одні з її основних ланок. Прийом оптичного випромінювання приймачем випромінювання пов'язаний із проходженням оптичного випромінювання через середовище між досліджуванним або робочим об'єктом та через оптичну систему.

В оптичній спекторметрії важливу роль грає обробка і якісний аналіз великої кількості вихідних даних. При традиційній реєстрації за допомогою монохроматора і одного елемента, що реєструє, мають місце колосальні витрати часу.

У зв'язку з цим стає актуальною проблема створення пристрою для зменшення часу вимірювань, яке дозволило б прискорити і спростити реєстрацію даних [1–3].

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Існує маса приймальних пристроїв, які здатні сприймати різні види випромінювань. В даній роботі будемо розглядати тільки ті види приймачів і приймальних пристроїв, які являють собою великі інтегральні схеми (ВІС) або цілі гібридні інтегральні схеми (ГІС), що містять ВІС, елементи з'єднань, обробки та формування електричного сигналу.

Із усього різноманіття таких пристроїв будемо розглядати тільки ті прилади та пристрої, які забезпечують необхідні параметри технічної характеристики тільки при глибокому охолодженні – від температур 240 – 300 К до криогенних температур (нижче 120 К), тобто 35 – 90 К. Це обумовлено тим, що всі вони призначені для виявлення й формування зображень від слабких джерел випромінювання. Зазначені приймачі призначені для спекторметричних досліджень, а також в фотометрії [3, 4].

Елементи Пельтьє застосовуються в ситуаціях, коли необхідне охолодження з невеликою різницею температур, або енергетична ефективність охолоджувача не важлива. Наприклад, елементи Пельтьє застосовуються в маленьких автомобільних холодильниках, тому що застосування компресора у цьому випадку неможливо через обмежені розміри й, крім того, необхідна потужність охолодження невелика.

Також елементи Пельтьє досить ефективно застосовуються для охолодження пристроїв з зарядовим зв'язком у фотокамерах. За рахунок цього досягається помітне зменшення теплового шуму при тривалих експозиціях (наприклад в астрофотографії). Багатоступінчасті елементи Пельтьє застосовуються для охолодження приймачів випромінювання в інфрачервоних сенсорах [5–8].

Роботи в напрямку вдосконалювання систем забезпечення оптимальних температурних режимів електронних елементів ведуться багатьма дослідницькими лабораторіями. І системи охолодження, що передбачають використання термоелектричних модулів Пельтьє, вважаються надзвичайно перспективними [9–11].

**Мета та задачі дослідження.** Метою даної роботи є створення термоохолоджуваного пристрою для реєстрації спектрів фотолюмінесценції за допомогою лінійної матриці приладів з зарядовим зв'язком (ПЗЗ), даний пристрій дозволить робити вимірювання у деякому спектральному інтервалі з високою чутливістю та великим часом експозиції, одночасно, у 2048 точках.

На основі літературного огляду можна сформулювати основну задачу. По-перше, провести розрахунок можливості створення та застосування модулів охолодження на ефекті Пельтьє для побудови системи криостатування оптичного ПЗЗ лінійного сенсора. Та, по-друге, – на основі проведених розрахунків виготовити працездатний прилад – охолоджуваний приймач випромінювання, з контролем та установкою температури для застосування в оптичному комплексі на базі спектрофотометра ДФС – 452.

**Розрахунок оптимальних температур та економичності багатокаскадної батареї.** Розрахунок проміжної температури двокаскадної термобатарей.  $T_N = T_2 = 300$  К;  $T_0 = 270$  К. Матеріал термоелементів з оптимальними параметрами в кожному каскаді:  $M_2 = 1,36$ ;  $M_1 = 1,27$ . Згідно

$$T_i = T_0 (T_N/T_0)^{i/N}, i = 0, 1, 2, \dots, N.$$

$T_1 = (T_0 T_2)^{1/2} = (270 \times 300)^{1/2} = 287$  К, що відповідає проміжній (міжкаскадній) температурі при сталості параметрів термоелементів в інтервалі температур 300 ... 270 К. Покаскадні перепади температур  $\Delta T_1 = 17$  К,  $\Delta T_2 = 13$  К.

**Опис пристрою на основі мікроохолоджувача для охолодження лінійного приймача випромінювання.**

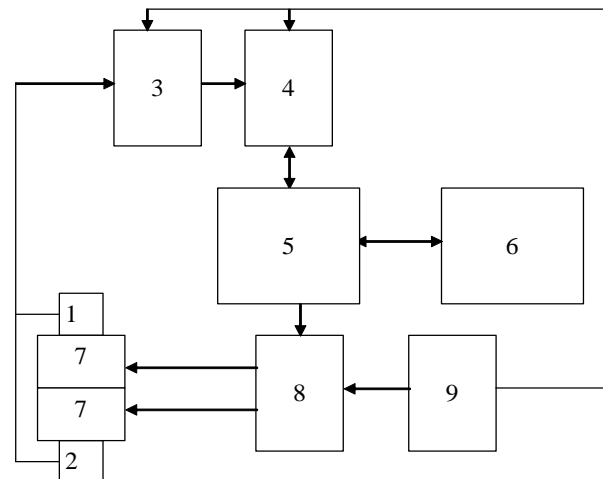


Рис. 1 – Блок-схема охолоджувальної системи для ПЗЗ лінійки на основі елементів Пельтьє: 1 – терморезистор холодної сторони, 2 – терморезистор гарячої сторони, 3 – блок перетворення та підсилення сигналу датчиків температури, 4 – аналогово-цифровий перетворювач, 5 – мікроконтролер, 6 – персональний комп'ютер, 7 – елемент Пельтьє, 8 – силові ключі, 9 – блок живлення

Блок-схема охолоджувальної системи для ПЗЗ лінійки на основі елементів Пельтьє зображена на рис. 1. Температура в даному випадку вимірюється за допомогою платинових терморезисторів фірми Honeywell HEL-776A-1000. Залежність опору від температури цих датчиків показана на рис. 2, та описується аналітичним рівнянням виду:



$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2 - 100CT^3 + CT^4). \quad (1)$$

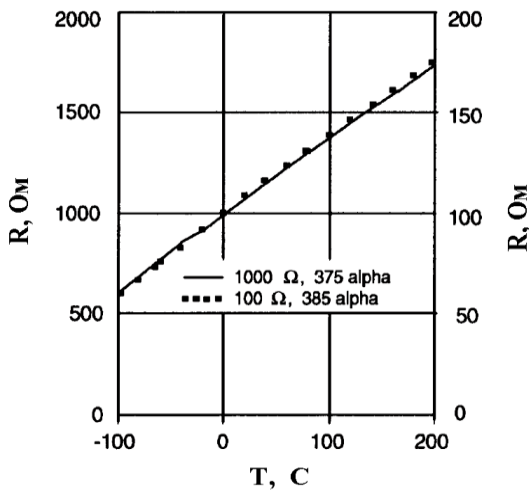


Рис. 2 – Типова залежність опору терморезистора від його температури [12].

В цій формулі:  $R(T)$  – значення опору (в омах) терморезистора при температурі –  $T$ ,  $R_0$  – значення опору (в омах) терморезистора при температурі –  $T = 0^\circ\text{C}$ ,  $T$  – температура терморезистора в градусах Цельсія. Крім того, необхідно мати на увазі ще й такі співвідношення для параметрів:  $A = \alpha + (\alpha \times \delta)/100$ ,  $B = (-\alpha \times \delta)/100^2$ ,  $C_{T=0} = (-\alpha \times \beta)/100^4$ , де коефіцієнти мають наступні значення [10].

Датчики підключені по мостовій схемі (рис. 3) Вимірвальний міст живиться стабільною напругою опорного джерела  $U_2$  потужність якого збільшується за допомогою повторювача на операційному підсилювачі  $U_9$ . Сигнал розбалансу підсилюється підсилювачем на ОП  $U_3$ , коефіцієнт підсилення якого регулюється за допомогою змінного опору  $R_9$ , для зсуву нульового рівня використовується змінний опір  $R_{13}$ .

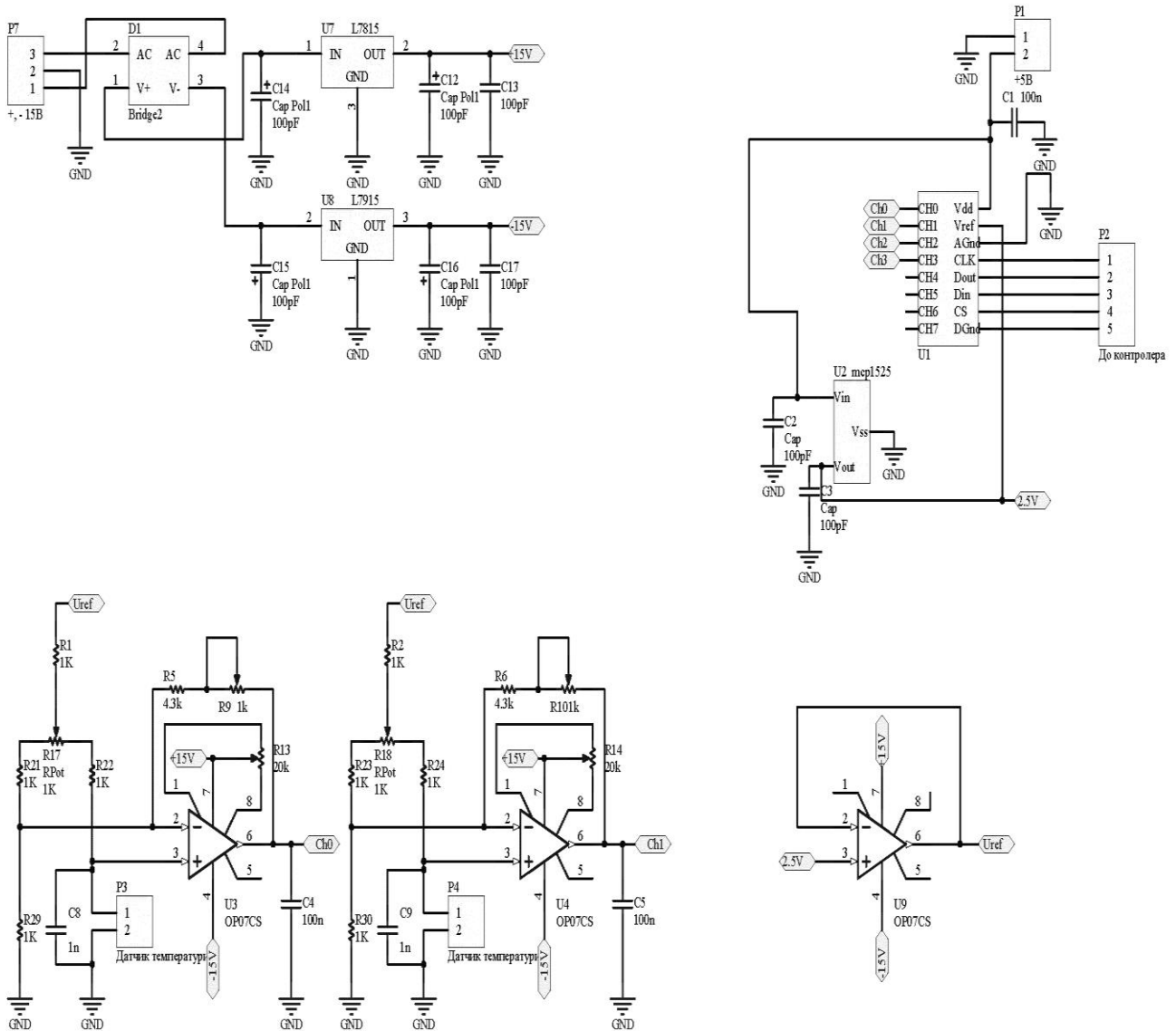


Рис. 3 – Схема вимірювання та контролю температури.

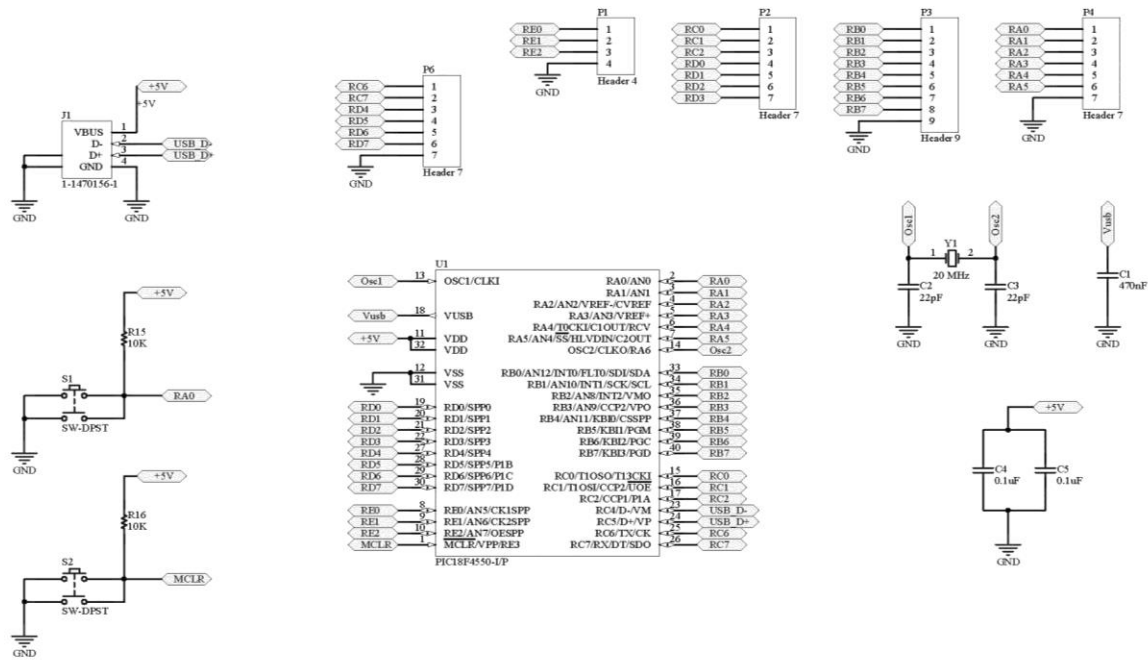


Рис. 4 – Схема плати контролеру

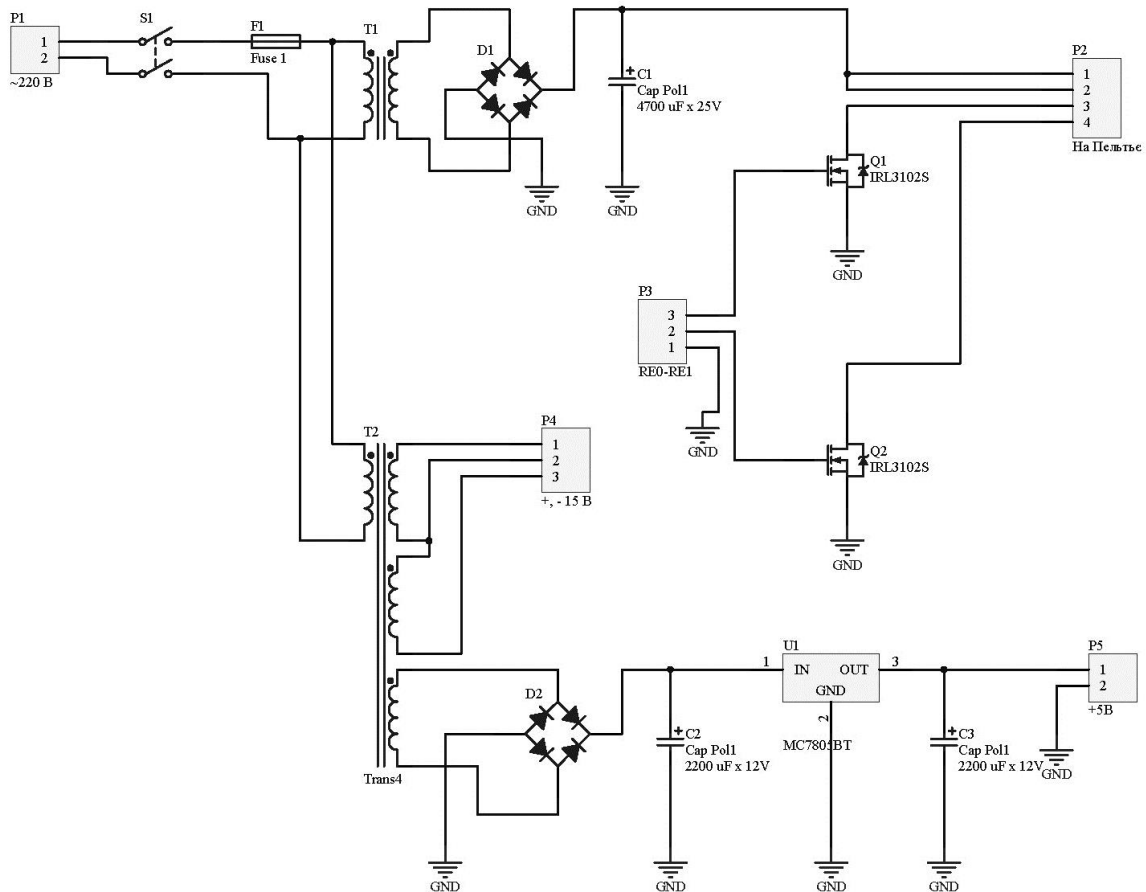


Рис. 5 – Схема блока живлення пристрою

Для підсилення сигналів з датчиків температури використовуються операційні підсилювачі OP07C.

Підсилений сигнал з датчиків температури подається на 12-бітний аналого-цифровий перетворювач MCP-3208 [12].

Взаємодія АЦП з іншими пристроями відбувається за допомогою 4-провідного послідовного SPI сумісного інтерфейсу, принцип дії та послідовність подачі сигналів для якого зображено на рис. 6.

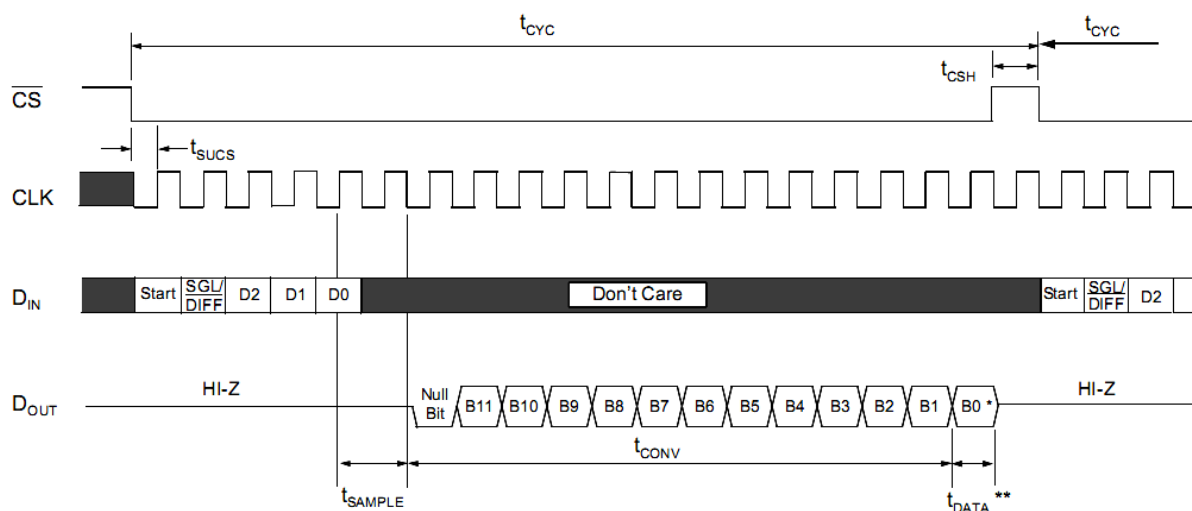


Рис. 6 – Залежності від часу сигналів послідовного інтерфейсу аналого-цифрового перетворювача MCP-3208

У якості джерела опорної напруги 2,5 В для АЦП використовується мікросхема MCP-1525 [13].

Дане джерело опорної напруги призначено для використання при аналого-цифровому та цифро-аналоговому перетворенні з розрядністю 8-12 біт і включено по типовій схемі.

Далі цифровий сигнал з АЦП подається на мікроконтролер. В якості мікроконтролера використана мікросхема фірми Microchip PIC18F4550, яка побудована по гарвардській архітектурі [13, 14].

Даний мікроконтролер був обраний виходячи з наступних міркувань: забезпечує необхідні режими керування, має апаратний модуль USB для зв'язку з комп'ютером, має достатню кількість портів вводу-виводу для подальшої модернізації і створення єдиного блоку керування ПЗЗ лінійкою, спеціалізованим АЦП для вимірювання сигналу ПЗЗ лінійки, управління кроковим двигуном для налаштування довжини хвилі спектрофотометру ДФС-452, тобто для створення єдиної спектрометричної системи.

В даній схемі мікроконтролер виконує наступні функції:

1. Керує роботою АЦП та обробляє отримані дані для визначення поточної температури.

2. При перевищенні температури теплої сторони елементів Пельтьє 35°C, що вказує на відсутність або недостатню ефективність відводу тепла від радіатора, забороняє будь-яке живлення елементів Пельтьє та формує сигнал аварії.

3. Генерує управляючі сигнали для блоку силових ключів. Температура регулюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Для забезпечення стабільної температури ПЗЗ датчика використовується пропорційний закон регулювання.

4. Забезпечує зв'язок з комп'ютером для встановлення необхідної температури та контролю її значення, з можливістю динамічного графічного зображення, що необхідно для коректної настройки коефіцієнту пропорційного регулювання.

Блок силових ключів вмикає та вимикає живлення елементів Пельтьє, для цього використовується широтно-імпульсна модуляція з частотою 500 Гц. Блок живлення формує напругу 12 В 12 А для жив-

лення елементів Пельтьє, +5 В для живлення АЦП, +5 В та -5 В для живлення операційних підсилювачів, для живлення контролера використовується напруга +5 В безпосередньо з шини USB.

Враховуючи те, що протокол USB досить складний, має багато параметрів, за основу для написання програми для контролера був використаний приклад, розроблений фірмою Microchip для демонстраційної плати. Драйвер для комп'ютера також, із тих же міркувань, був використаний із наведеного прикладу фірмою Microchip.

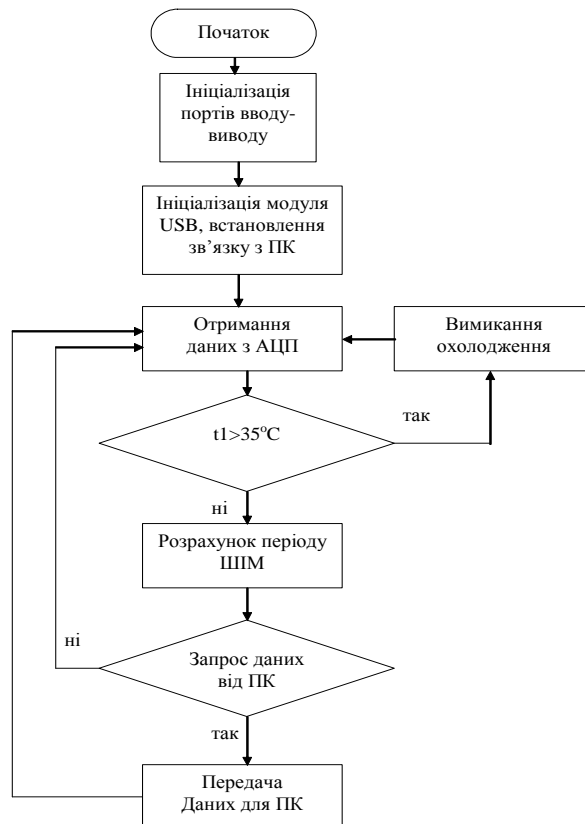


Рис. 7 – Алгоритм програми мікроконтролера

Нижче наведені приклади впливу роботи ПЗЗ на процес вимірювання спектру фотолюмінесценції.

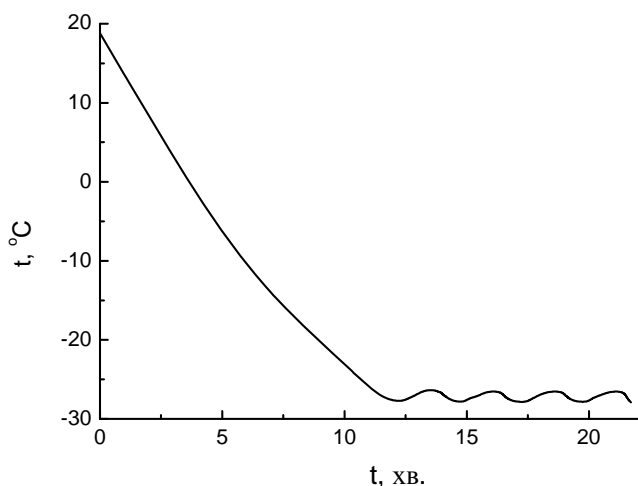


Рис. 8 – Температурна кінетика виходу на режим блоку охолодження

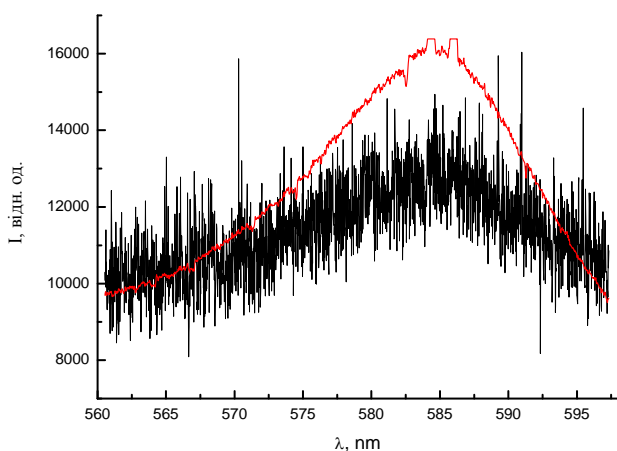


Рис. 9 – Спектр люмінесценції кристалу сульфїду цинку, який був зареєстрований при різних температурах ПЗЗ лінійки: 1)  $T = 19^\circ\text{C}$ , 2)  $T = -28^\circ\text{C}$

**Висновки.** В процесі виконання даної роботи були проведені теоретичні розрахунки одиночних та каскадних термоелектричних батарей. На основі цих розрахунків був сконструйований та випробуваний на працездатність пристрій термоелектричного охолодження (на ефекті Пельтьє) ПЗЗ-датчика. Випробування показало результати, які мають характеристики на тому самому рівні, що й зарубіжні аналоги.

Виявлено, що охолодження пристроїв приймачів випромінювання значно підвищує відношення сигнал/шум, а також загальну чутливість всієї реєструючої системи. Показано, що при побудові пристроїв охолодження елементів приймачів випромінювання доцільно використовувати термоелектричні елементи Пельтьє.

#### Список літератури:

1. Шостаковський, П. Г. Термоелектрические источники альтернативного электропитания [Текст] / П. Г. Шостаковський // Компоненты и технологии. – 2010. – № 12 (113). – С. 131–138.
2. Фрейк, Д. М. Досягнення і проблеми термоелектрики [Текст] / Д. М. Фрейк, Л. І. Никируй, О. С. Криницький // Фізика і хімія твердого тіла. – 2012. – Т. 13, № 2. – С. 297–318.
3. Maltezos, G. Thermal management in microfluidics using micro-Peltier junctions [Text] / G. Maltezos, M. Johnston, A. Scherer // Applied Physics Letters. – 2005. – Vol. 87, № 15. – P. 154105:1–154105:3. doi:[10.1063/1.2089174](https://doi.org/10.1063/1.2089174)

4. Анатичук, Л. И. Оптимальное управление свойствами термоелектрических материалов и приборов [Текст] / Л. И. Анатичук, В. А. Семенюк. – Черновцы: Прут, 1992. – 263 с.
5. Gurevich, Y. G. Physics of thermoelectric cooling [Text] / Yu. G. Gurevich, G. N. Logvinov // Semiconductor Science and Technology. – 2005. – Vol. 20, № 12. – P. 57–64. doi:[10.1088/0268-1242/20/12/r01](https://doi.org/10.1088/0268-1242/20/12/r01)
6. Dresselhaus, M. S. New directions for nanoscale thermoelectric materials research [Text] / M. S. Dresselhaus, G. Chen, M. Y. Tang, R. G. Yang, H. Lee, D. Z. Wang, P. Gogna et al. – Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2005. – 10 p.
7. Жарков, И. П. Низкотемпературное сканирующее устройство для микроволновой неразрушающей дефектоскопии [Текст] / И. П. Жарков О. М. Иващенко, Э. М. Руденко, И. В. Короташи, А. А. Краковный, В. В. Сафронов, В. А. Ходунов, А. Э. Руденко // Наука та інновації. – 2013. – Т. 9, № 3. – С. 13–18. doi:[10.15407/scin9.03.013](https://doi.org/10.15407/scin9.03.013)
8. Зенин, В. В. Охлаждение изделий микроэлектроники [Текст] / В. В. Зенин, Е. П. Новокрещенова, К. А. Мухин, Ю. В. Шарпов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 12-1. – С. 127–131.
9. Анатичук, Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства [Текст]: справочник / Л. И. Анатичук. – Киев: Наукова думка, 1979. – 385 с.
10. Вайнер А. Л. Каскадные термоэлектрические источники холода [Текст] / А. Л. Вайнер. – Москва: Советское радио, 1976. – 136 с.
11. 2.7V 4-Channel/8-Channel 12-Bit A/D Converters with SPI Serial Interface [Electronic resource] / Microchip. – 2008. – Available at: [www/URL: http://www1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21298e.pdf](http://www.url.com)
12. 2.5V and 4.096V Voltage References [Electronic resource] / Microchip. – 2012. – Available at: [www/URL: http://www1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21653C.pdf](http://www.url.com)
13. PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet [Electronic resource] / Microchip. – 2012. – Available at: [www/URL: http://www1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf](http://www.url.com)
14. Стрелкова, Т. А. Использование устойчивых законов распределения при оценке эффективности обработки сигналов в оптико-электронных системах [Текст] / Т. А. Стрелкова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 2/9 (74). – С. 4–10. doi:[10.15587/1729-4061.2015.39950](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39950)

#### Bibliography (transliterated):

1. Shostakovskii, P. G. (2010). Termoelektricheskie istochniki al'ternativnogo elektropitaniia. Komponenty i tehnologii, 12 (113), 131–138.
2. Freik, D. M., Nykyrui, L. I., Krynytskyi, O. S. (2012). Dosiahnennia i problemy termoelektryky. I. Istorychni aspekty (ohliad). Fyzyka i khimiiia tverdogo tila, 13 (2), 297–318.
3. Maltezos, G., Johnston, M., Scherer, A. (2005). Thermal management in microfluidics using micro-Peltier junctions. Applied Physics Letters, 87 (15), 154105:1–154105:3. doi:[10.1063/1.2089174](https://doi.org/10.1063/1.2089174)
4. Anatychuk, L. I., Semeniuk, V. A. (1992). Optimal'noe upravlenie svoistvami termoelektricheskikh materialov i priborov. Chernovtsy: Prut, 263.
5. Gurevich, Y. G., Logvinov, G. N. (2005). Physics of thermoelectric cooling. Semiconductor Science and Technology, 20 (12), 57–64. doi:[10.1088/0268-1242/20/12/r01](https://doi.org/10.1088/0268-1242/20/12/r01)
6. Dresselhaus, M. S., Chen, G., Tang, M. Y., Yang, R. G., Lee, H., Wang, D. Z., Gogna, P. et al. (2005). New directions for nanoscale thermoelectric materials research. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 10.
7. Zharkov, I. P., Ivashchenko, O. M., Rudenko, E. M., Korotash, I. V., Krakovnyy, A. A., Safronov, V. V., Khodunov, V. A., Rudenko A. E. (2013). The Low-Temperature Device for Microwave Non-Destructive Defectoscopy. Nauka Ta Innovacii, 9 (3), 13–18. doi:[10.15407/scin9.03.013](https://doi.org/10.15407/scin9.03.013)
8. Zenin, V. V., Novokreshchenova, E. P., Muhin, K. A., Sharapov, Iu. V. (2011). Ohlazhdenie izdelii mikroelektroniki. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta, 7 (12-1), 127–131.
9. Anatychuk, L. I. (1979). Termoelementy i termoelektricheskie ustroistva. Kyiv: Naukova dumka, 385.
10. Vainer, A. L. (1976). Kaskadnye termoelektricheskie istochniki holoda. Moscow: Sovetskoe radio, 136.

11. 2.7V 4-Channel/8-Channel 12-Bit A/D Converters with SPI Serial Interface. (2008). Microchip. Available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21298e.pdf>
12. 2.5V and 4.096V Voltage References. (2012). Microchip. Available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21653C.pdf>
13. PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet. (2009). Microchip. Available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>
14. Strelkova, A. (2015). Using stable distribution laws during evaluation of signal processing efficiency in optoelectronic systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(9(74)), 4–10. doi:10.15587/1729-4061.2015.39950

*Поступила (received) 08.01.2016*

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Розробка та виготовлення пристрою охолодження оптичного детектора/ М. Ф. Буланій, О. В. Хмеленко, Є. Г. Плахтій, Н. В. Гаращенко, С. Є. Фесенко**// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.74–78. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

**Разработка и изготовление устройства для охлаждения оптического детектора/ М. Ф. Буланій, О. В. Хмеленко, Е. Г. Плахтій, Н. В. Гаращенко, С. Е. Фесенко**// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.74–78. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

**Development and manufacturing equipment for the cooling optical detector/ М. F. Bulaniy, O. V. Khmelenko, E. G. Plahitiy, N. V. Garashenko, S. E. Fesenko**//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176) .– P. 74–78. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-5459.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Буланій Михайло Філімонович** – доктор фізико-математичних наук, Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, професор кафедри радіоелектроніки, пр. Гагаріна, 72, м. Дніпро, Україна, 49010.

**Хмеленко Олег Валерійович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, кафедра радіоелектроніки, Дніпропетровський національний університет імені О.Гончара, пр. Гагаріна, 72, м. Дніпро, Україна, 49010.

**Плахтій Євген Георгійович** – інженер кафедри радіоелектроніки, Дніпропетровський національний університет імені О.Гончара, пр. Гагаріна, 72, м. Дніпро, Україна, 49010; e-mail: [zhenya\\_kondor@mail.ru](mailto:zhenya_kondor@mail.ru).

**Гаращенко Нікіта Вячеславович** – магістр кафедри радіоелектроніки, Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, пр. Гагаріна, 72, м. Дніпро, Україна, 49010.

**Фесенко Станіслав Євгенович** – магістр кафедри радіоелектроніки, Дніпропетровський національний університет імені О.Гончара, пр. Гагаріна, 72, м. Дніпро, Україна, 49010.

**Буланій Михаил Филимонович** – доктор физико-математических наук, Днепропетровский национальный университет имени О.Гончара, профессор кафедры радиоэлектроники, пр. Гагарина, 72, г. Днепр, Украина, 49010.

**Хмеленко Олег Валерьевич** – кандидат физико-математических наук, Днепропетровский национальный университет имени О.Гончара, доцент кафедры радиоэлектроники, пр. Гагарина, 72, г. Днепр, Украина, 49010.

**Плахтій Евгений Георгиевич** – инженер кафедры радиоэлектроники, Днепропетровский национальный университет имени О.Гончара, пр. Гагарина, 72, г. Днепр, Украина, e-mail: [zhenya\\_kondor@mail.ru](mailto:zhenya_kondor@mail.ru)

**Гаращенко Никита Вячеславович** – магистр кафедры радиоэлектроники, Днепропетровский национальный университет имени О.Гончара, пр. Гагарина, 72, г. Днепр, Украина, Украина, 49010.

**Фесенко Станислав Евгеньевич** – магистр кафедры радиоэлектроники, Днепропетровский национальный университет имени О.Гончара, пр. Гагарина, 72, г. Днепр, Украина, 49010.

**Bulaniy Mikhail** – doctor of physico-mathematical science, professor, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Gagarin str., 72, Dnepr, Ukraine, 49010.

**Khmelenko Oleg** – candidate of physico-mathematical science, associate professor, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Gagarin str., 72, Dnepr, Ukraine, 49010.

**Plahitiy Evgen** – engineer of Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Gagarin str., 72, Dnepr, Ukraine, 49010; e-mail: [zhenya\\_kondor@mail.ru](mailto:zhenya_kondor@mail.ru).

**Garashchenko Nikita** – master, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Gagarin str., 72, Dnepr, Ukraine, 49010.

**Fesenko Stanislav** – master, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Gagarin str., 72, Dnepr, Ukraine, 49010.



УДК 519.7:619

**Е. В. ВЫСОЦКАЯ, Ю. Г. БЕСПАЛОВ, Л. И. РАК, А. И. ПЕЧЕРСКАЯ, К. В. ЦАПЕНКО****МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СОГЛАСОВАННОСТИ ПАРАМЕТРОВ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ АДАПТАЦИОННОГО СИНДРОМА**

Рассмотрена возможность использования для определения стадий генерализованного адаптационного синдрома меры согласованности значений таких параметров сердечно-сосудистой системы, как систолическое артериальное давление, диастолическое артериальное давление, частота сердечных сокращений. На основании значений этих параметров с использованием математического аппарата дискретных моделей динамических систем были получены идеализированные траектории работы сердечно-сосудистой системы, позволяющие не только определить стадию адаптационного синдрома, но и оценить функциональное состояние сердечно-сосудистой системы.

**Ключевые слова:** адаптационный синдром, дискретные модели динамических систем, траектория системы, латентный компонент.

Розглянуто можливість використання мір узгодженості значень таких параметрів серцево-судинної системи, як систолічний артеріальний тиск, діастолічний артеріальний тиск та частота серцевих скорочень для визначення стадій генералізованого адаптаційного синдрому. На підставі значень цих параметрів з використанням математичного апарату дискретних моделей динамічних систем були отримані ідеалізовані траєкторії роботи серцево-судинної системи, що дозволяють не тільки визначити стадію адаптаційного синдрому, але і оцінити функціональний стан серцево-судинної системи.

**Ключові слова:** адаптаційний синдром, дискретні моделі динамічних систем, траєкторія системи, латентний компонент.

The features of generalized adaptation syndrome, control over which is an effective tool for the treatment and prevention of many pathological conditions of the cardiovascular system are considered in the article. Status of adaptation and disadaptation is characterized by such non-invasively measured parameters as heart rate and blood pressure. These values were used to construct an idealized trajectories of the cardiovascular system. As the mathematical apparatus used discrete models of dynamic systems. The obtained trajectories reflect the changing states of the system cycle at different stages of development of generalized adaptation syndrome. As a result, the pair parameters which coherence indicators can be used for non-invasive diagnosis of the stage of generalized adaptation syndrome and forecast of its development, evaluation of the functional state of the cardiovascular system, diagnostic prepathological states, as well as descriptions of the features of adaptive reactions in different populations have been allocated.

**Keywords:** adaptation syndrome, discrete models of dynamic systems, trajectory of the system, latent component.

**Введение.** Количественное измерение разнообразия и выравнивания значимостей разных аспектов функционирования изучаемых систем важно для многих наук о живой материи. Вот уже около половины столетия оно широко используется в экологии, притом, что оценки полученных результатов весьма неоднозначны [1]. Серьезной и не получившей до сих пор удовлетворительного решения проблемой является выбор комплекса параметров системы, измерение разнообразия и выравнивания значений которых позволит оценивать определенные состояния системы, в частности как: неактивные и устойчивые, активные и неустойчивые, активные и устойчивые, неактивные и неустойчивые. Такие оценки важны не только в экологии, они присутствуют, например, в концепции темпераментов, а в рамках настоящей работы могут использоваться применительно к стадиям развития генерализованного адаптационного синдрома (ГАС). По Г. Селье, в ГАС можно выделить три стадии: тревоги или напряжения; резистентности (устойчивости) и истощения или дистресса. Именно третья стадия является основой для развития различных заболеваний человека.

Медицинская общественность из года в год констатирует прогрессирующее увеличение распространенности таких заболеваний, как гипертоническая болезнь, инфаркт миокарда, сахарный диабет, ожирение и других, которые называют «болезнями цивилизации» и «болезнями адаптации». Многие из них – родом из детства, и сегодня артериальная гипертензия, сахарный диабет и избыточная масса тела – частая патология среди детей, особенно в подростковом возрасте. Главным патогенетическим звеном в развитии заболевания в этих случаях являются нарушения в си-

стеме «центр регуляции – орган», а также диссонанс взаимодействия стресс-реализующих и стресс-лимитирующих систем. Сердечно-сосудистая система (ССС) человека является эффектором приложения активации симпато-адреналовой системы [2]. Именно частота сердечных сокращений и уровень артериального давления – основные параметры, характеризующие состояние человека в покое и при нагрузке, изменяющиеся при болезни и разного рода деятельности, а также отражающие стадии адаптации-дезадаптации.

В связи с этим контроль за течением ГАС может стать эффективным инструментом лечения и предупреждения многих патологических состояний.

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Для разработки способов контроля перспективным представляется подход, основанный на измерении, например – выраженной при помощи индекса Шеннона [3], меры разнообразия и выравнивания. В некоторых случаях комплекс диагностических параметров может быть уменьшен до двух, отражающих какие-то альтернативные аспекты функционирования адаптационных механизмов, а вместо выравнивания значений этой пары параметров может быть использована согласованность их значений с использованием в качестве ее меры значения коэффициента корреляции. Перспективность такого подхода, на наш взгляд, определяется возможностью широкого выбора непосредственно измеряемых для вычисления значения указанной меры параметров (что позволяет выбрать пары, удобные с точки зрения практической применимости). Проблема выбора таких пар параметров (связанных с определенными аспектами функционирования изучаемой системы) может быть решена

© Е. В. Высоцкая, Ю. Г. Беспалов, Л. И. Рак, А. И. Печерская, К. В. Цапенко. 2016

путем сравнения циклов изменения значений параметров в разных состояниях исследуемой системы (в нашем случае – на разных стадиях развития ГАС). Результатом такого сравнения должен быть выбор пар параметров, характер совпадения максимумов и минимумов значений которых в этих состояниях заметно различен. При использовании индекса Шеннона роль меры разнообразия играет количество параметров, использованных для вычисления значения этого индекса, меры выравнивания – степень совпадения максимумов и минимумов. При использовании коэффициента корреляции для пар признаков мера разнообразия, по понятным причинам, не используется, роль меры выравнивания играет мера согласованности.

В связи с желательностью использования максимально широкого набора диагностических параметров, измеряемых сравнительно простыми и дешевыми методами, возникает потребность в математическом аппарате и информационных технологиях (ИТ), позволяющих работать с исходным фактическим материалом, сравнительно небольшим по объему, имеющим погрешности и лакуны и не отражающим динамику изменений исследуемой системы в реальном времени. Такую возможность дают разрабатываемые в Харьковском национальном университете радиоэлектроники ИТ, базирующиеся на созданном в Харьковском национальном университете имени В. Н. Каразина новом классе математических моделей, получившем название дискретных моделей динамических систем (ДМДС), и уже нашедшем применение для формализованного описания поведения весьма широкого ассортимента живых систем [4 – 6]. ДМДС позволяет, в частности, на основе структуры корреляционных отношений между компонентами исследуемой системы описать идеализированную траекторию системы (ИТС), отражающую цикл смены ее состояний. Под сменой состояний, в данном случае, понимается смена при переходе от предыдущего условного шага по времени к текущему комбинаций значений (в условных баллах) компонентов системы. Сравнение ИТС, построенных для разных состояний, позволяет выделить пары параметров, показатели согласованности которых могут быть использованы для диагностики этих состояний [7–10]. Решение этой задачи, применительно к использованию неинвазивно измеряемых параметров функционирования ССС – для диагностики стадий развития ГАС является предметом настоящей работы.

**Материал и методика исследования траекторий функционирования ССС при разных стадиях ГАС.** Сравнимые ИТС строились на основе клинического материала обследований 287 подростков 12-18 лет с патологией ССС, из которых 67 человек перенесли миокардит в анамнезе, 14 имели артериальную гипертензию, у 206 была диагностирована вторичная кардиомиопатия. Всем пациентам проводилось общеклиническое обследование, включающее измерение ЧСС, систолического (САД) и диастолического (ДАД) артериального давления [11]; инструментальное: электрокардиография, эхо+доплерокардиография; клинический анализ крови по общепринятой методике.

При анализе ИТС использовалась также разность значений САД и ДАД – пульсовое артериальное давление (ПАД). Стадии развития ГАС определялись по лейкоцитарной формуле [12]. В роли четырех компонентов системы выступали значения САД, ДАД и ЧСС и четвертый латентный компонент (ЛК), с нулевыми значениями корреляции с САД, ДАД и ЧСС. Латентный компонент не имеет однозначного физического или физиологического смысла, он либо никак не связан САД, ДАД и ЧСС, либо связан с частью этих компонентов или с ними всеми отношениями типа «плюс-минус», поддерживающими состояние динамического равновесия системы. При построении ИТС использовался прием, получивший рабочее название «рехронизации», базирующийся на посылке, в соответствии с которой значения всех компонентов системы, относящиеся к определенной стадии развития ГАС, меняются в рамках одного цикла, но могут отражать разные его фазы (соответствующие в ИТС разным условным шагам по времени).

ИТС строились с помощью модификации ДМДС, использующей коэффициент корреляции по Спирмену и подход, основанный на законе Либиха, на материале следующих групп, отвечающих определенным стадиям развития ГАС:

– группа со стадией, характеризующейся процентом эозинофилов большим или равным единице и лимфоцитов большим 18 и меньшим или равным 28, в которой имела место малоактивная и устойчивая стратегия использования ресурсов (МАУС);

– группа со стадией, характеризующейся процентом эозинофилов большим или равным единице и лимфоцитов большим 28 и меньшим 32, в которой имела место высокоактивная и устойчивая стратегия использования ресурсов (ВАУС);

– группа со стадией, характеризующейся процентом лимфоцитов 32 и более или 37 и менее, в которой имела место высокоактивная и неустойчивая стратегия использования ресурсов (ВАНУС). Значения процента эозинофилов при этом могут быть любыми. В связи с неоднозначностью в наименовании и выделении соответствующих стадий ГАС в работах Г. Селье и Л. Х. Гаркави с соавторами [11] мы, в рамках настоящей работы, в качестве временных и рабочих, используем введенные выше рабочие термины и аббревиатуру.

Сформулированные в результате сравнительного анализа ИТС рабочие гипотезы относительно возможности использования меры согласованности значений вышеуказанных неинвазивных параметров для диагностики стадий развития ГАС, проверялись путем вычисления значений коэффициента корреляции по Спирмену.

**Полученные результаты и их обсуждение.** По результатам проведенного с помощью ДМДС моделирования были построены, представленные в табл. 1 – 3, ИТС, отражающие динамику САД, ДАД, ЧСС и ЛК, ее основные черты для случаев МАУС, ВАУС и ВАНУС. Значения параметров в таблицах выражены в условных баллах: один балл – низкие, 2 – средние, 3 – высокие. Максимальные, для данных таблиц значения параметров помечены жирным шрифтом; номера

столбцов, в которых находятся максимальные, для данной таблицы, значения ПАД, отмечены звездочкой.

Таблица 1 – ИТС, представляющая динамику параметров, соответствующую МАУС

Параметры	Номера условных шагов по времени														
	1	2	3	4	5	6	7	8*	9*	10*	11	12	13	14*	15*
САД	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	2	1	1	1	1
ДАД	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	1
ЧСС	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	3	3	3	2
ЛК	1	1	1	2	3	3	3	3	2	1	1	1	2	2	1

Как видно из табл. 1, для МАУС характерна заметная степень несовпадения максимумов значений ЧСС и САД. Этот аспект вполне укладывается в логику развития МАУС – стабильной стадии развития ГАС, с малой активностью использования ресурсов, стадии, которая характеризуется преобладанием тенденции к их сохранению и накоплению над тенденцией к расходованию. Такой логике соответствует стратегия обеспечения необходимого уровня функционирования ССС путем чередования фаз с высокими значениями силы и скорости сердечных сокращений: в ситуациях, когда нет необходимости в использовании сразу нескольких путей достижения этой цели и одновременной мобилизации соответствующих этим путям разных видов ресурсов. Этой логике соответствует и значительная стабильность высоких значений ДАД – в сравнении с гораздо менее выраженной стабильностью и большей, на протяжении цикла, динамичностью значений САД.

Таблица 2 – ИТС, представляющая динамику параметров, соответствующую ВАУС

Параметры	Номера условных шагов по времени									
	1	2	3	4	5*	6*	7	8	9	10
САД	1	1	1	2	3	3	3	3	3	2
ДАД	1	1	1	2	2	2	3	3	3	2
ЧСС	1	2	3	3	3	3	3	2	1	1
ЛК	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1

В идеализированных траекториях системы, построенных на материале ВАУС и ВАНУС (табл. 2, 3), максимумы значений ЧСС и САД сближены. В иде-

Таблица 3 – ИТС, представляющая динамику параметров, соответствующую ВАНУС

Параметры	Номера условных шагов по времени														
	1	2	3	4	5	6	7	8*	9*	10*	11	12	13	14*	15*
САД	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	2	1	1	1	1
ДАД	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	1
ЧСС	1	1	1	2	3	3	3	3	2	1	1	1	2	2	1
ЛК	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	3	3	3	2

В связи с этим сравнение вида ИТС, построенных для случаев ВАУС и ВАНУС, позволяют предположить, что для этих случаев может наблюдаться различие в степени согласованности значений САД и ПАД. Вышеописанные результаты сравнения вида ИТС, построенных для случаев ВАУС, ВАНУС с одной стороны и МАУС – с другой, позволяет также предположить, что в этом случае будут наблюдаться существенные различия по характеру корреляций между САД и ЧСС. Проверка этих рабочих гипотез стандартными статистическими методами на исходном фактическом (клиническом) материале подтвердила их. А именно:

лизированной траектории системы, построенной на материале МАУС (табл. 1), в отличие от случаев ВАУС и ВАНУС, совпадения максимумов ЧСС и САД нет ни на одном условном шаге по времени.

Причем в ИТС, построенной для ВАУС, этот аспект выражен сильнее (максимумы совпадают на трех условных шагах по времени) чем в ИТС, построенной для ВАНУС (совпадение только на одном шаге). В данном случае можно говорить о логике стратегий активного использования ресурсов, предполагающих одновременное использование нескольких их видов на некоторых фазах развития ГАС. При сравнении вида ИТС отличие между ВАУС и ВАНУС наблюдается также по характеру совпадения или несовпадения максимумов САД и ДАД. А именно: в случае ВАУС все максимумы ДАД наблюдаются на фоне максимумов САД, но не все максимумы САД наблюдаются на фоне максимумов ДАД, а в случае ВАНУС наблюдается обратная картина - все максимумы САД наблюдаются на фоне максимумов ДАД, но не все максимумы ДАД наблюдаются на фоне максимумов САД. Причем, в случае ВАНУС в десяти из пятнадцати условных шагов по времени, имеющих в ИТС, на фоне стабильно высоких трехбалльных значений ДАД наблюдаются все возможные (от одного до трех баллов) значения САД. Это означает, в частности, что на протяжении большей части цикла динамика значений ПАД, равных разности САД и ДАД, определяется динамикой САД и, соответственно – можно предположить хорошую согласованность значений ПАД и САД. Вид ИТС, построенной для случая ВАУС, оснований для такого предположения не дает.

-значения спирменовской корреляции между значениями САД и ПАД распределились следующим образом: случаям ВАУС и МАУС соответствовала положительная, статистически недостоверная ( $p > 0.05$ ) корреляция, случаю ВАНУС – положительная, статистически достоверная ( $p < 0.05$ );

- в выборках с вышеуказанными параметрами лейкоцитарной формулы, значения которых отвечают ВАУС и ВАНУС, наблюдались статистически недостоверные ( $p > 0.05$ ) положительные значения коэффициента корреляции по Спирмену между значениями САД и ЧСС, в случае МАУС наблюдалась отрицательная, статистически достоверная ( $p < 0.05$ ) корреляция.

Различие в характере корреляций САД и ПАД, вычисленных для случаев МАУС и ВАНУС при полном сходстве динамики этих параметров (табл. 1 и табл. 3), может, на наш взгляд, быть связано с влиянием значений ЧСС на значения САД. Речь идет о том, что различия в степени сближенности максимумов значений САД и ЧСС в случаях ВАУС и МАУС могут обусловить различия величины колебаний конкретных значений САД в пределах одно-, двух- и трех-балльных оценок, что повлияет на достоверность или недостоверность вычисленных на основе исходного клинического материала значений коэффициента корреляции значений САД и ПАД. Динамика ЛК, представленная в табл. 1, может свидетельствовать о его негативном влиянии на ЧСС, определяющем малую, в сравнении с ВАУС и ВАНУС, сближенность максимумов ЧСС и САД. В этих двух последних случаях динамика ЛК дает некоторые основания для предположения о, соответственно: стабилизации и уменьшения за счет влияния ЛК значений ДАД. Эти результаты моделирования не представляют интереса с точки зрения задачи, поставленной в настоящей работе. А вот результаты исследования характера согласованности значений САД, ПАД и ЧСС указывают на то, что применение ДМДС открывает перспективы разработки неинвазивных и достаточно простых в исполнении методов диагностики стадий развития ГАС. Физиологический смысл этих методов тесно связан с логикой определенных стратегий сбережения и использования адаптационных ресурсов человеческого организма, связанных с функционированием ССС.

**Выводы.** Результаты настоящей работы, рассматриваемые авторами как предварительные, могут применяться при описании особенностей адаптационных реакций, прогнозировании развития ГАС у разных категорий населения, а также диагностике предпатологических состояний. Снижение адаптационных возможностей сердца является отражением его болезни и приводит к стрессовому состоянию других органов и систем. Поэтому, предлагаемая ДМДС позволяет определить не только определенную стадию адаптационного синдрома, но и оценить функциональное состояние сердечно-сосудистой системы, что очень важно как для конкретного человека, так и для медицинской науки.

Вместе с тем, соответствующая интерпретация этих аспектов открывает новые подходы к решению такой весьма актуальной задачи современной медицины как разработка неинвазивных, пригодных для массового использования методов диагностики стадий развития ГАС.

#### Список литературы:

1. Шитиков, В. К. Оценка биоразнообразия: попытка формального обобщения [Текст] / В. К. Шитиков, Г. С. Розенберг // Структурный анализ экологических систем. Количественные методы экологии и гидробиологии. – Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. – С. 91–129.
2. Богмат, Л. Ф. Морфо-функциональні характеристики серця та показники нейрогуморальної регуляції у дітей і підлітків з патологією міокарда [Текст] / Л. Ф. Богмат, Л. І. Рак // Український кардіологічний журнал. – 2006. – №5. – С. 60–63.
3. Shannon, C. E. A mathematical theory of communication [Text] / C. E. Shannon // The Bell System Technical Journal. – 1948. – №27. – P. 379–423.
4. Biosafety issues of eutropicated sources of drinking-water supply in relation to the risk of mass development of toxic cyanobacteria: model of stability factors of zooplankton [Electronic resource] / K. Nosov, G. Zholtkevych, Y. Bespalov, Q. Mair // Konzept. – 2013. – №6. – Available at: <https://e-konzept.ru/en/2013/13125.htm>
5. Zholtkevych, G. Descriptive Models of System Dynamics [Text]: Proceedings of the 12th International Conference on ICT / G. Zholtkevych, K. Nosov, Yu. Bespalov, L. Rak, E. Vysotskaya, Y. Balkova, V. Kolomiychenko // Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer. – Kharkiv, 2016. – P. 57–72.
6. Zholtkevych, G. N. Discrete Modeling of Dynamics of Zooplankton Community at the Different Stages of an Antropogeneous Eutrophication [Text] / G. N. Zholtkevych, Y. G. Bespalov, K. V. Nosov, M. Abhishek // Acta Biotheoretica. – 2013. – № 61 (4). – P. 449–465.
7. Vysotskaya, E. V. Unmasking the soil cover's disruption by the dynamics of ground vegetation parameters [Text] / E. V. Vysotskaya, G. N. Zholtkevych, T. A. Klochko, Yu. G. Bespalov, K. V. Nosov // Вісник Національного Технічного Університету України «КПІ». Серія – Радіотехніка. Радиоапаратобудування. – 2016. – № 64. – С. 101–109.
8. Bespalov, Y. G. Using a discrete modeling of the dynamic systems in the environmental information systems [Text] / Yu. G. Bespalov, K. V. Nosov, E. V. Visotska, A. P. Porvan // Nauka I Studia. – 2013. – № 29 (97). – P. 55–58.
9. Bespalov, Yu. Discrete Dynamical Modeling of System Characteristics of a Turtle's Walk in Ordinary Situations and After Slight Stress [Text] / Yu. Bespalov, I. Gorodnyanskiy, G. Zholtkevych, etc. // Бионика интеллекта. – 2011. – № 3 (77). – С. 54–59.
10. Yakubovska, S. Developing a method for prediction of relapsing myocardial infarction based on interpolation diagnostic polynomial [Text] / S. Yakubovska, O. Vysotska, A. Porvan, D. Yelchaninov, E. Linyk // Eastern-european journal of enterprise technologies. – 2016. – Vol 5, №9(83). – P. 41–49. doi:[10.15587/1729-4061.2016.81004](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81004)
11. Еренков, В. А. Клиническое исследование ребенка [Текст] / В. А. Еренков. – К.: «Здоров'я», 1984. – 336 с.
12. Гаркави, Л. Х. Адаптационные реакции и резистентность организма [Текст] / Л. Х. Гаркави, Е. Б. Квакина, М. А. Уколова. – Ростов на Дону: Издательство Ростовского университета, 1990. – 224 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Shytykov, V. K., Rozenberh, H. S. (2005). Otsenka byroznoobrazzia: popytka formalnoho obobshchennia. Strukturnyi analiz ekolohycheskykh system. Kolychestvennye metody ekolohyy y hydrobyolohyy. Toliatty: SamNTs RAN, 91–129.
2. Bohmat, L. F., Rak, L. Y. (2006). Morfo-funktsionalni kharakterystyky sertsia ta pokaznyky neirohumoralnoi rehuliatcii u ditei i pidlitkiv z patolohiieiu miokarda. Ukrainnyi kardiologichnyi zhurnal, 5, 60–63.
3. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal, 27, 379–423.
4. Nosov, K., Zholtkevych, G., Bespalov, Y., Mair, Q. (2015). Biosafety issues of eutropicated sources of drinking-water supply in relation to the risk of mass development of toxic cyanobacteria: model of stability factors of zooplankton. Konzept: Scientific and Methodological E-Magazine, 9.
5. Zholtkevych, G., Nosov, K., Bespalov, Y., Rak, L., Vysotskaya, E., Balkova, Y., Kolomiychenko, V. (2016). Descriptive Models of System Dynamics. Proceedings of the 12th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer, 57–72.
6. Zholtkevych, G. N., Bespalov, Y. G., Nosov, K. V., Abhishek, M. (2013). Discrete Modeling of Dynamics of Zooplankton Community at the Different Stages of an Antropogeneous Eutrophication. Acta Biotheoretica, 61(4), 449–465.
7. Vysotskaya, E. V., Zholtkevych, G. N., Klochko, T. A., Bespalov, Y. G., Nosov, K. V. (2016). Unmasking the soil cover's disruption by modeling the dynamics of ground vegetation parameters. Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu Ukrainy «KPI». Serii – Radiotekhnika. Radioaпаратobuduvannia, 64, 101–109.
8. Bespalov, Y. G., Nosov, K. V., Visotska, E. V., Porvan, A. P. (2013). Using a discrete modeling of the dynamic systems in the environmental information systems. Nauka I Studia, 29 (97), 55–58.

9. Bespalov, Y., Gorodnyanskiy, I., Zholtkevych, G., Zaretskaya, I., Nosov, K., Bondarenko, T., Carrero, Y. (2011). Discrete Dynamical Modeling of System Characteristics of a Turtle's Walk in Ordinary Situations and After Slight Stress. *Byonyka Intellekta*, 3 (77), 54–59.
10. Yakubovska S., Vysotska O., Porvan A., Yelchaninov D., Linnyk E. (2016). Developing a method for prediction of relapsing myocardial infarction based on interpolation diagnostic polynomial. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 9 (83), 41–49. doi:[10.15587/1729-4061.2016.81004](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81004)
11. Erenkov, V. A. (1984). *Klynycheskoe issledovanye rebenka*. Kyiv: «Zdorovia», 336.
12. Harkavy, L. Kh., Kvakyna, E. B., Ukolova, M. A. (1990). *Adaptatsyonnye reaktsyi i rezystentnost orhanyzma*. Rostov na Dony: Izdatelstvo Rostovskoho unyversyteta, 224.

Поступила (received) 13.01.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Моделирование динамики согласованности параметров сердечно-сосудистой системы на разных стадиях адаптационного синдрома/ Е. В. Высоцкая, Ю. Г. Беспалов, Л. И. Рак, А. И. Печерская, К. В. Цапенко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.79–84. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Модельовання динаміки узгодженості параметрів серцево-судинної системи на різних стадіях адаптаційного синдрому/ О. В. Висоцька, Ю. Г. Беспалов, Л. І. Рак, А. І. Печерська, К. В. Цапенко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.79–84. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Modeling the dynamics of the cardiovascular system parameters coherence at different stages of the adaptation syndrome/ O. Vysotska, Yu. Bespalov, L. Rak, A. Pecherska, K. Tsapenko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P.79–84. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-5459.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Высоцкая Елена Владимировна** – доктор технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры Биомедицинской инженерии; пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166, e-mail: [olena.vysotska@nure.ua](mailto:olena.vysotska@nure.ua).

**Беспалов Юрий Гаврилович** – Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, старший научный сотрудник факультета Математики и информатики, площадь Свободы 4, г. Харьков, Украина, 61022; e-mail: [bespalov@univer.kharkov.ua](mailto:bespalov@univer.kharkov.ua).

**Рак Лариса Ивановна** – доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник отделения педиатрии и реабилитации, ГУ "Институт охраны здоровья детей и подростков НАМН Украины", пр. Юбилейный, 52-а, г. Харьков, Украина, 61153; e-mail: [lirack@yandex.ua](mailto:lirack@yandex.ua).

**Печерская Анна Ивановна** – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, научный сотрудник кафедры Биомедицинской инженерии; пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166, e-mail: [anna.pecherska@nure.ua](mailto:anna.pecherska@nure.ua).

**Цапенко Ксения Владимировна** – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, магистрант группы ИТБМм-16-1, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: [kseniia.tsapenko@nure.ua](mailto:kseniia.tsapenko@nure.ua).

**Висоцька Олена Володимирівна** – доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри Біомедицинської інженерії; пр. Науки, 14, г. Харків, Україна, 61166, тел.: 70-21-464; e-mail: [olena.vysotska@nure.ua](mailto:olena.vysotska@nure.ua).

**Беспалов Юрій Гаврилович** – Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, старший науковий співробітник факультету математики та інформатики, площа Свободи 4, м Харків, Україна, 61022;

**Рак Лариса Іванівна** – доктор медичних наук, провідний науковий співробітник відділення педіатрії та реабілітації, ДУ "Інститут охорони здоров'я дітей та підлітків НАМН України", Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, пр. Ювілейний, 52-А, м. Харків, Україна, 61153; e-mail: [lirack@yandex.ua](mailto:lirack@yandex.ua).

**Печерська Анна Іванівна** – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, науковий співробітник кафедри Біомедицинської інженерії; пр. Науки, 14, г. Харьков, Україна, 61166, тел.: 70-21-464; e-mail: [anna.pecherska@nure.ua](mailto:anna.pecherska@nure.ua).

**Цапенко Ксенія Володимирівна** – Харківський національний університет радіоелектроніки, магистрант групи ІТБМм-16-1, пр. Науки, 14, г. Харьков, Україна, 61166; e-mail: [kseniia.tsapenko@nure.ua](mailto:kseniia.tsapenko@nure.ua).

**Vysotska Olena** – doctor of technical sciences, professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, professor of Biomedical Engineering Department; Nauky ave, 14, Kharkov, Ukraine, 61166,

**Bespalov Yuriy** – V. N. Karazin Kharkiv National University, senior researcher at the Faculty of Mathematics and Informatics, Svobody Square, 4, Kharkov, Ukraine, 61022; e-mail: [bespalov@univer.kharkov.ua](mailto:bespalov@univer.kharkov.ua).

**Rak Larisa** – doctor of medical sciences, leading research worker of separation of pediatrics and rehabilitation care, SO "Institute of health of children and teenagers of NAMS of Ukraine", Yubilejny ave, 52-a, Kharkov, Ukraine, 61153; e-mail: [lirack@yandex.ua](mailto:lirack@yandex.ua).

**Pecherska Anna** – candidate of technical sciences, Kharkiv National University of Radioelectronics, researcher at the Department of Biomedical Engineering; Nauky ave, 14, Kharkov, Ukraine, 61166, e-mail: [anna.pecherska@nure.ua](mailto:anna.pecherska@nure.ua).

**Tsapenko Xenia** – Kharkiv National University of Radio Electronics, undergraduate group ИТБМм-16-1, Nauky ave, 14, Kharkov, Ukraine, 61166; e-mail: [kseniia.tsapenko@nure.ua](mailto:kseniia.tsapenko@nure.ua).



УДК 629.565.2

С. В. ТЕРЛИЧ

**АНАЛІЗ СУЧАСНИХ БЕЗКАРКАСНИХ СИСТЕМ ЗАЩИТТЯ ПРИМІЩЕНЬ В СУДНО- ТА ДОКОБУДУВАННІ**

У статті проаналізовано безкаркасні модульні системи формування суднових приміщень, які використовуються на сучасних українських та закордонних суднобудівних підприємствах. Описано їх конструкції, наведено конструктивні елементи, з'ясовано переваги перед каркасними системами захиття кают. Розглянуто та проаналізовано панелі захиття із тепло- та шумопоглинаючими наповнювачами. Наведений у статті аналіз буде використано при удосконаленні типових конструкцій вузлів формування суднових приміщень із урахуванням виробничих умов при будівництві (ремонті, реновації) суден та об'єктів морської техніки.

**Ключові слова:** суднові приміщення, плавучі доки, якість зашивочних елементів, модульні системи, чисельні методи.

В статье проанализированы бескаркасные модульные системы формирования судовых помещений, которые используются на современных и зарубежных судостроительных предприятиях. Описано их конструкции. Приведено конструктивные элементы. Обосновано преимущества перед каркасными системами зашивки кают. Рассмотрено и проанализировано панели зашивки с тепло- и звукопоглощающими наполнителями. Представленный в статье анализ будет использован при усовершенствовании типовых конструктивных узлов формирования судовых помещений с учетом отечественных производственных условий при строительстве (ремонте, реновации) судов и объектов морской техники.

**Ключевые слова:** судовые помещения, плавучие доки, качество зашивочных элементов, модульные системы, численные методы.

The constructive-technological features of the module-formations of the compartments in foreign modular systems, answering the demands to the finishing of vessels. The frameless systems of forming of ship locations used by leading foreign and Ukrainian corporations are analyzed. Their constructions are circumscribed the structural members and advantages before frame systems of a cladding of locations are given. The construction of the panel of a cladding about heat- and noise absorbing by the weighing materials is considered. The modern variants of the constructive and technological decisions of modular formations of ships and floating docks premises are considered and the expediency of their applications for ships and non-self-propelled structures are analyzed. The advantages of the proposed module-systems are given. The basic physical, chemical and technological properties of the elements of the modular system are considered. The applications in each case in the formation of residential and public areas of the vessel are grounded.

**Keywords:** ships premises, floating docks, cladding elements quality, modular systems, numerical methods

**Вступ.** Аналізуючи сучасні методи захиття суднових приміщень у світовому суднобудівництві слід зазначити, що найвідомішими закордонними компаніями найбільш широко використовуються безкаркасні системи. Під безкаркасною системою розуміється метод формування та опорядження суднових приміщень, при якому відсутній попередньо виготовлений та змонтований каркас, який використовується у якості опорної конструкції для елементів опорядження, а захиття приміщення виконується із щитів та панелей жорсткої конструкції; при цьому можуть використовуватися різноманітні з'єднання та елементи підсилення міцності. Останні встановлюють, як правило, разом із елементами захиття безпосередньо на судні.

**Постановка задач.** Модульне формування житлових, службових та суспільних приміщень є невід'ємною складовою добувального процесу при побудові суден та інших плавучих споруд. У наш час особливої уваги стосовно вдосконалення добувальних технологій заслуговують несамохідні плавучі споруди (НПС) які проектується та можуть бути побудовані на вітчизняних підприємствах. Перш за все це пов'язано із принципово новим підходом до проектування загального розташування приміщень та сучасними вимогами судовласників стосовно дизайну приміщень [1, 2]. Даний аналіз буде використаний для вдосконалення конструкторсько-технологічних рішень удосконалення модульних систем захиття в умовах вітчизняного виробництва. Аналіз публікацій, які присвячені аналізуванню даної задачі показав [1–4], що проблемам вдосконалення модульних систем формування кают присвячено багато праць, проте жодна з них не орієнтована безпосередньо на несамохідні плавзасоби, які на відміну від інших суден мають особливі розмірно-конструктивні характеристики приміщень.

**Аналіз дослідження сучасних безкаркасних систем захиття приміщень в судно- та докобудівництві.** Морські несамохідні плавучі споруди та берегові об'єкти до вантажних, спеціальних та промислових суден мають наступні відмінності, які варто враховувати при розробці модульної системи формування житлових, службових та суспільних приміщень:

- розмірно-конструктивні характеристики приміщень, які властиві тільки плав докам;
- особливості умов експлуатації плав доків, що вимагають більш жорстких протипожежних норм;
- велика кількість екіпажу.

Безкаркасні системи ведучих закордонних фірм, таких як "Isovolta" (Австрія), "Ippokamos" (Греція), "Rockwool" (Данія), "Norac" (Норвегія), "Keller" (Швейцарія), шведські фірми "Imac", "Norrbottnens", фінська "Stockfors" та вітчизняна M100 мають багато спільного щодо конструктивних рішень та матеріалів, що використовуються. Формування приміщення здійснюється із використанням П-подібних профілів, які кріпляться до корпусних конструкцій. В них послідовно встановлюють елементи захиття. Верхній профіль, як правило, має відігнаний фланець жорсткості, на який встановлюються панелі підволоки, а при необхідності стикування цих панелей по довжині використовується спеціальний гнучий профіль, який кріпиться на підвісках до розташованих вище корпусної конструкції. Системи відрізняються вузлами з'єднання елементів опорядження, виконанням фланців та торців панелей і щитів; використання різноманітних профілів опоряджувальних та з'єднуючих елементів забезпечує патентну чистоту конструктивно-технологічних рішень.

Основним несучим елементом конструкції захиття суднового приміщення для всіх безкарка-

© С.В. Терлич. 2016

сних систем є композитна панель (щит). Саме конструкція панелі є визначальною у виконанні комплексу вимог, що пред'являються в цілому до конструкцій зашиття житлових, суспільних та службових приміщень на судах.

Щити системи «NJA Isolamin Norrbottens» є трьохшаровою композитною конструкцією, що складається з облаштування – оцинкованих сталевих листів завтовшки 0,7 мм з декоративним поверхневим шаром з полівинілхлоридної плівки (металопласт) і внутрішнього шару з мінеральної вати «Rockwool» щільністю близько  $175 \text{ кг/м}^3$ . Вага щитів складає  $20 \text{ кг/м}^2$ . Безкаркасна система «Isolamin» – система готових елементів, що поставляються в комплекті з деталями їх кріплення. Кріплення щитів між собою здійснюється спеціальними сполучними профілями (рис. 1, 2).

«Rockwool TNF Panel System» – це безкаркасна модульна система з модулем ІМ (100 мм), що відповідає останнім технічним і архітектурним вимогам суднобудування і забезпечена промисловим виготовленням і постачанням елементів. Панелі складаються з облаштувань – шаруватий пластик завтовшки 1, 2 мм або сталевий лист, покритий декоративною плівкою, і серцевини з теплоізоляції «Rockwool». Панелі доставляються повністю готовими до установки модульних розмірів шириною від 100 до 600 мм, у тому числі є кутові і Т-подібні елементи. До конструктивних особливостей системи відносяться варіанти кріплення панелей (роз'ємне і нероз'ємне); застосування панелей різних типів у тому числі завтовшки 50 і 25 мм. Останні встановлюються у корпусних конструкціях (облаштувальне зашивання).

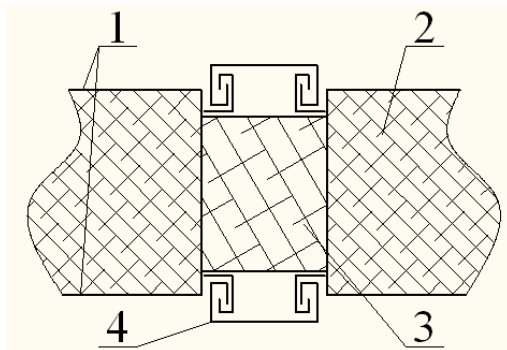


Рис. 1 – Зашиття “JMC”: 1 – металопласт; 2 – мінеральна вата ( $\rho = 160 \text{ кг/м}^3$ ); 3 – мінеральна вата ( $\rho = 300 \text{ кг/м}^3$ ); 4 – фіксуючий профіль

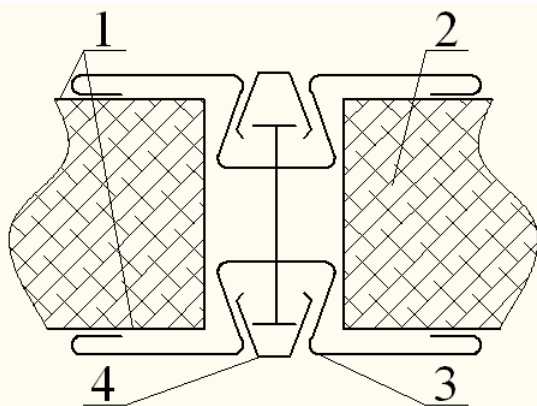


Рис. 2 – Зашиття “Isolamin”: 1 – металопласт; 2 – мінеральна вата; 3 – з'єднувальний профіль; 4 – розкладка

Кутові, Т-подібні і інші з'єднання щитів зашиття виконуються також спеціальними гнучими профілями, що встановлюються на самонарізних гвинтах. Щити «Isolamin» виготовляються розміром  $50 \times 600 \times 2440 \text{ мм}$ . Ця система проста в проектуванні і виробництві, ґрунтована на мінімальній кількості типорозмірів, проте вимагає підганяльних робіт застосування нарізного кріплення при монтажі конструкцій на судні і може мати ряд конструктивно-технологічних обмежень.

Нероз'ємне з'єднання (рис. 3) передбачає приховане кріплення сполучних профілів, при цьому по торцях панелей встановлена ізоляція жорсткого типу з пазами, що прорізають, для складання елементів. Роз'ємне з'єднання передбачає складений сполучний профіль з декоративною обробною розкладкою, що обтискає кінці сусідніх профілів. Можливий і спрощений варіант роз'ємного з'єднання за принципом системи «Isolamin» (рис. 2).

Типоряд панелей включає: звичайні панелі стандартної товщини; панелі шумопоглинаючі; панелі теплозвукоізоляційні, облашовані перфорованою сталлю з одного боку і оцинкованою сталлю з іншою, а також панелі, спеціально призначені для електропроводки і проходу кабелів. Відповідно до планування приміщень панелі і елементи поставляються необхідних розмірів і виконань, мають відповідну маркерівку. Поверхня панелей кодується спеціальним чином для зручності ідентифікації поверхні зашивання. Завдяки цьому під час опорядження судових приміщень усі типи модульних елементів можуть бути встановлені без підгонки і подальшого підрізування при монтажі. Система «Rockwool» відповідає усім умовам і вимогам, що пред'являються до системи зашиття приміщень на судах, і може бути аналогом при розробці вітчизняної системи.

Різноманітною по конструктивним рішенням є також безкаркасна система зашиття норвезької фірми «Norac». По застосовуваних матеріалах (металопласт, ізоляція – мінеральна вата) вона аналогічна розглянутому вище. Відзначено наступні варіанти конструктивних рішень системи:

- панелі тришарової конструкції товщиною 25 і 50 мм, стандартної ширини 600 мм, кріплення їх між собою виконується шляхом введення торця однієї панелі в іншу панель за рахунок особливої форми відігнутих фланців (рис. 4), при цьому застосовуються кутові елементи і різні сполучні профілі за типом системи «Isolamin»;

- панелі тришарової конструкції товщиною 25 і 50 мм, стандартної ширини 600 мм, їх з'єднання здійснюється за рахунок спеціального І-подібного з'єднувального профілю (варіант посилення конструкції зашивання);

- панелі двошарової конструкції в двохрядному виконанні перегородок (для збільшення звукоізоляції). У них в якості наповнювача використовується зміцнена ізоляція «Rockwool» щільністю  $220 \text{ кг/м}^3$ , повітряний проміжок між панелями 30 мм. Товщина дворядної перебирання 70 мм. З'єднання панелей здійснюється за допомогою жорсткого сталевого перфорованого елемента, що встановлюється між ними, і замикається в нього спеціального профілю, який притискає кромки

панелей. Особливість даного варіанта полягає в тому, що він близький до каркасного виконання (змонтованої конструкції), проте не вимагає попереднього монтажу каркасів, так як елементи з'єднання встановлюються спільно з панелями.

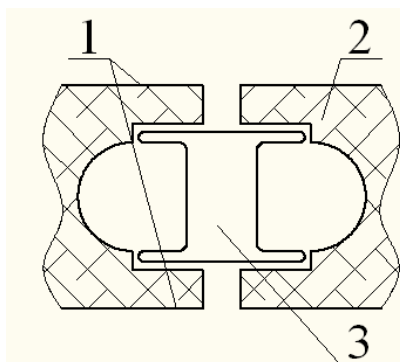


Рис. 3 – Система захисту “Rockwool”: 1 – металопласт; 2 – мінеральна вата; 3 – з’єднувальний профіль

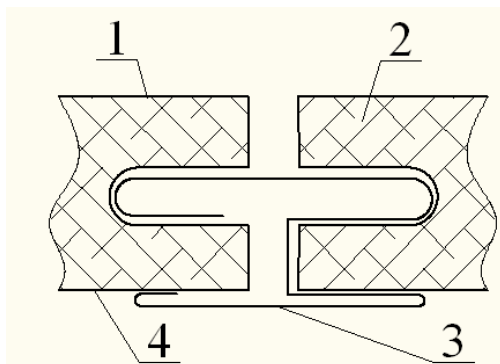


Рис. 4 – Система захисту «Imac»: 1 – металопласт; 2 – мінеральна вата; 3 – з’єднувальний профіль; 4 – оцинкована сталь

В системі «Nogac» (рис. 5) вирішені питання установки знімних панелей, проводки кабелів, стикування панелей по висоті приміщення та ін. Застосовуються два варіанти подволючних панелей-двошарові панелі 500×2450 мм завтовшки 52 мм з наповнювачем з мінеральної вати «Rockwool» щільністю 150 кг/м<sup>3</sup>, що мають відігнуті фланці спеціальної форми, перекривають стик панелей, і двошарові профільні панелі 300×3000 мм завтовшки 30 мм, з’єднання яких здійснюється за допомогою профільних елементів, крім того, додатково полягає в захисті подволюка суцільний шар мінеральної вати товщиною 50 мм щільністю 12 кг/м<sup>3</sup>.

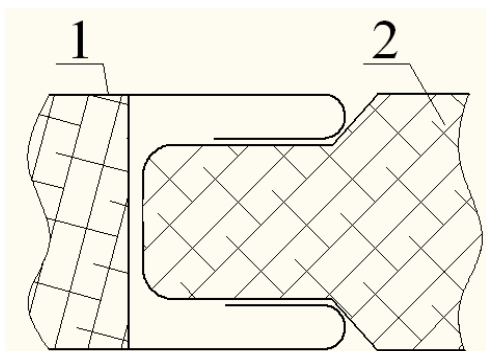


Рис. 5 – Система захисту “Nogac”: 1 – металопласт; 2 – мінеральна вата

У березні-вересні 1993 р. в Санкт-Петербурзі діяла виставка, де був представлений фрагмент безкаркасної системи захисту суднових приміщень шведської компанії «Imac» [5]. Необхідно відзначити, що ця компанія має широку кооперацію з виготовлення і постачання елементів захисту суднового устаткування з рядом фірм, в тому числі: «Isolamin» – виготовлення та поставка панелей і профілів формування приміщень; «Momek» – вогнезахисні судові двері; «Moelven E-Modul» – сантехнічні кабінки; «Perstorp» – декоративні пластинки; «Техмаг» – настили палуб. Конструктивні рішення по зашивці суднових приміщень базуються на елементах і рішеннях системи «Isolamin». Поряд з традиційними рішеннями, в системі «Imac» є і варіант, в якому панелі з’єднуються між собою безпосередньо за допомогою відігнутих особливим чином фланців на облаштованих оболонках, по типу системи «Nogac». Застосовуються кутові і Т-образні елементи. Панелі мають товщину 50 мм для міжкаютної перегородки 25 мм для захисту у перегородки всередині каюти або борта, а також можуть бути «посиленими» до 70 мм. Можуть поставлятися полегшені панелі за рахунок зменшення товщини оболонки до 0,5 мм і застосування мінераловатної ізоляції щільністю 80 кг/м<sup>3</sup>, що веде до зниження ваги стандартної панелі з 22 до 14 кг/м<sup>2</sup>. В системі застосовуються панелі з поліпшеною звукоізоляцією, панелі з вирізами під кабелі. Для захисту підволюки використовуються як тришарові панелі шириною 600 мм з оболонками спеціальної форми, так і двошарові профільні шириною 200 мм, вільно укладаються на відігнуті фланці верхнього П-подібного профілю, що кріпить стінові панелі. За рахунок багатоваріантності конструкцій і рішень в системі «Imac» можливе опорядження різних приміщень без різних конструкторсько-технологічних обмежень.

Наступна група безкаркасних систем захисту базується на застосуванні плитних негорючих матеріалів, що виготовляються на основі спученого вермикуліту.

В системі захисту австрійської фірми «Isovolta» плити «Thermax» разом з поставляючими сполучними профілями утворюють укомплектовану систему перегородок, стель і облаштувань для застосування на судах і бурових платформах.

Стандартна плита «Thermax» товщиною від 14 до 34 мм покрита з двох сторін пластиком. З’єднання плит може здійснюватися за допомогою омегаподібного профілю з декоративною розкладкою. Можливе з’єднання за допомогою сталеві шпунтової пластини (рис. 5). Для кращої звукоізоляції фірмою виготовляються комбіновані плити «Trezista» товщиною 32 і 50 мм, що складаються з двох плит «Thermax» товщиною 10 мм, облаштованих зовні пластиком, і серцевини з мінеральної вати «Rockwool» товщиною 28 або 10 мм. Можуть виготовлятися також плити «легкі» «Trezista», що складаються з мінераловатних плит, покритих пластиком, по торцях яких встановлені плити «Thermax» (рис. 5). Такий варіант застосовується, зокрема, грецькою фірмою «Ippokampos». Як облаштований матеріал в плитах «Trezista» використовують і металопласт. Плити «Thermax» випускаються довжиною 2200, 2400, 2500 мм і шириною 1250 і 625 мм, а плити «Trezista» – 200, 300, 400 та 600 мм.

Конструктивні рішення, що застосовуються при монтажі плит «Vermipan M» швейцарською фірмою

«Keller» – традиційні (рис. 6). Кріплення плит між собою здійснюється через сталеву шпунтову пластину, або за допомогою омегаподібного профіля за типом системи «Isolamin», або з використанням U-подібних профілів, що з'єднуються між собою гвинтами (рис. 7).

Відзначимо, що протягом довгих років оздоблювальні панелі «Vermiran M» застосовувалися в багатьох країнах світу для протипожежних перегородок, внутрішніх обшивок, підволоки та настилів на судах і морських платформах. Даний матеріал не містить ніяких шкідливих для здоров'я людини компонентів, при його обробці не утворюється шкідливої пилу. «Vermiran M» випускається плитами товщиною від 8 до 40 мм стандартним розміром 2440×1220 мм і може облаштуватися шаруватим пластиком.

Проаналізувавши конструктивно-технологічні рішення безкаркасних закордонних систем, зроблено ряд узагальнень. За принципом розмірної координації та виконання елементів системи можна заздалегідь розділити на модульні і немодульні. У модульних системах присутня розмірна координація конструкцій захиття і корпусних конструкцій судових приміщень; готові елементи захиття поставляються модульних розмірів і встановлюються в каюти без підгонки, є типізація елементів і конструкцій. У немодульних системах елементи захиття доставляються певних розмірів, на заводі-будівельника судна виробляють через підготовленості і підгонку елементів захиття «за місцем».

За конструктивним рішенням безкаркасні системи можуть мати однорядне і дворядне виконання. У першому випадку міжкаютні перегородки складаються з одного ряду щитів або панелей, при чому щити мають декоративну обробку з обох сторін. Це більш поширений варіант. У двохрядному виконанні міжкаютні перегородки складаються з двох рядів щитів або панелей. Цей варіант застосовується у разі підвищення міцності і звукоізоляційних властивостей конструкцій зашивання.

Елементи захиття в безкаркасних системах по конструкції можна розділити на трьох-, двох- і багатошарові. Тришарові панелі складаються з облаштованих з двох сторін плит з мінеральної вати або плитного матеріалу на основі спученого вермикуліту. Для облаштування використовують пластик або металоласт. Цей варіант плит застосовується в однорядному виконанні безкаркасних систем. Двошарові елементи для захиття підволоки або перегородок в двохрядному виконанні складаються зі сталеві оболонки з декоративним покриттям (металоласт) і ізоляційного матеріалу. Багатошарові композитні панелі (плити «Trezista») використовуються в конструкціях підвищеної звукоізоляції і міцності [6].

Відносно застосовуваних матеріалів слід зазначити, що в конструкціях використовуються негорючі відповідно до резолюції ІМО матеріали; нетоксичні, нешкідливі для здоров'я людини при виготовленні і при експлуатації. Всі конструкції обробки по вогнестійкості відповідають вимогам Міжнародної конвенції і, як правило, схвалені класифікаційними товариствами різних країн.

Основними матеріалами для облаштування елементів захиття служать пластик і металоласт (сталь

з декоративним покриттям). Шаруваті пластики використовують різних забарвлень товщиною 1,0...1,5 мм. Металоласт – сталь з гальванічним покриттям товщиною 0,5...0,7 мм з покриттям плівками ПВХ товщиною 0,15...0,3 мм різних забарвлень – застосовують для оболонок панелей і щитів і сполучних профілів і розкладок. У тришарових конструкціях на лицевій поверхні (з боку борту або корпусної перебірки) для облаштування застосовують оцинковану сталь.

Матеріалами для серцевини (наповнювачем) панелей і щитів служать мінеральна вата або плитний матеріал на основі вспученого вермикуліту. Мінеральна вата (як правило, застосовується ізоляція «Rockwool») щільністю від 30 до 200 кг/м<sup>3</sup> з поперечним розташуванням волокон забезпечує високу міцність елементів і захиття на стиск і на розрив.

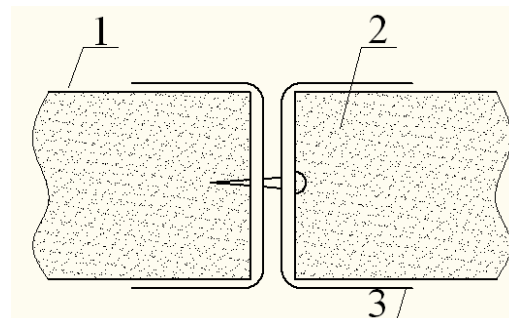


Рис. 6 – Система захиття «Keller+Co.Ag»: 1 – пластик; 2 – плита «Vermiran M»; 3 – з'єднувальний профіль

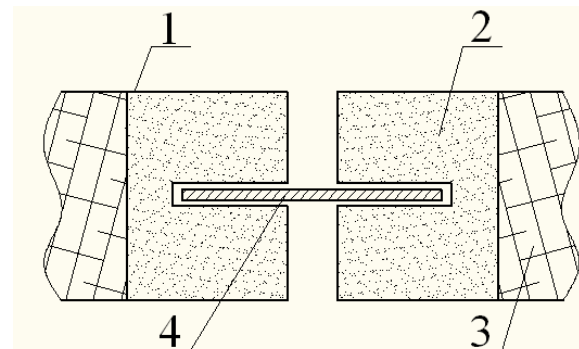


Рис. 7 – Система захиття «Isovolta»: 1 – пластик; 2 – плита «Thermax»; 3 – мінеральна вата; 4 – сталеві з'єднувальна пластина

Мінеральна вата випускається в Данії, Норвегії, Німеччині, Голландії та Швейцарії. Сировиною для її отримання є діабаз, який має вулканічне походження і складається з силікату SiO<sub>2</sub> – 41,5%, CaO – 16%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 13%, MgO – 10,5% та ін. Цей камінь плавиться при температурі 1600<sup>0</sup>С, простягається в нитки діаметром близько 5 мкм, на які наноситься водовідштовхувальна плівка, поєднуються нитки спеціальним зв'язуючим розчином.

Плитний матеріал на основі спученого вермикуліту («Thermax», «Vermiran M») щільністю до 800 кг/м<sup>3</sup> пресують в плити з надбавкою неорганічних зв'язуючих. Вермикуліт – вид слюди, яка містить кристалізовану воду, яка при нагріванні мінералу до температури близько 500<sup>0</sup>С розкладається і перетворюється на пар, роздуваючи окремі шари слюди, як гармошку. З точки зору хімії, вермикуліт є силікат магнію – алюмінію –



заліза з шаруватою структурою. Через здуття мінерал приймає приблизно 10-кратний обсяг і сприяє утворенню дуже пористого матеріалу, який поряд зі властивістю не піддається горінню проявляє хороші ізоляційні властивості. Матеріал не містить азбестових волокон і задовольняє новітнім нормам трудової гігієни [7–9].

Досвід використання безкаркасних систем зарубіжними фірмами свідчить, що ці системи захиття в порівнянні з каркасними значно скорочують час формування приміщень, підвищують культуру виробництва, покращують умови праці [9, 10]. Висока міцність панелей дозволяє кріпити устаткування безпосередньо до панелей або з'єднувальних профілів.

### Висновки

1. Багатоваріантність безкаркасних систем захиття, їх різноманіття засновані на загальній теоретичній концепції в розробці конструктивно-технологічних рішень, базою для яких являється комплекс конструктивно-оздоблювальних матеріалів, що випускаються промисловістю. При цьому використовуються матеріали і конструкції захиття, які в цілому задовольняють всім пропонованим до них вимогам.

2. В Україні в даний час застосовується каркасна модульна система формування і обробки суднових приміщень М100 в двохрядному і однорядному виконаннях і метод щитового захиття борту і перегородок плитами з імпортованих матеріалів. Система М100 розроблялася в кінці 70-х – початку 80-х років замість захиття плитами «Асбосіліт» і вимагає подальшого розвитку модульної концепції формування суднових приміщень. Виробництво конструкційно-опоряджувальних матеріалів і елементів опорядження для суднобудування потребує якісного оновлення і розвитку, відновлення старих та оновлення нових зв'язків по кооперації.

### Список літератури:

1. Корчевская, Н. М. Бескаркасные системы зашивки судовых помещений в зарубежном судостроении [Текст] / Н. М. Корчевская, А. С. Раиковский // Збірник наукових праць УДМУ. – 2000. – № 4 (370). – С. 17–30.
2. Щедролов, О. В. Современный стан модульного формирования помещений на плавучих доках [Текст] / О. В. Щедролов, С. В. Терлич // Збірник наукових праць НУК. – 2008. – № 1 (418). – С. 94–99.
3. Терлич, С. В. Методика автоматизированного параметрического проектирования конструкций элементов зашивки помещений для несамодонных плавучих сооружений [Текст] / С. В. Терлич // Современные информационные и инновационные технологии на транспорте. – 2010. – № 2. – С. 268–274.
4. Соловьев, С. Н. Энергосберегающая технология изготовления элементов тонкостенных конструкций судового оборудования [Текст]: мат. конф. / С. Н. Соловьев, А. В. Новошицкий // Современные проблемы судовой энергетики. – 2003. – С. 177–178.

5. Щедролов, А. В. Организация и технология поточного производства элементов модульной зашивки помещений рыбопромысловых судов [Текст]: сб. науч. тр. / А. В. Щедролов // Малотоннажное судостроение. – 1988. – С. 122–123.
6. Шагиданов, В. И. Модульное формирование помещений судов для охраны экономических зон и их оборудования [Текст] / В. И. Шагиданов // Морской Вестник. – 2007. – № 1. – С. 26–31.
7. Соловьев, А. С. Оценка технического уровня и качества судового оборудования, комплектующих и материалов [Текст] / А. С. Соловьев, Г. В. Тарича, А. В. Филимонов // Морской вестник. – 2015. – № 4 (56). – С. 49–51.
8. Концедаева, Ж. Г. Конструктивное обоснование обеспечения эксплуатационной безопасности корпусов кораблей при восприятии интенсивных локальных нагрузок [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Ж. Г. Концедаева; КГТУ. – Калининград, 2010. – 159 с.
9. Щедролов, О. В. Основы проектирования плавучих доков [Текст]: навч. пос. / О. В. Щедролов, О. С. Раиковский, М. Г. Служкий, О. М. Узлов. – Николаїв: РАЛ-поліграфія, 2011. – 231 с.
10. Пасичник, В. А. Конструктивно-технологічне моделювання композиційних конструкцій з використанням системного аналізу [Текст] / В. А. Пасичник, О. О. Хмуренко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 4/7 (76). – С. 15–20. doi:[10.15587/1729-4061.2015.47348](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47348)

### Bibliography (transliterated):

1. Korchevskaya, N. M., Milto, A. A. (2000). Beskarkasnye sistemy zashivki sudovykh pomeshhenij v zarubezhnom sudostroenii. Zbirnyk naukovykh prats UDMTU, 4 (370), 17–30.
2. Shhedrolov, O. V., Terlich S. V. (2008). Suchasnij stan modulnogo formuvannya primishhen na plavuchih dokakh. Zbirnyk naukovykh prats NUK, 1 (418), 94–99.
3. Terlych, S. V. (2010). Metodika avtomatizirovannogo parametricheskogo proektirovaniya konstruktsii elementov zashivki pomeshchenii dlia nesamohodnykh plavuchih sooruzhenii. Sovremennye informatsionnye i innovatsionnye tehnologii na transporte, 2, 268–274.
4. Solovev, S. N., Novoshickij, A. V. (2003). Energoberegayushhaya tehnologiya izgotovleniya elementov tonkostennykh konstruktsij sudovogo oborudovaniya. Sovremennye problemy sudovoi energetiki, 177–178.
5. Shhedrolov, A. V. (1988). Organizatsiya i tehnologiya potochnogo proizvodstva elementov modulnoj zashivki pomeshhenij rybopromyslovykh sudov. Malotonnazhnoe sudostroenie, 122–123.
6. Shagidanov, V. I. (2007). Modulnoe formirovanie pomeshhenij sudov dlya okhranyekonomicheskikh zon i ikh oborudovaniya. Morskoy Vestnik, 1, 26–31.
7. Solovyov, A. S., Tarica, G. V., Filimonov, A. V. (2015). Ocenka tekhnicheskogo urovnya i kachestva sudovogo oborudovaniya, komplektuyushhikh i materialov. Morskoy vestnik, 4 (56), 49–51.
8. Koncedaeva, Zh. G. (2010). Konstruktivnoe obosnovanie obespecheniya ekspluatatsionnoj bezopasnosti korpusov korablej pri vospriyatii intensivnykh lokalnykh nagruzok. Kaliningrad: KGTU, 159.
9. Shhedrolov, O. V., Rashkovskij, O. S., Sluckij, M. G., Uzlov, O. M. (2011). Osnovi proektuvannya plavuchikh dokov. Nikolaev: RAL-poligrafija, 231.
10. Pasichnyk, V., Khmurenko, O. (2015). Constructive-technological modeling of composite constructions using the system analysis. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(7(76)), 15–20. doi:[10.15587/1729-4061.2015.47348](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47348)

Поступила (received) 08.01.2016

### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз сучасних безкаркасних систем захиття приміщень в судно- та докобудуванні / С. В. Терлич// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.–. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Аналіз сучасних безкаркасних систем захиття приміщень в судно- та докостроєнні / С. В. Терлич// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.–. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.



**Analysis of modern frameless systems sewing facilities in the shipbuilding and dokostructure/ S. V. Terlych//**Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P. –. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Терлич Станіслав Володимирович** – Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, старший викладач кафедри "Суднобудування"; проспект Адмірала Ушакова, 44, м. Херсон, Україна, 73022; e-mail: [terlich@mail.ru](mailto:terlich@mail.ru).

**Терлич Станіслав Владимирович** – Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, старший преподаватель кафедры «Судостроение»; проспект Адмирала Ушакова, 44 м. Херсон, Украина, 73022; e-mail: [terlich@mail.ru](mailto:terlich@mail.ru).

**Terlych Stanislav Volodymyrovych** – Kherson branch of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, senior lecturer Department "Shipbuilding"; Avenue Admiral Ushakov, 44, Kherson, Ukraine, 73022; e-mail: [terlich@mail.ru](mailto:terlich@mail.ru).

УДК 519.213.7, 519.233.22

**В. Л. ШЕРГИН, Э. Э. ДЕРЕЗА, В. С. ПЕРЕДЕРИЙ**

### ОЦЕНИВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ХЁРСТА ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ЛЕВИ

Розглядається задача оцінювання показника Херста самоподібних випадкових процесів з альфа-стійкими прирістами. Проведено аналіз існуючих методів оцінювання показника Херста та висунута умова їхньої придатності щодо процесів Леви. Розв'язання поставленої задачі ґрунтується на застосуванні метода дробових моментів. Для процесів Леви з незалежними прирістами вирішено задачу оптимального підбору величини моменту. За рахунок цього забезпечується субефективне оцінювання характеристики самоподібності. У порівнянні з існуючими методами, запропонований характеризується простотою реалізації, набагато більшою швидкістю та меншими витратами пам'яті.

**Ключові слова:** показник Херста, процес Леви, стійки розподіли, оцінювання індексу стійкості, дробові моменти.

Рассмотрена задача оценивания показателя Хёрста самоподобных случайных процессов с альфа-устойчивыми приращениями. Проведён анализ существующих методов оценки показателя Хёрста и сформулировано условие их применимости к процессам Леви. Решение поставленной задачи основано на использовании метода дробных моментов. Для процесса Леви с независимыми приращениями решена задача оптимального подбора величины используемого момента, обеспечивающая субэффективное оценивание характеристики самоподобия. По сравнению с существующими, предложенный метод характеризуется простотой реализации, намного более высоким быстродействием и меньшими затратами памяти.

**Ключевые слова:** показатель Хёрста, процесс Леви, устойчивые распределения, оценка индекса устойчивости, дробные моменты.

The work proposes a method for estimating the stability index of alpha-stable distributions by using moments of fractional order. Provided numerical modeling has fully justified all of the results. Comparative analysis of the efficiency among the proposed method of estimating the stability index and widely used methods was performed. Proposal method is much simpler, far faster and substantially less memory required.

Estimation of Hurst exponent of self-similar stochastic processes with alpha-stable increments was performed. Methods of estimating Hurst exponent were analyzed. The condition of their applicability to the Lévy processes is formulated. For the Lévy processes with independent increments the problem of optimal selection the order of sample moment used is solved. Using a sample moments with proposed order provides sub-effective evaluation of the stability index which is also a characteristic of self-similarity.

**Keywords:** Hurst exponent, Lévy process, stable distributions, stability factor estimation, fractional moments.

**Введение.** Самоподобие является свойством, присущим широкому кругу процессов и явлений естественнонаучного, техногенного, информационного, экономического характера. Если при этом изучаемые процессы или явления подвержены фактору случайности, то говорят о статистическом самоподобии, то есть об инвариантности статистических характеристик случайных процессов относительно аффинных преобразований шкал измерения. Исследование свойств самоподобных случайных процессов представляет интерес как в теоретическом плане, так и с точки зрения практического применения. Настоящая статья посвящена одному из аспектов этой проблемы, связанному с математическим моделированием самоподобных случайных процессов и оценением показателя Хёрста, являющегося мерой масштабного самоподобия (скейлинга).

Процессы, обладающие свойствами самоподобия, можно разделить на две группы [1]: монофрак-

тальные и мультифрактальные. Монофрактальные процессы являются однородными в том смысле, что их скейлинговые характеристики остаются неизменными на любом диапазоне масштабов и обладают одним показателем скейлинга. Мультифрактальные процессы допускают разложение на участки с различными локальными масштабными свойствами и характеризуются спектром скейлинговых показателей.

Традиционно [2] в качестве модели самоподобных процессов используется модель фрактального броуновского движения [3], согласно которой приращения стохастического процесса

$\Delta X(t, \tau) = X(t + \tau) - X(t)$  предполагаются распределёнными по нормальному (гауссовскому) закону. Однако, такая модель не охватывает всего разнообразия стохастических процессов, обладающих свойством самоподобия, что отмечалось ещё Мандельбротом [4].

© В. Л. ШЕРГИН, Э. Э. ДЕРЕЗА, В. С. ПЕРЕДЕРИЙ. 2016

Ограничивающим фактором этой модели является гауссовость приращений. Более общей моделью является модель процесса Леви [5], согласно которой приращения случайной величины следуют симметричному  $\alpha$ -устойчивому (symmetric alpha-stable -  $S\alpha S$ ) распределению. Гауссовское распределение является частным случаем  $S\alpha S$ -распределения, соответствующим  $\alpha=2$ .

Существует множество методов оценивания параметров самоподобных и мультифрактальных процессов по временным рядам. При оценивании показателя Хёрста на практике наиболее часто используются методы нормированного размаха (RS-метод), изменения дисперсии ряда, флуктуационного анализа и другие [6]. При оценивании мультифрактальных характеристик одним из наиболее востребованных является метод мультифрактального детрендированного флуктуационного анализа (МФДФА) [7].

Вместе с тем, существующие методы оценивания показателя Хёрста (как обычного, так и обобщённого) ориентированы на модель случайного процесса с гауссовыми приращениями, а не с  $\alpha$ -устойчивыми. В силу того, что  $\alpha$ -устойчивые распределения не имеют моментов большего или равного порядка, чем  $\alpha$  [8], традиционные методы оценивания показателя Хёрста либо становятся неработоспособными, либо их применение теряет теоретическое обоснование. В связи с этим ставится задача анализа требований к методам оценки показателя Хёрста для процессов Леви и соответствующая модификация этих методов.

Для решения поставленной задачи предполагается рассмотреть математические модели самоподобных случайных процессов, уделив особое внимание процессу Леви, проанализировать ограничения, налагаемые на методы оценивания показателя Хёрста при их применении к процессам Леви. В работе будет показано, что предложенный метод оценивания индекса устойчивости с помощью дробных моментов позволяет также получать и оценку показателя Хёрста в случае, когда приращения случайного процесса являются независимыми. Взгляд на перспективы и направления дальнейших исследований завершает работу.

**Математические модели самоподобных случайных процессов.** Стохастический процесс  $X(t)$ ,  $t \geq 0$  с непрерывной действительной переменной времени называется *самоподобным* с параметром  $H$ ,  $0 < H < 1$ , если для любого вещественного значения  $a > 0$  законы распределения  $\text{Law}\{\cdot\}$  для  $X(t)$  и  $a^{-H}X(at)$  совпадают. Очевидно, что в этом случае законы распределения  $X(at)$  и  $a^H X(t)$  также будут совпадать:

$$\text{Law}\{X(at)\} = \text{Law}\{a^H X(t)\}. \quad (1)$$

Параметр  $H$ , называемый *показателем Хёрста*, представляет собой меру самоподобия стохастического процесса.

Дальнейшими обобщениями монофрактальных самоподобных процессов (1) являются нестационарные самоподобные процессы

$$\text{Law}\{X(at)\} = \text{Law}\{a^{H(a)} \cdot X(t)\}, \quad (2)$$

и мультифрактальные процессы

$$\text{Law}\{X(at)\} = \text{Law}\{a^{H(a)} \cdot X(t)\}. \quad (3)$$

В обоих случаях показатель Хёрста не является постоянным. Важно отметить, что модели стационарных, нестационарных и мультифрактальных самоподобных процессов (1)-(3) являются *инвариантными* относительно вида самого закона распределения случайной величины  $X(t)$ , или её приращений  $\Delta X(t, \tau) = X(t + \tau) - X(t)$ . На практике к закону распределения приращений предъявляется естественное требование бесконечной делимости [5], что обеспечивает инвариантность закона распределения приращения случайной величины относительно количества отсчётов временного ряда, за которое оно берётся.

В традиционной модели *фрактального броуновского движения* [3] случайный процесс  $X(t)$ ,  $t \geq 0$  наделяется следующими свойствами:

- процесс начинается в точке 0 ( $X(0) = 0$ );
- выполняется свойство *непрерывности* (справа):  $\forall \varepsilon > 0 \lim_{h \rightarrow 0} P(|X(t+h) - X(t)| \geq \varepsilon) = 0$ ;
- приращения являются *стационарными*, т.е. закон распределения  $\Delta X(\tau) = X(t + \tau) - X(t)$  не зависит от  $t$ ;
- приращения следуют *нормальному* (гауссовскому) закону распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной  $\sigma^2 \cdot \tau^{2H}$ :

$$\Delta X(\tau) \rightarrow N(\tau; 0, \sigma \cdot \tau^H). \quad (4)$$

Частным случаем такой модели, соответствующей  $H = 1/2$ , является модель одномерного случайного блуждания (процесс Винера). В этом (и только в этом) случае приращения являются *независимыми*.

**Процессы Леви.** Обобщением модели винеровского процесса является процесс Леви (называемый также "полёт Леви" – Levy flight [4]). Отличие состоит в том, что закон распределения приращений не гауссовский (4), а  $\alpha$ -устойчивый  $g(x; \alpha, \beta, \gamma, \delta)$ :

$$\Delta X(\tau) \rightarrow g(\tau; \alpha, \gamma). \quad (5)$$

Параметры  $\alpha$ -устойчивых законов имеют следующий смысл [8]:  $\alpha \in (0, 2]$  – параметр устойчивости;  $-1 \leq \beta \leq 1$  – параметр асимметрии;  $\gamma > 0$  – параметр масштаба;  $-\infty < \delta < \infty$  – параметр положения (смещения).

Для моделирования приращений процесса Леви обычно рассматриваются симметричные  $\alpha$ -устойчивые законы ( $S\alpha S$ -законы), т.е.  $\beta = \delta = 0$ , что и было отражено в (5).

Основным свойством  $\alpha$ -устойчивых законов является устойчивость к суммированию: сумма конечного числа таких величин с одинаковым

значением  $\alpha$  (и произвольными  $\beta, \gamma, \delta$ ) также следует  $\alpha$  – устойчивому закону:

$$\begin{aligned} Law\{X_1 + X_2 + \dots + X_n\} &= Law\{X_0\}, \\ X_i &\rightarrow g(x; \alpha, \beta_i, \gamma_i, \delta_i), \quad i = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (6)$$

Кроме того, такие законы инвариантны к линейным преобразованиям: если  $X \rightarrow g(x; \alpha, \beta, \gamma, \delta)$ , то

$$Y = aX + b \rightarrow g(y; \alpha, \beta, \gamma | a, \delta + b). \quad (7)$$

Из (6), (7), в частности, следует, что для одинаково распределённых случайных величин  $X_i \rightarrow g(x; \alpha, \beta, \gamma, \delta)$  справедливо

$$Law\{c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_n X_n\} = Law\{c_0 X_i\}. \quad (8)$$

При этом выполняется соотношение

$$c_0^\alpha = \sum_{i=1}^n c_i^\alpha. \quad (9)$$

Из приведённых свойств  $\alpha$  – устойчивых законов следует, что если приращения стохастического процесса  $\Delta X(t, \tau) = X(t + \tau) - X(t)$  следуют  $S\alpha S$ -закону (5), то они являются *независимыми*, а сами значения  $X(t)$ ,  $t \geq 0$  также следуют  $S\alpha S$ -закону (с тем же значением  $\alpha$ ). При этом для каждого  $c > 0$ ,  $t \geq 0$  выполняется соотношение

$$Law\{X(ct)\} = Law\{c^{1/\alpha} X(t)\}. \quad (10)$$

Сравнивая выражения (1) и (10), понятно, что альфа-устойчивые процессы Леви с независимыми приращениями обладают свойствами самоподобия с показателем Хёрста, равным

$$H = 1/\alpha. \quad (11)$$

Подобно тому, как модель одномерного случайного блуждания (винеровского процесса) была обобщена до модели фрактального броуновского движения путём введения в (4) показателя Хёрста, модель процесса Леви также можно рассматривать в обобщённом варианте, допуская, что показатель Хёрста является самостоятельным параметром, не обязательно равным (11).

**Особенности оценивания показателя Хёрста для процессов Леви.** Непосредственно из определяющего свойства (1) самоподобного случайного процесса следует, что его начальные моменты имеют вид

$$\begin{aligned} \eta_q &= M\{|X(t)|^s\} = M\{|t^H X(1)|^s\} = \\ &= t^{sH} M\{|X(1)|^s\} = C(s) \cdot t^{sH}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $C(s) = M\{|X(1)|^s\} = const(t)$ .

Соотношение (12) является основой для

построения и математического обоснования методов оценивания показателя Хёрста, таких, как метод изменения дисперсии ряда, флуктуационного анализа, метод МФДФА [9]. Параметр  $s > 0$  в (12) является свободным и его обычно выбирают равным единице (метод линейной размерности), двум (метод изменения дисперсии ряда), или произвольно, предоставляя выбор пользователю (метод флуктуационного анализа). Если для моделей с гауссовским приращением такой подход вполне обоснован, то в случае процессов Леви следует учитывать, что  $\alpha$  – устойчивые распределения (при  $\alpha \neq 2$ ) обладают моментами только в диапазоне  $-1 < s < \alpha$ .

По этой причине метод изменения дисперсии ряда, как и весьма популярный метод нормированного размаха ( $RS$ -метод), неприменимы к оцениванию показателя Хёрста процессов Леви. Более того, выборочные оценки начальных моментов (12)

$$Z_n(s) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |X(k\tau)|^s, \quad (13)$$

будут иметь ограниченную дисперсию только при  $s < \alpha/2$ . По этой причине оценивание показателя Хёрста методом линейной фрактальной размерности ( $s=1$ ) хоть и допустимо, но точность оценивания будет низка; дисперсия получаемых оценок показателя Хёрста будет неограничена.

Таким образом, для оценивания показателя Хёрста процессов Леви можно применить метод флуктуационного анализа, или его обобщение МФДФА, однако на величины используемых моментов следует наложить ограничение:

$$0 < s < \alpha/2. \quad (14)$$

При этом значение показателя устойчивости  $\alpha$  может быть как заранее известным, так и нет. В последнем случае оценивание показателя Хёрста должно, очевидно, предваряться оцениванием показателя устойчивости.

Одним из перспективных методов оценки показателя устойчивости  $\alpha$  -устойчивых случайных величин является метод дробных моментов [10].

**Оценивание индекса устойчивости методом дробных моментов.** В методе дробных моментов индекс устойчивости ( $\alpha$ ) оценивается с помощью выборочных моментов (13) дробного порядка  $s$ . При этом величина этого дробного порядка итеративно подбирается так, чтобы получаемые оценки индекса устойчивости были субэффективными, т.е. имели бы минимально достижимую в рамках применяемого метода дисперсию. Точная оценка индекса устойчивости имеет вид:

$$\alpha(n, s) = \frac{s}{1 - \Gamma^{-1}(\chi(s) \cdot Z_n(s))} = \frac{s}{1 - \Gamma^{-1}(1 + Y_n(s))}, \quad (15)$$

где введены обозначения  $Y_n(s) = \chi(s) \cdot Z_n(s) - 1$ ,  $\chi(s) = \cos(\frac{\pi s}{2}) \cdot \Gamma(1-s) \geq 1$ .

Оценка (15), несмотря на простоту

математической записи, имеет очевидный недостаток, связанный с использованием функции  $\Gamma^{-1}(u)$ , обратной к гамма-функции  $u = \Gamma(x)$ . Эта функция не только не относится к элементарным (с точки зрения математики), но и не реализована ни в одном из известных инженерных и математических пакетов. В связи с этим в [11] предложено аппроксимировать (15) выражениями

$$\begin{aligned} \alpha_1(n, s) &\approx s(a_1 + b_1 Y_n^{-1}(s)), \text{ или} \\ \alpha_2(n, s) &\approx s(a_2 + b_2 Y_n^{-1}(s) + c_2 Y_n^{-2}(s)), \end{aligned} \quad (16)$$

где  $a_1 = 1.19236$ ,  $b_1 = 0.64072$ ,  
 $a_2 = 1.11877$ ,  $b_2 = 0.70107$ ,  $c_2 = -0.012374$ .

В работе [11] показано, что при  $s \in (-1; 0) \cup (0; \alpha)$  (случай  $s = 0$  следует исключить как вырожденный) оценки (15) являются состоятельными и несмещёнными, а смещение оценок (16) невелико, обусловлено погрешностью разложения в ряд функции  $\Gamma^{-1}(u)$  и может быть уменьшено за счёт увеличения числа членов ряда.

Полученное выражение дисперсии оценок  $D[\alpha(n, s)]$  имеет вид

$$D[\alpha(n, s)] \approx \frac{b^2 D_0(\alpha, s)}{n}, \quad \text{где}$$

$$D_0(\alpha, s) = \frac{s^2 \left( \frac{\chi^2(s)}{\chi(2s)} \Gamma(1 - 2\frac{s}{\alpha}) - \Gamma^2(1 - \frac{s}{\alpha}) \right)}{(\Gamma(1 - \frac{s}{\alpha}) - 1)^4}. \quad (17)$$

Из выражения (17) следует, что дисперсия оценок (15)-(16) является конечной на интервале  $s \in (-\frac{1}{2}; \frac{\alpha}{2})$ . График функции  $D_0(\alpha, s)$  представлен на рис. 1.

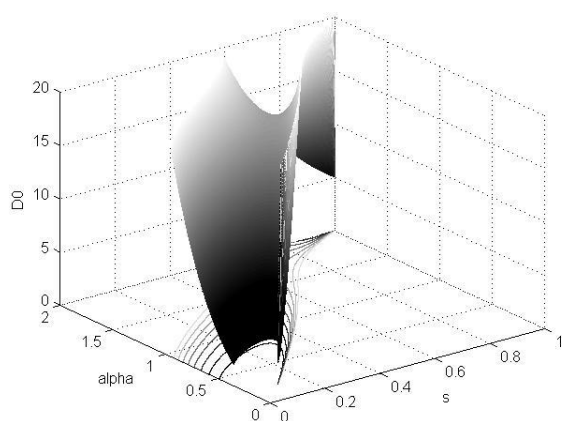


Рис. 1 – График асимптотической дисперсии оценок  $D_0(\alpha, s)$  по модели (16)

Приведённый график иллюстрирует тот факт, что для каждого значения оцениваемой величины  $\alpha$  существуют оптимальные значения дробного порядка  $s_{\min}(\alpha) = \arg \min_{-1/2 < s < \alpha/2} (D_0(\alpha, s))$ , обеспечивающие

локальный минимум величине асимптотической дисперсии оценок.

Эта зависимость может быть аппроксимирована выражением

$$s_{\min}^{pow} = 0.35281 \cdot \alpha^{1.2332}, \quad (18)$$

Таким образом, для оценки индекса устойчивости можно применить простейшую итерационную процедуру:

$$s^{(m+1)} = s_{\min}^{pow}(\alpha(n, s^{(m)})), \quad m = 1, 2, \dots \quad (19)$$

где функции  $s_{\min}^{pow}(\alpha)$  и  $\alpha(n, s^{(m)})$  вычисляются согласно (18) и (16) соответственно.

Условие выхода из (19) имеет вид  $|s^{(m+1)} - s^{(m)}| \leq tol$ . В качестве значений  $s^{(0)}$  и  $tol$  можно взять 0.25 и  $10^{-4}$  соответственно.

Результаты численного моделирования показали, что процедура (19) обеспечивает оценку индекса устойчивости в диапазоне  $0.6 < \alpha < 1.9$  с погрешностью  $tol = 10^{-4}$  не более, чем за пять итераций. Основным достоинством описанного метода является низкая вычислительная сложность, составляющая  $\theta(n)$  за одну итерацию (19). Основным компонентом вычислений является расчёт самих дробных моментов (13).

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** В работе рассмотрены математические модели самоподобных случайных процессов. Отмечено, что одной из таковых является модель процессов Леви, известная также как Levy flight. Проведён анализ существующих методов оценки показателя Хёрста и их применимость для процессов Леви. Он показал, что метод нормированного размаха и метод изменения дисперсии ряда неприменимы к анализу временных рядов, порождённых процессом Леви, а при использовании методов флуктуационного анализа и МФДФА на порядок используемых моментов накладывается ограничение:  $0 < s < \alpha/2 < 1$ . Рассмотрен частный случай процесса Леви, при котором приращения независимы. Вследствие этого показатель Хёрста и индекс устойчивости функционально связаны соотношением  $H = 1/\alpha$ . Для этого частного случая решена задача оптимального подбора величины используемого момента, обеспечивающая субэффективное оценивание характеристики самоподобия.

Направлением дальнейших исследований должно стать обобщение предложенного подхода, основанного на методе дробных моментов, на процессы Леви общего вида с целью подбора такого порядка момента, при котором обеспечивается наибольшая точность оценивания показателя Хёрста.

#### Список литературы

1. Kirichenko, L. Comparative analysis of statistical properties of the Hurst exponent estimates obtained by different methods [Text] / L. Kirichenko, T. Radivilova Eds. K. Markov, V. Velychko, O. Voloshin // Information Models of Knowledge. – 2010. – P. 451–459.
2. Кроновер, Р. Фракталы и хаос в динамических системах.

- Основы теории [Текст] / Р.Кронвер. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
3. Федер, Е. Фракталы [Текст] / Е.Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
  4. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы [Текст] / Б. Мандельброт. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
  5. Ширяев, А. Н. Основы стохастической финансовой математики [Текст] / А. Н. Ширяев. – М.: Фазис, 1998. – Т. 1. – 275 с.
  6. Clegg, R. G. A practical guide to measuring the Hurst parameter [Text] / R. G. Clegg // Arhiv preprint math/0610756. – 2006.
  7. Kantelhardt, J. W. Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis [Text] / J. W. Kantelhardt, E. Koscielny-Bunde, H.N.A. Rego, S. Havlin, A. Bunde // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2001, Vol. 295, Issues 3–4, P. 441–454. doi:10.1016/s0378-4371(01)00144-3
  8. Золотарев, В. М. Одномерные устойчивые распределения [Текст] / В. М. Золотарев. – М., Наука, 1983. – 304 с.
  9. Kirichenko, L. Analysis of the properties of ordinary Levy motion based on the estimation of stability index [Text] / L. Kirichenko, V. Shergin // Information Content and Processing. – 2014. – Vol. 1, No 2. – P. 170–181.
  10. Шергин, В. Л. Оценивание индекса устойчивости альфа-устойчивых распределений методом дробных моментов [Текст] / В. Л. Шергин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 6/4, – С. 25–30. Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/19176/17109>
  11. Шергин, В. Л. Аппроксимация оценки индекса устойчивости  $S\alpha S$ -распределений [Текст] / В. Л. Шергин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 1/4. – С.34–38. doi:10.15587/1729-4061.2014.20245
- Bibliography (tr ansliterated):**
1. Kirichenko, L., Radivilova, T., Markov, K., Velychko, V., Voloshin, O. (2010). Comparative analysis of statistical properties of the Hurst exponent estimates obtained by different methods. Information Models of Knowledge: ITHEA. Kiev-Sofia, 451–459.
  2. Kronover, R. (2000). Fraktaly i haos v dinamicheskikh sistemah. Osnovy teorii. Moscow: Postmarket, 352.
  3. Feder, E. (1991). Fraktaly. Moscow: Mir, 254.
  4. Mandel'brot, B. (2002). Fraktal'naja geometrija prirody. Moscow: Institut komp'yuternyh issledovanij, 656.
  5. Shirjaev, A. N. (1998). Osnovy stohasticheskoy finansovoy matematiki. Moscow: Fazis, 275.
  6. Clegg, R. G. (2006). A practical guide to measuring the Hurst parameter. Arhiv preprint math/0610756.
  7. Kantelhardt, J. W., Koscielny-Bunde, E., Rego, H. H., Havlin, S., & Bunde, A. (2001). Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 295(3-4), 441-454. doi:10.1016/s0378-4371(01)00144-3
  8. Zolotarev, V. M. (1983). Odnomernye ustojchivye raspredelenija. Moscow: Nauka, 304.
  9. Kirichenko, L., Shergin, V. (2014). Analysis of the properties of ordinary Levy motion based on the estimation of stability index. Information Content and Processing, 1 (2), 170–181.
  10. Shergin, V. (2013). Estimation of the stability factor of alpha-stable laws using fractional moments method. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(4 (66)), 25–30. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/19176/17109>
  11. Shergin, V. (2014). Approximation an estimate of the  $s\alpha s$ -distributions stability factor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(4 (67)), 34–38. doi:10.15587/1729-4061.2014.20245

*Поступила (received) 14.01.2016*

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Оцінювання показника Херста для процесів Леві/ В. Л. Шергін, Е. Е. Дереза, В. С. Передерій**// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.84–88. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

**Оценивание показателя Хёрста для процессов Леві/ В. Л. Шергин, Э. Э. Дереза, В. С. Передерий**// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.84–88. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

**Estimation the Hurst exponent of the ordinary Lévy process/ V. Shergin, E. Dereza, V. Perederiy**//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P. 84–88. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Шергін Вадим Леонідович** – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри штучного інтелекту; пр. Леніна, 14, м. Харків, Україна, 61166; e-mail: [vadim.shergin@nure.ua](mailto:vadim.shergin@nure.ua).

**Дереза Едуард Ернстович** – аспірант Харківський національний університет радіоелектроніки; кафедра штучного інтелекту; пр. Леніна, 14, м. Харків, Україна, 61166.

**Передерій Віталій Сергійович** – аспірант Харківський національний університет радіоелектроніки; кафедра штучного інтелекту; пр. Леніна, 14, м. Харків, Україна, 61166.

**Шергин Вадим Леонидович** – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры искусственного интеллекта; пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: [vadim.shergin@nure.ua](mailto:vadim.shergin@nure.ua).

**Дереза Эдуард Эрнстович** – аспирант, Харьковский национальный университет радиоэлектроники; кафедра искусственного интеллекта; пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166.

**Передерий Виталий Сергеевич** – аспирант, Харьковский национальный университет радиоэлектроники; кафедра искусственного интеллекта; пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166.

**Shergin Vadim** – Ph.D., associate professor, Artificial Intelligence department, Kharkiv National University of Radio Electronics; 14 Lenin Ave., 61166 Kharkiv, Ukraine; e-mail: [vadim.shergin@nure.ua](mailto:vadim.shergin@nure.ua).

**Dereza Eduard** – graduate student, Kharkiv National University of Radio Electronics; Artificial Intelligence department, 14 Lenin Ave., 61166 Kharkiv, Ukraine.

**Perederiy Vitaliy** – graduate student, Kharkiv National University of Radio Electronics; Artificial Intelligence department, 14 Lenin Ave., 61166 Kharkiv, Ukraine.



## ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЦТВА

УДК 699.814

Є. О. ТИЩЕНКО, І. В. РУДЕШКО, О. В. БАС

### ОСОБЛИВОСТІ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ СТИСНУТИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД

Описано методику визначення критичної температури сталевих стиснутих конструкцій підземних споруд з урахуванням закритичного деформування після втрати стійкості під дією нагрівання. Отримане значення критичної температури метала конструкцій використовується при розрахунках необхідної товщини вогнезахисних матеріалів. У закритичній стадії деформування прогин в небезпечному перерізі сталевих конструкцій зменшується, що в свою чергу сприяє зменшенню згинального моменту, а критичний стан настає при більш високій температурі, що дозволяє отримати економію вогнезахисних матеріалів.

**Ключові слова:** вогнестійкість, металеві конструкції, втрата стійкості при нагріванні, закритичне деформування, критична температура.

Описано методику определения критической температуры стальных сжатых конструкций подземных сооружений с учетом закритического деформирования после потери устойчивости под действием нагревания. Полученное значение критической температуры металла конструкций используется при расчетах необходимой толщины огнезащитных материалов. В закритической стадии деформирования прогиб в опасном сечении стальной конструкции уменьшается, что в свою очередь способствует уменьшению изгибающего момента, а критическое состояние наступает при более высокой температуре, что позволяет получить экономию огнезащитных материалов.

**Ключевые слова:** огнестойкость, металлические конструкции, потеря устойчивости при нагревании, закритическое деформирование, критическая температура.

The described method of determining the critical temperature of compressed steel structures of underground structures with consideration of post-critical deformation after buckling under the action of heat. The obtained value of the critical temperature of the metal structures has been used to calculate the required thickness of fire protection materials. In the supercritical stage of deformation the curve in the dangerous cross-section steel structure is reduced, which in turn helps to reduce the bending moment and the critical condition occurs at a higher temperature that allows to obtain savings fire resistant materials.

In the existing methods of determining the critical temperature of the compressed metal structures buckling is identified with the limit state and corresponding to this value of temperature is assumed to be critical [1, 4]. This assumption, valid for structures located in active power loading, cannot be accepted for the case of buckling of the rod under the action of thermal stresses. Partial implementation of temperature deformations occurring in the time of buckling can lead to reduced thermal stresses. Taking into account this fact and also the fact that the loss of stability from the heating takes place at very low temperatures (about 1000C), it should be recognized that thermal buckling is not considered for design limit condition, and temperature – critical. At a relatively low level of compressive stresses in the cross section from the power load to the heating, can make that after buckling from heat design goes into a state of buckling and the limit state for her will be the exhaustion of the bearing capacity of the critical section of joint action in it compressive strength and bending moment.

**Keywords:** fire resistance, steel structures, buckling, post-critical deformation, critical temperature.

**Вступ.** Сталеві конструкції, що сприймають сти-скаючі зусилля, широко використовуються при будів-ництві підземних споруд (стійки, розпірки рампових частин транспортних тунелів тощо), що обумовлює актуальність створення методів проектування їх вогнезахисту для забезпечення необхідних меж вогнестійкості об'єктів. Проблема розробки таких методів набуває особливого значення стосовно до унікальних споруд, оскільки їх руйнування при ймовірній пожежі пов'язане з більш значним збитком, порівняно з типо-вими об'єктами, а проведення на них вогневих випро-бувань для визначення фактичної межі вогнестійкості виключено з очевидних причин. У силу цього для унікальних підземних споруд встановлюють більш високі, ніж для звичайних будівельних об'єктів, межі вогнестійкості несучих конструкцій (180 хв. і вище).

Поряд із цим металеві конструкції мають істотно менші межі вогнестійкості, ніж залізобетонні кон-струкції підземних споруд [1], так як відносно висока теплопровідність металу сприяє швидкому прогріван-ню конструкцій під час вогневого впливу. Це, в свою чергу, зумовлює зниження жорсткості і міцності ме-талу, у результаті чого конструкція втрачає несучу здатність внаслідок настання в її елементах стану те-кучості і розвитку неприпустимих деформацій. Біль-шість незахищених сталевих конструкцій має межі вогнестійкості не більше 0,25 год. [1], отже застосу-вання вогнезахисту для них стає необхідним.

Тип вогнезахисту визначають на основі техніко-економічного аналізу з урахуванням таких основних чинників [1]:

- величини необхідної межі вогнестійкості;
- типу конструкції, що захищається і виду сприймаємого навантаження;
- температурно-вологісних умов експлуатації і проведення робіт з монтажу вогнезахисту;
- ступеня агресивності навколишнього середо-вища по відношенню до вогнезахисту і матеріалу конструкції;
- збільшення навантаження на конструкцію за рахунок маси вогнезахисту;
- трудомісткості монтажу вогнезахисту;
- естетичних вимог до конструкції.

Параметри вогнезахисту обраного типу, що за-безпечують необхідну межі вогнестійкості, визнача-ють для кожної розглянутої конструкції окремо, ви-ходячи з умови

$$P_{\phi} \geq P_{mp},$$

де  $P_{\phi}$  – фактична межі вогнестійкості конструкції з вогнезахистом.

Для металевих конструкцій – ця умова може бу-ти сформульована у вигляді:

$$T \leq T_{cr},$$

де  $T$  – температура конструкції, що захищається в кінці вогневого впливу протягом часу, що дорівнює необхідній межі вогнестійкості;  $T_{cr}$  – значення температури нагрівання, при якій відбувається втрата несучої здатності конструкції за умови нормативних силових навантажень (критична температура),  $T_{cr}$  металу визначається статичним розрахунком.

Особливістю роботи сталевих розпірок в умовах ймовірної пожежі є спільне сприйняття ними стискаючих силових навантажень і всебічного високотемпературного нагрівання. Очевидно, що обетонування перешкоджає реалізації температурних деформацій розпірок, сприяючи з'явленню в них стискаючих температурних зусиль, які потенційно можуть виявитися більш небезпечними з точки зору руйнування конструкції, ніж прикладені до них зовнішні силові навантаження.

Прийmemo, що жорсткість залізобетонної обробки тунелю істотно більша за жорсткість сталеві розпірки, через що при розгляданні термомеханічної поведінки розпірки під час пожежі можна повністю знехтувати реалізацією її поздовжніх температурних деформацій і прийняти розрахункову схему центрально стиснутого стержня з нерухомим шарнірним закріпленням кінців, що рівномірно обігрівається по довжині (рис. 1).

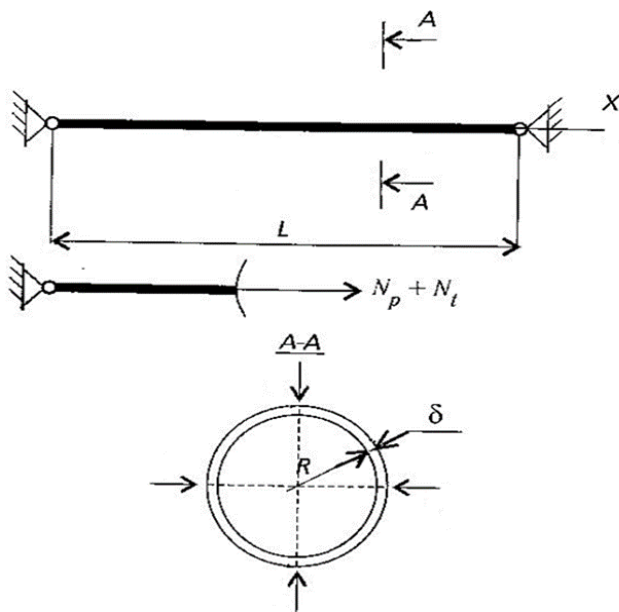


Рис. 1 – Розрахункова схема стиснутої розпірки, що обігрівається з усіх сторін:  $T_f$  – температура обігрівуючого газового середовища;  $N_p$  – поздовжня сила у перерізі розпірки від силового навантаження;  $N_t$  – поздовжня сила в перерізі розпірки від не проявленої температурної деформації (температурний розпір); стрілками на розрізі А-А вказано напрям вогневого впливу

Висока теплопровідність сталі дозволяє при розрахунках прийняти, що теплоперенос в обсязі металеві розпірки є миттєвим і рівномірним [1], отже градієнт температурного поля у перерізі і по довжині конструкції, що розглядається, дорівнюють нулю.

Верхня оцінка температурних напружень щодо описаних вище кінематичних граничних умов та лі-

нійно-пружній деформації сталі може бути отримана за відомою формулою:

$$\sigma_T = E(T) \alpha(T) \Delta T,$$

де  $E(T)$  і  $\alpha(T)$  – відповідно модуль пружності і коефіцієнт лінійного температурного розширення сталі, що залежать від температури  $T$ ;  $\Delta T$  – зміна температури у порівнянні з початковим (у випадку, що розглядаємо – до початку нагрівання при пожежі) її значенням.

При нагріванні розпірок у вигляді сталевих труб із низьковуглецевої конструкційної сталі до температури близько 100 °С стискаючі термомеханічні напруження в них досягають досить високих значень (порядку нормативного опору сталі по межі текучості  $R_{уп}$ ). Отже, при дослідженні термомеханічної поведінки розпірок, що обігріваються в умовах пожежі, необхідно враховувати можливість втрати ними стійкості від температурних зусиль.

Умова збереження стійкості розпірки з урахуванням температурного зусилля має вигляд:

$$N_p + N_t < N_{cr}. \quad (1)$$

Де  $N_p$  – постійна (не залежить від нагріву) складова поздовжньої сили, що виникає в перерізі розпірки від прикладеного силового навантаження;  $N_t = E(T)F\alpha(T)\Delta T$  – змінна (залежить від температури) складова поздовжньої сили, що виникає у перерізі розпірки від температурної деформації, яка не проявилася;  $N_{cr}$  – критичне значення стискаючого зусилля, знижене внаслідок нагрівання;  $F$  – площа поперечно-го перерізу розпірки.

Критична сила при втраті стійкості стійки у діапазоні пружних деформацій може бути визначеною за відомою формулою Ейлера:

$$N_{cr} = (\pi/l)^2 E(T)F, \quad (2)$$

де  $\lambda = l/i$  – гнучкість розпірки;  $l$  – ефективна довжина розпірки;  $i = \sqrt{J/F}$  – радіус інерції перерізу розпірки;  $J$  – осьовий момент інерції перерізу розпірки.

Замінив у нерівності (1) величини, що входять до неї відповідними вище виразами і припускаючи, що у межах граничного стану  $N_p \ll N_{cr}$ , можна отримати наближене співвідношення для верхньої оцінки критичної величини температури розпірки, що відповідає втраті нею стійкості в зоні пружних деформацій:

$$\Delta T_{cr} = (1/\alpha_{min}) (\pi/\lambda)^2, \quad (3)$$

де  $\alpha_{min}$  – мінімальне в розглянутому діапазоні температури значення коефіцієнта лінійного розширення.

Відомо [2], що втрата стиснутим стержнем стійкості в зоні пружних деформацій, що описана формулою Ейлера, відбувається лише у випадку дуже гнучких стрижнів, для яких критичні напруження не перевищують межі пропорційності сталі  $\sigma_{мп}$ . Значення гнучкості стрижня  $\lambda_0$ , що відповідає межі застосовуваності формули Ейлера, може бути оцінено за формулою:

$$\lambda_0 = \pi \sqrt{\frac{E(T)}{\sigma_{mi}(T)}}. \quad (4)$$

Якщо прийняти за межу пропорційності маловуглецевої сталі за умов нормальної температури 200 МПа, знаходимо  $\lambda_0 \approx 100$ . Підставив знайдену величину у рівняння (3) і прийнявши  $a_{min} = 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , отримуємо, що для конструкцій з гнучкістю  $\lambda > \lambda_0$  критична величина температури  $\Delta T_{cr} < 97 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Якщо гнучкість розглядаємої конструкції варіюється у діапазоні  $(0,2..0,4)\lambda_0 < \lambda < \lambda_0$ , то формула Ейлера дає значення критичних навантажень, що перевищують їх дійсні значення [2], оскільки напруження, що виникають у розпірці на докритичній стадії її деформування, виявляються вище за межу пропорційності сталі, що призводить до істотного зниження характеристик жорсткості конструкції. Визначення критичного навантаження втрати стійкості за межею пропорційності проводять за формулою

$$N_{cr} = (\pi/\lambda)^2 K(T) F, \quad (5)$$

де  $K(T)$  – приведений модуль пружності (модуль Кармана), що враховує часткове пружне розвантаження перерізу конструкції за умов втрати стійкості і визначається наступним співвідношенням [3]:

$$K = \frac{E' J_2 + E' J_1}{J}, \quad (6)$$

де  $E'$  – дотичний модуль пружності;  $J$  – осьовий момент інерції перерізу конструкції;  $J_1$  – момент інерції зони перерізу, що розвантажується у момент втрати стійкості за рахунок поздовжнього вигину;  $J_2$  – момент інерції зони перерізу, що довантажується у момент втрати стійкості.

Вісь, щодо якої обчислюються моменти інерції, перпендикулярна площині, у якій відбувається випучування конструкції при втраті стійкості, а її положення визначається із співвідношення [3]:

$$S_1 E' + S_2 E' = 0, \quad (7)$$

де  $S_1$ ,  $S_2$  – статичні моменти зон розвантаження та довантаження відповідно.

Враховуючи, що термопружні напруження у розпірці із маловуглецевої сталі, яка заземлена по кінцях, досягають межі текучості при температурі близько  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , а для конструкцій з такої ж сталі з відносно більшою гнучкістю зазначений рівень температури приблизно відповідає верхній межі діапазону критичних температур, для розпірок з гнучкістю  $\lambda > (0,2..0,4) \lambda_0$  ймовірно є втрата стійкості розпірки вже на ранній стадії її нагрівання при пожежі. До розпірок з меншою гнучкістю, у яких довжина прольоту невелика відносно розмірів перерізу, поняття втрати стійкості не припустимо, а вичерпання несучої здатності відбувається внаслідок того, що стискаючі напруження в них досягають межі текучості.

Відзначимо, що в існуючих методиках визначення критичної температури стиснутих металевих конс-

трукцій втрата стійкості отожднюється із граничним станом і відповідне цьому значення температури приймається за критичне [1, 4]. Дане припущення, що безумовно вірне для конструкцій, які знаходяться в умовах активного силового навантаження, не може бути безумовно прийнятим для випадку випучування стрижня під дією температурних напружень. Часткова реалізація температурних деформацій, що відбувається в момент втрати стійкості конструкції, здатна привести до зменшення температурних напружень. Приймаючи цей факт, а також те, що втрата стійкості від нагрівання відбувається при досить низьких температурах (близько  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ), слід визнати, що температурне випучування не є для розглянутої конструкції граничним станом, а відповідна температура — критичною. При відносно невеликому рівні стискаючих напружень, що виникають в перерізі від силового навантаження до нагрівання, з великою ймовірністю можна стверджувати, що після втрати стійкості від нагрівання конструкція переходить до стану поздовжнього вигину і граничним станом для неї буде вичерпання несучої здатності небезпечного перерізу внаслідок спільної дії в ньому стискаючого зусилля і згинаючого моменту.

Припускаючи, що внаслідок розвантаження за критичне деформування розпірки має фізично лінійний характер, приймаємо для опису кінематики цього деформування наступне співвідношення [5]:

$$v = \frac{2L}{\pi} \sqrt{\frac{N_p + N_t(T) - N_{cr}(T)}{E(T)F}} \sin \frac{\pi x}{L}. \quad (8)$$

Температурна складова поздовжньої сили, що зберігається в розпірці після випучування, дорівнює  $N_{cr}$  [5].

Вираз для згинаючого моменту, що виникає від поздовжнього вигину у небезпечному (середньому) перерізі розпірки, має вигляд:

$$M = (N_p + N_{cr})v. \quad (9)$$

Згідно [5], зазначені вище співвідношення є вірними, поки прогин залишається настільки малим, що дозволяється використання відомого наближеного виразу для кривизни, прийнятого у технічній теорії згину стержнів. Іншими словами, квадрат кута обертання плоского поперечного перерізу стійки має бути дуже малим у порівнянні з одиницею, що стосовно до рівняння (8) означає

$$4 \frac{N_p + N_t(T) - N_{cr}(T)}{E(T)F} \ll 1. \quad (10)$$

Для оцінювання ступеня близькості розглянутої стиснуто-згнutoї конструкції до граничного стану будемо використовувати критерій [1]:

$$k = \left( \frac{N_p + N_{cr}}{FR_{ynt}} \right)^n + \frac{M}{W_{pl} R_{ynt}}, \quad (11)$$

де  $W_{pl}$  – пластичний момент опору розрахункового перерізу:

$$W_{pl} = CW, \quad (12)$$

де  $W$  – момент опору розрахункового перерізу вигину;  $C$  – коефіцієнт, що залежить від форми перерізу та враховує розвиток в ньому пластичних деформацій;  $R_{yt}$  – нормативний опір сталі за межею текучості, знижений з урахуванням нагріву визначається за формулою [1,4]

$$R_{yt} = R_{yn}\gamma(T), \quad (13)$$

де  $R_{yn}$  – нормативний опір сталі за межею текучості у вихідному стані (до нагрівання);  $\gamma(T)$  – емпіричний коефіцієнт умов роботи сталі, враховує його зниження залежно від температури.

Критичним є значення температури, при якому виконується рівність  $k=1$ , що відповідає вичерпанню несучої здатності стиснуто-зігнутих конструкцій [1].

Застосування описаної методики визначення критичної температури розглянемо на прикладі сталевій розпірці, яка виконана у вигляді тонкостінної циліндричної сталевій труби з внутрішнім радіусом 213 мм і товщиною стінки 10 мм, що сприймає поздовжнє стискаюче зусилля, нормативне значення якого дорівнює 206 кН. Необхідна межа вогнестійкості розпірки становить R 180. Довжина розпірки – 14 м, матеріал маловуглецева сталь з нормативною межею текучості  $R_{yt} = 225$  МПа.

Діаграми деформування сталі під час розрахунків апроксимували ламаною [6], при цьому граничну деформацію  $\epsilon_{s2}$ , що відповідає тимчасовому опору, розраховували за формулою

$$\epsilon_{s2} = 100 \frac{R_{yt}(T)}{E(T)}. \quad (14)$$

Залежність модуля пружності сталі від температури [1, 4, 6]:

$$E(T) = E_0\beta(T), \quad (15)$$

де  $\beta(T)$  – емпіричний коефіцієнт зниження модуля пружності.

Температурні залежності коефіцієнтів  $\gamma$  (умов праці),  $\beta$  (зниження модуля пружності) і  $\alpha$  (лінійного температурного розширення) для сталі, що використовується, брали за даними робіт [1, 6].

Результати визначення критичної температури розпірки показано на рис. 2–5 [9]. На рис. 2 верхня пунктирна крива відображає залежність від температури граничного значення гнучкості  $\lambda_0$ , що визначає коректність застосування формули Ейлера для розрахунку критичного навантаження на розпірку.

Суцільною горизонтальною лінією показано значення гнучкості розпірки  $\lambda_p$ , що розглядається. Згідно рисунку у всьому представленому діапазоні зміни температури конструкція, що розглядається має гнучкість нижчу за граничну, тобто за умови докритичного деформування в ній розвиваються напруження, більші за нормативний опір по межі текучості.

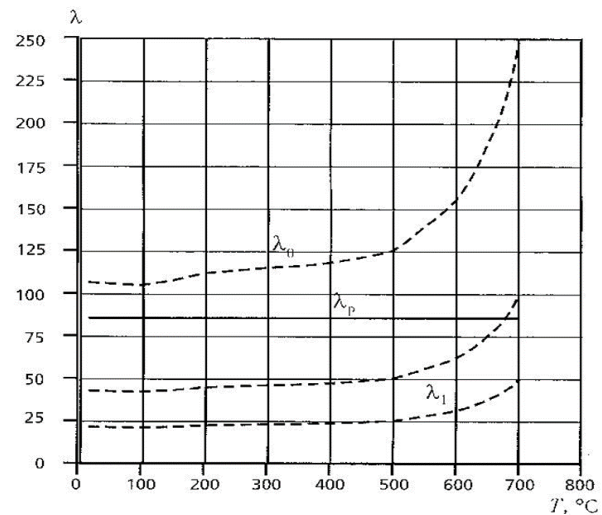


Рис. 2 – Залежність характерних значень гнучкості розпірки від температури  $T$ :  $\lambda_0$  – гнучкість, яка відповідає критичним напруженням, що дорівнюють нормативному опору за межею текучості;  $\lambda_1$  – значення, що визначає межу між зонами середньої і малої гнучкості;  $\lambda_p$  – гнучкість розпірки

У той же час при  $T < 670$  °C гнучкість розпірки лежить вище смуги характерних значень  $\lambda_1 = (0,2-0,4)\lambda_0$ , що визначає межу діапазону стрижнів малої гнучкості, для яких можливість втрати стійкості неактуальна. Таким чином, досліджувана конструкція відноситься до стрижнів середньої гнучкості, для яких розрахунок критичних навантажень слід проводити з урахуванням фізичної нелінійності деформування матеріалу за формулою (5).

Рис. 3 [9] показує зміну поздовжнього стискаючого зусилля, що виникає в розпірці на докритичній стадії деформування, залежно від температури нагрівання конструкції. Тут же наведені залежності від часу критичної сили і граничного значення поздовжнього зусилля, що відповідає досягненню межі текучості всім перерізом. Перетин кривих 1 і 3 відповідає втраченню стійкості.

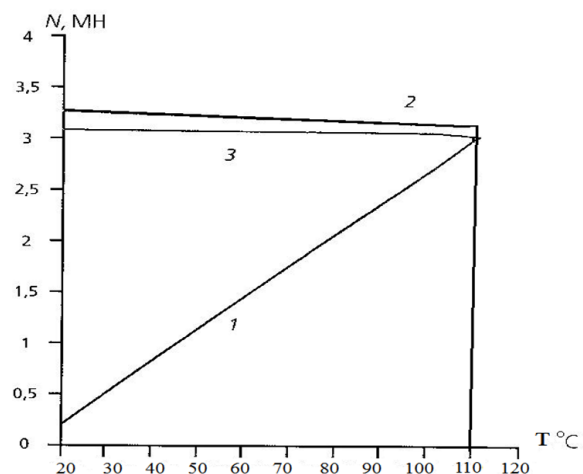


Рис. 3 – Докритичне деформування розпірки: залежність від температури  $T$  поздовжнього стискаючого зусилля  $N(1)$ , критичної стискаючої сили  $N_{cr}(2)$  і граничного стискаючого зусилля  $N_{lim}$ , що відповідає з'явленню текучості у перерізі (3)

Як бачимо, втрата стійкості розглянутої конструкції настає при відносно невеликому значенні температури (близько 110°C), коли стискаючі напруження, що виникають у перерізі, досягають рівня нормативного опору сталі за межею текучості (перетин кривих 1 і 3 на рис. 3).

Рис. 4 показує поведінку розглянутої конструкції на закритичній стадії деформування. Тут наведені залежності діючих у небезпечному (середньому) перерізі розпирки внутрішніх силових факторів – поздовжньої сили і згинаючого моменту від температури. Згідно рисунку ці фактори по мірі зростання температури зменшуються, що пояснюється відповідним зниженням при нагріванні модуля пружності сталі. Згинаючий момент змінюється при цьому швидше, ніж поздовжня сила, оскільки зниження модуля пружності призводить до зменшення температурної складової поздовжньої сили, що обумовлює закритичний прогин розпирки, що, в свою чергу (8), зменшує величину прогину у небезпечному перерізі і, відповідно, впливає на величину згинаючого моменту.

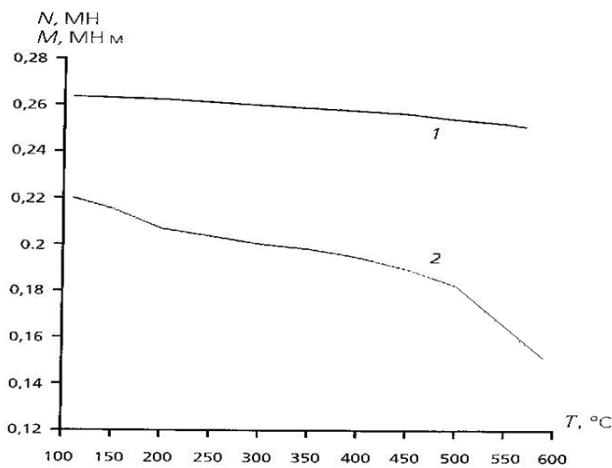


Рис. 4 – Залежність від температури  $T$  поздовжньої сили  $N(1)$  і згинаючого моменту  $M(2)$  в небезпечному перерізі розпирки на закритичній стадії деформування

Залежність від температури критерію міцності конструкції  $k$ , що відповідає лівій частині рівняння (11), представлена на рис. 5. Граничний стан конструкції настає при  $k = 1$ , в силу чого відповідне цьому значення температури приймається за критичне. Згідно рис. 5, критична температура розглянутої конструкції становить 569 °C.

Отримане значення критичної температури металу використовується при розрахунках необхідних товщин вогнезахисту конструкцій. Необхідна товщина вогнезахисту визначається шляхом проведення серії параметричних теплотехнічних розрахунків, в яких вона є варіюваним параметром. Розрахунок нестационарного температурного поля у перерізі конструкції з вогнезахистом проводять чисельним розв'язанням диференціальних рівнянь нестационарної теплопровідності з урахуванням:

- наявності в розрахунковому перерізі порожнин, заповнених газом;
- можливого термічного розкладання (дегідратації) вогнезахисного матеріалу і супроводжуючих його

процесів переносу пари у пористому середовищі, конденсації і випаровування;

- зміни теплофізичних властивостей матеріалів конструкцій залежно від температури.

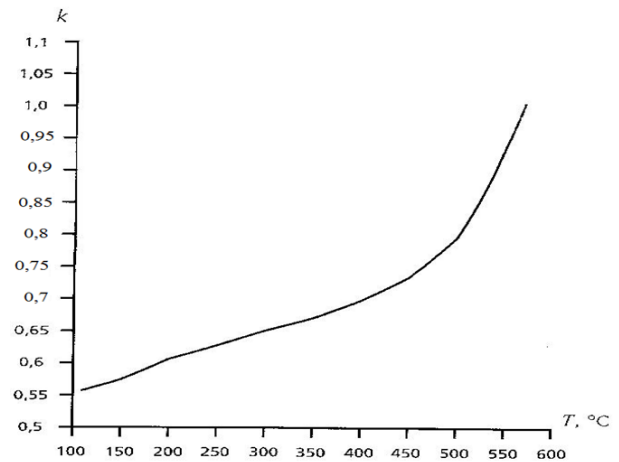


Рис. 5 – Залежність критерію міцності розпирки  $k$  від температури  $T$

### Висновки

- розпирки підземних споруд відносяться до стиснутих стрижнів середньої гнучкості, для яких розрахунок критичних навантажень слід проводити з урахуванням фізичної нелінійності деформування матеріалу;

- у закритичній стадії деформування прогин у небезпечному перерізі зменшується, що в свою чергу сприяє зменшенню згинаючого моменту;

- критичний стан розпирки настає при більш високій температурі, яка відповідає значенню критерію міцності  $k = 1$  і температурі 569°C, що і являється критичною для даної конструкції;

- описаний підхід враховує закритичне (після втрати стійкості від температурних напружень) деформування стиснутих металевих конструкцій підземних споруд типу балок-розпирок в умовах пожежі, і дозволяє визначати оптимальні параметри вогнезахисту цього класу конструкцій, і отримати економію вогнезахисних матеріалів.

### Список літератури

1. Мосалков, И. Л. Огнестойкость строительных конструкций [Текст] / И. Л. Мосалков, Г. Ф. Плюснина, А. Ю. Фролов. – Москва: ЗАО «Спецтехника», 2001. – 490 с.
2. Заславский, Б. В. Краткий курс сопротивления материалов [Текст] / Б. В. Заславский. – Москва: Машиностроение, 1986. – 328 с.
3. Работнов, Ю. Н. Сопротивление материалов [Текст] / Ю. Н. Работнов. – Москва: Физматгиз, 1962. – 456 с.
4. Яковлев, А. И. Расчет огнестойкости строительных конструкций [Текст] / А. И. Яковлев. – Москва: Стройиздат, 1988. – 143 с.
5. Боли, Б. Теория температурных напряжений [Текст] / Б. Боли, Дж. Уэйнер. – Москва: Мир, 1998. – 518 с.
6. Страхов, В. Л. Огнезащита строительных конструкций [Текст]: руководство по пожарной безопасности подземных сооружений / В. Л. Страхов, А. М. Крутов, Н. Ф. Давыдкин. – Москва: Информационно-издательский центр «ТИМР», 2000. – Т. 2. – 433 с.
7. Горев, В. В. Металлические конструкции. Конструкции зданий [Текст] / В. В. Горев, Б. Ю. Уваров, В. В. Филипов, Г. И. Белый и др. – Москва: Высшая школа, 2002. – 528 с.



8. Демехин, В. Н. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре [Текст] / В. Н. Демехин, И. Л. Мосалков, Г. Ф. Плюснина, Б. Б. Серков, А. Ю. Фролов, Е. Т. Шурин. – Москва: Академия ГПС МЧС России, 2003. – 656 с.
9. Давыдкин, Н. Ф. Проектирование огнезащиты стальных сжатых конструкций (на примере распорок) [Текст] / Н. Ф. Давыдкин, В. О. Каледин, В. Л. Страхов // Строительные материалы и конструкции и их огнезащита. – 2011. – № 1. – С. 24–31.
10. Положаенко, С. Моделивання дифузійних процесів просочення ґрунту в основах гідротехнічних споруд [Текст] / С. Положаенко, С. Кузниченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 1/4 (55). – С. 25–28. – Режим доступу: <http://www.URL: http://journals.urau.ua/ejejet/article/view/3314/3115>
1. Mosalkov, I. L., Plusnina, G. F., Frolov, A. Iu. (2001). Ognestoikost' stroitel'nykh konstrukttsii. Moscow: ZAO «Spetstehnika», 490.
2. Zaslavskii, B. V. (1986). Kratkii kurs soprotivleniia materialov. Moscow: Mashinostroenie, 328.
3. Rabotnov, Iu. N. (1962). Soprotivlenie materialov. Moscow: Fizmatgiz, 456.
4. Iakovlev, A. I. (1988). Raschet ognestoikosti stroitel'nykh konstrukttsii. Moscow: Stroizdat, 143.
5. Boli, B., Ueiner, J. (1998). Teoriia temperaturnykh napriazhenii. Moscow: Mir, 518.
6. Strahov, V. L., Krutov, A. M., Davydkin, N. F. (2002). Ogneshchita stroitel'nykh konstrukttsii: rukovodstvo po pozharnoi bezopasnosti podzemnykh sooruzhenii. Vol. 2. Moscow: Informatsionno-izdatel'skii tsentr «TIMR», 433.
7. Gorev, V. V., Uvarov, B. Iu., Filippov, V. V., Belyi, G. I. et. al. (2002). Metallicheskie konstrukttsii. Konstrukttsii zdani. Moscow: Vysshiaia shkola, 528.
8. Demehin, V. N., Mosalkov, I. L., Plusnina, G. F., Serkov, B. B., Frolov, A. Iu., Shurin, E. T. (2003). Zdaniia, sooruzheniia i ih ustoiichivost' pri pozhare. Moscow: Akademiia GPS MChS Rossii, 656.
9. Davydkin, N. F., Kaledin, V. O., Strahov, L. V. (2011). Proektirovanie ogneshchity stal'nykh szhatykh konstrukttsii konstrukttsii (na primere rasporok). Stroitel'nye materialy i konstrukttsii i ih ogneshchita, 1, 24–31.
10. Polozhaenko, S., Kuznychenko, S. (2012). Diffusion processes modeling of soil impregnation in the hydroengineering structures bottom. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 1(4(55)), 25–28. Available at: <http://journals.urau.ua/ejejet/article/view/3314/3115>

Надійшла (received) 07.01.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Особенности напряженного состояния сжатых конструкций подземных сооружений/ С. А. Тищенко, И. В. Рудешко, О. В. Бас** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.89–94. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Особенности напряженного состояния стисненых конструкций подземных споруд/ С. А. Тищенко, И. В. Рудешко, О. В. Бас**// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.89–94. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Features of stress state grip design underground structures/ Je. Tishchenko, I. Rudeshko, O. Bass**//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P.89–94. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Тищенко Євгеній Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент; Навчально-методичний центр цивільного захисту та безпеки життєдіяльності Черкаської області, заступник начальника з навчальної та виробничої роботи; вул. 30 років Перемоги, 26, м. Черкаси, Україна, 18029.

**Рудешко Ірина Вікторівна** – Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, старший викладач кафедри будівельних конструкцій; вул. Оноприєнка, 8, м. Черкаси, Україна, 18000; e-mail: [rudeshko1603@ukr.net](mailto:rudeshko1603@ukr.net).

**Бас Олег Володимирович** – Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, науковий співробітник; вул. Оноприєнка, 8, м. Черкаси, Україна, 18000; [bas2413@gmail.com](mailto:bas2413@gmail.com).

**Тищенко Евгений Александрович** – кандидат технических наук, доцент; Учебно-методический центр гражданской обороны и безопасности жизнедеятельности Черкасской области, заместитель начальника по учебной и производственной работе; ул. 30 лет Победы, 26, г. Черкассы, Украина, 18029.

**Рудешко Ирина Викторовна** – Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской обороны Украины, старший преподаватель кафедры строительных конструкций; ул. Оноприенко, 8, г. Черкассы, Украина, 18000; [rudeshko1603@ukr.net](mailto:rudeshko1603@ukr.net)

**Бас Олег Владимирович** – Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской обороны Украины, научный сотрудник; ул. Оноприенко, 8, г. Черкассы, Украина, 18000; [bas2413@gmail.com](mailto:bas2413@gmail.com)

**Tishchenko Evgeniy Aleksandrovich** – candidate of technical Sciences, associate Professor; Educational-methodical center of civil protection and life safety of Cherkasy region, Deputy Director for educational and production work; address Ukraine, Cherkasy Street 30th anniversary of the Victory, 26;

**Rudeshko Irina** – Cherkasy Institute of fire safety named Heroes of Chernobyl National University of civil protection of Ukraine, senior lecturer of the Department of building structures; str. Onopriyenko, 8, Cherkassy, Ukraine, 18000; [rudeshko1603@ukr.net](mailto:rudeshko1603@ukr.net).

**Bas Oleg** – Cherkasy Institute of fire safety named Heroes of Chernobyl National University of civil protection of Ukraine, research fellow; str. Onopriyenko, 8, Cherkassy, Ukraine, 18000

УДК 66.022.3

**В. І. СІВЕЦЬКИЙ, О. Л. СОКОЛЬСЬКИЙ, І. І. ІВІЦЬКИЙ, О. Є. КОЛОСОВ, В. М. КУРИЛЕНКО****МЕТОДИ ТА ПРИСТРОЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Питання отримання інформації про характеристики відповідальних деталей та вузлів, зокрема, про їх напружено-деформований стан (н.д.с.), в режимі реального часу надзвичайно актуальне у наш час. Введення у виробу з полімерних композиційних матеріалів інтелектуальних датчиків (ІД) дозволяє проводити дистанційну діагностику та моніторинг цих виробів безпосередньо під час їх експлуатації. Це актуально в таких сферах, як: авіакосмічна промисловість (контроль н.д.с. елементів літальних апаратів); медицина (контроль елементів штучних клапанів серця, тощо); суднобудування (контроль зносу найбільш відповідальних елементів підводних човнів); автомобілебудування та машинобудування (контроль напружень, які виникають у відповідальних місцях під час експлуатації).

**Ключові слова:** полімерні композиційні матеріали, інтелектуальні матеріали, інтелектуальні датчики.

Вопрос получения информации о характеристиках деталей и узлов, в частности, об их напряженно-деформированном состоянии (н.д.с.), в режиме реального времени чрезвычайно актуален в наше время. Введение в изделия из полимерных композиционных материалов интеллектуальных датчиков (ИД) позволяет проводить дистанционную диагностику и мониторинг этих изделий непосредственно во время их эксплуатации. Это актуально в таких сферах, как: авиакосмическая промышленность (контроль н.д.с. элементов летательных аппаратов); медицина (контроль элементов искусственных клапанов сердца и т.д.); судостроение (контроль износа наиболее ответственных элементов подводных лодок); автомобилестроение и машиностроение (контроль напряжений, возникающих в ответственных местах во время эксплуатации).

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, интеллектуальные материалы, интеллектуальные датчики.

Problem of obtain information about the characteristics of parts and components, in particular, their stress-strain state, in real time is extremely relevant in our time. Intrusion into the products made of polymer composite materials intelligent sensors allows for remote diagnostics and monitoring of these products directly during their operation. This is important in areas such as: aerospace (stress-strain state control elements of aircraft); medicine (control elements of artificial heart valves, etc.); shipbuilding (wear monitoring the most critical elements of submarines); automotive and mechanical engineering (control of stresses in critical areas during operation).

**Keywords:** polymer composites, smart materials and smart sensors.

**Вступ.** Інтелектуальний датчик – це мініатюрний вимірювальний пристрій у вигляді конструктивної сукупності одного або декількох вимірювальних перетворювачів величини, яка вимірюється і контролюється, який виробляє вихідний сигнал, зручний для дистанційного передавання, зберігання та використання у системах керування і має нормовані характеристики.

Датчики на основі різних матеріалів і процесів вже тривалий час використовуються в різних областях техніки, перетворюючи неелектричні сигнали в електричні. Датчики, які використовуються для інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) мають вигляд мініатюрних сенсорних пристроїв, що вводяться в матеріал.

Інтелектуальні матеріали потребують змін методів контролю дефектності матеріалів [1] і переходу від традиційних методів неруйнівного контролю (сканування ультразвуком, томографія, акустичні, рентгеноструктурні та інші) до систем самодіагностики з використанням мікродатчиків (сенсорів), вбудованих в структуру матеріалу (конформних, капсульованих).

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** У світі проводяться інтенсивні наукові дослідження в напрямках створення технологій та устаткування для виробництва ПКМ, зокрема, на базі експериментальних та числових методів та моделювання цих процесів.

Робота [2] присвячена широкому огляду конструкційних полімерних композиційних матеріалів, в тому числі інтелектуальних. Автор розглядає типи ПКМ, способи отримання інформації з них та їх властивості. Розглядаються питання введення у полімерний матеріал різних типів датчиків та інших модифікаторів, які дозволяють не тільки значно розширити сферу застосування полімерних композицій, а й знайти нові сфери застосування таких матеріалів.

У роботі [3] описані системи волоконно-оптичних датчиків, які можуть вимірювати деформацію, температуру і механічне напруження. Обговорюються способи реагування інтелектуальних конструкцій на виникаючі резонансні коливання. Описано сплави, що володіють ефектом пам'яті форми, а також п'єзокераміки, що широко використовуються в якості датчиків в розглянутих структурах. Наведені приклади застосування магнітострикційних матеріалів як активних приводів, що реагують на зміну зовнішніх умов.

У роботі [4] розглянуто проблеми аналізу, проектування і виготовлення формостабільних і інтелектуальних конструкцій з сучасних композиційних матеріалів. Розроблено моделі та алгоритми, що дозволяють оцінювати характеристики композитних конструкцій і управляти ними при виготовленні і в процесі експлуатації.

У роботах [5, 6] розглядається створення інтелектуальних полімерних систем на базі електроактивних датчиків, які дозволяють контролювати дію зовнішніх факторів на виріб, що дозволяє здійснювати моніторинг в режимі реального часу відповідальних деталей та вузлів. У роботі [7] розглядається можливість використання інтелектуальних полімерних матеріалів у медицині, зокрема, для таких високовідповідальних застосувань як протезування суглобів, штучні кардіоклапани та ін. У роботі [8] проводиться загальне порівняння полімерних композицій без інтелектуальних датчиків та з ними, роблячи висновки про можливість їх застосування у різних сферах. Проте, автори не за гострюють увагу на технологіях введення датчиків та параметрах обладнання.

Аналіз існуючих робіт вчених свідчить також про те, що незважаючи, наприклад, на різноманіття існуючих компонентів з пам'яттю форми, сучасних волоконнооптичних та п'єзоелектронних датчиків та

© В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький, О. Є. Колосов, В. М. Куриленко. 2016

технологій наприклад, з'єднання різнорідних циліндричних конструктивних елементів, в цей час відсутні універсальні технології та устаткування для введення ІД в полімерний матеріал та їх переробки у відповідальні деталі. Тому розроблення ефективних технічних засобів створення ІПКМ та прогнозування їх н.д.с. є надзвичайно актуальним для вітчизняної науки і промисловості.

**Аналіз типів інтелектуальних датчиків та можливостей їх застосування.** Датчики поділяють на два типи: активні та пасивні. Активні датчики випромінюють і приймають сигнали, пасивні – реєструють і аналізують зміни без використання випромінювань.

Ємнісні системи датчиків фіксують зміни величини і фази змінного струму, індукційні датчики фіксують зміну індуктивності при внесенні в контрольований об'єм феромагнітних і електропровідних компонентів (при зміні магнітних і електричних властивостей).

Датчики, які отримують і обробляють сигнали, що виникають при механічному впливі на матеріал, використовують процеси акустичної, електронної, молекулярної, електромагнітної емісії.

Імпульси електромагнітного поля реєструються при зародженні та розвитку тріщин, розриві волокон, розшаруванні матеріалу. Електромагнітна емісія дозволяє прогнозувати з високою точністю міцність ІПКМ, граничні навантаження, залишковий ресурс роботи виробів, експлуатованих в умовах статичного, динамічного, вібраційного навантаження. При дії на матеріал динамічних навантажень (удар, імпульсний акустичний або тепловий вплив) емісія виникає як в точці впливу, так і в напрямку поширення акустичних хвиль, і несе інформацію про внутрішню будову матеріалу.

Поведінка матеріалів в електричних полях визначається складним зв'язком між інформаційними, тепловими властивостями та індукцією. При цьому можливе виникнення п'єзоефекту (механічна деформація → електрична індукція) і піроефекту (теплове розширення → електрична індукція).

На вібрації та імпульси реагують п'єзокерамічні, електромагнітні, магнітометричні, інерційно-механічні, трибоелектричні (ефект контактної електроролізації), вібродатчики.

П'єзоелектричні датчики – вимірювальні перетворювачі, дія яких заснована на п'єзоелектричному ефекті, служать для перетворення механічного зусилля в електричний сигнал. Найпростіший п'єзоелектричний датчик – пластина п'єзоелектрика, затиснута між струмопровідними поверхнями, до яких прикладаються вимірювані зусилля. Електрорушійна сила, що виникає між струмопровідними шарами, обкладками п'єзопластини, пропорційна зусиллю. Залежно від конструкції деталей та умов їх навантаження використовують п'єзопластини, що працюють на розтяг-стиск (компресійні), вигин, зсув.

Датчики, які використовують принцип акустичної емісії, виготовляють з полімерів (наприклад, з полівініліденфториду), в яких при зміні зовнішнього навантаження генеруються електричні заряди.

Ультразвукові п'єзоперетворювачі, чутливі елементи яких виготовлені у вигляді монолітних блоків в

поєднанні з демпферами зі змінними акустичними характеристиками, використовуються в якості сенсорів, які інформують про н.д.с., розшарування, тріщини, пористості, розташування дефектів в об'ємі ІПКМ.

Датчики тиску на основі магнітострикційних матеріалів (магнітострикція – зміна розмірів і форми кристалічного тіла при намагнічуванні через зміни відстаней між вузлами решітки в ферро- і феримагнетиках) – вимірювальні перетворювачі, дія яких заснована на магнітострикційному ефекті (перехід електромагнітної енергії в механічну), і ефекті Віллари, зворотному магнітострикції – зміні намагніченості матеріалу при його деформації. Магнітострикція використовується при розробці датчиків і мікродвигунів з п'єзомагнітних (зміна довжини стержня йод впливом зовнішнього магнітного поля) і п'єзоелектричних (зворотний п'єзоефект) матеріалів.

Електроп'єзокерамічні полімерні матеріали отримують наповненням епоксидних полімерів, поліуретанів, термопластів, гум керамічними порошками і волокнами. У керамічних п'єзоматеріалів напруження і деформації призводять до появи електричного заряду. Він же перетворює електричне поле в механічне напруження, збуджуючи ультразвукову хвилю. Аналогічними властивостями володіють п'єзополімери і полімерні матеріали, наповнені п'єзокомпонентами.

П'єзоелектричні пристрої у вигляді гнучких п'єзоелектричних сенсорних полімерних плівок дозволяють проводити вимірювання відразу в безлічі точок, мають мікроканали зв'язку, дають інтегральну інформацію про стан матеріалу конструкції, про тиск у багатьох точках поверхні виробу.

Датчиками для оцінки ступеня вібрації є магнітоеластичні аморфні матеріали з високим (до 95%) коефіцієнтом прямого і зворотного перетворення електричної енергії в механічну, наприклад, на основі полімерних магнітів. Полімерні магнітні матеріали – композиції на основі полімерних сполучних (термоактивних епоксидних, фенолоальдегідних, ненасичених олігоферних; термопластичних – пластифікований ПВХ, ПЕ, сульфохлорирований ПЕ, поліаміди, полістироли; еластичних – гумові суміші з каучуками різних типів, в тому числі олігомерних «рідких», термоеластоласти) і магнітних порошоків (ферити, порошки сплавів з рідкоземельними елементами самарій-кобальт, самарій-залізо).

Постійні магніти на полімерній основі з наповнювачами у вигляді дисперсних магнітних частинок використовують у виробництві датчиків і виконавчих пристроїв, електронних систем управління, приводних механізмів і електродвигунів. Перевагою їх використання в якості генераторів сигналів в датчиках є можливість додання різноманітних магнітних функцій компактному пристрою шляхом створення різних магнітних напрямних полів при формуванні в литтєвій формі. Вони легко вбудовуються в різні пристрої, з'єднуються з різними компонентами складних вузлів (зубчастими колесами, валами, фіксаторами), мають високу міцність і стабільність розмірів, корозійну стійкість.

Принцип роботи датчиків з магнітними елементами заснований на зміні магнітних властивостей під впливом виникаючого в системі механічного напру-

ження. Найбільш ефективні композиції з частинками анізотричної форми (голчастої, пластинчастої) – анізотропні магнітопласти, рівень магнітних властивостей яких в 3-3,5 рази вище, ніж у ізотропних, і на основі самарій-кобальтових сплавів, які забезпечують високі магнітні характеристики.

Загальна концепція оптико-волоконних датчиків (волоконно-оптичні розподілені сенсорні системи) для діагностики ІПКМ запозичена з техніки зв'язку. Використання оптоволоконних датчиків дозволяє об'єднати датчики зі структурою ІПКМ, забезпечити контроль параметрів по всьому об'єму виробу, провести множинні вимірювання за допомогою одного оптичного волокна без використання інших систем датчиків і засобів транспортування сигналів.

Системи, що складаються з одного датчика, можуть давати лише обмежену інформацію. При використанні системи сенсорів виникає проблема обробки величезної кількості даних. Це вимагає введення обмежень в кількості датчиків та у виборі контрольованих параметрів для забезпечення адекватної оцінки стану матеріалу і конструкції. Від системи сенсорів необхідно отримувати сигнали і передавати їх в систему аналізу даних без зміни параметрів сигналу при передачі його через поверхню розділу. У багатосенсорних системах створюються синергетичні ефекти, що підвищують кількість і доступність інформації про стан вимірюваного об'єкта. Основними напрямками розвитку сенсорної техніки є мініатюризація, застосування бездротових і багатосенсорних систем.

Перевага багатосенсорних систем – досягнення високого рівня точності і надійності. Тенденція розвитку багатосенсорних систем спрямована на розвиток модульних систем, що дозволяють додавати нові блоки і оновлювати старі без порушення функцій всієї системи.

За наявності великої кількості компонентів їх з'єднання електричними проводами створює значні труднощі. Бездротові системи датчиків розміщуються без просторових обмежень, вимірюваний параметр може реєструватися поблизу джерела. Бездротові датчики можуть взаємодіяти за допомогою ультразвукових, електромагнітних або інфрачервоних сигналів. Амплітуда, частота, фаза і час відгуку несуть інформацію, яка відноситься до вимірюваного явища (н.д.с., температура, тиск і т.д.). Для енергетично автономних бездротових датчиків не потрібно струмопроводів навіть для електроживлення.

**Ціль та задачі дослідження.** Для серійного виробництва виробів з ІПКМ, які можуть надійно передавати достовірну інформацію, необхідно досягти можливості точного позиціонування обмеженої кількості ІД в заданих координатах об'єму виробів, при чому не вручну, а в автоматизованому технологічному процесі. Метою даної роботи є аналіз та розробка методів та принципів схем пристроїв дозованого введення ІД у визначені точки або області полімерних виробів, які отримуються найбільш поширеними методами: пресування, екструзії та лиття під тиском.

**Пропоновані методи та пристрої дозованого введення інтелектуальних датчиків у процесах промислового виготовлення виробів з ІПКМ.** На базі проведеного аналізу існуючих типів бездротових

ІД запропоновано низку методів та пристроїв, які дозволитимуть вводити певну їх кількість в наперед задані області полімерних виробів в ході технологічних процесів пресування, екструзії та лиття під тиском.

При серійному виготовленні індивідуальних полімерних виробів методами пресування та лиття під тиском необхідно здійснювати автоматизоване введення ІД в певні точки об'єму виробів.

Для виготовлення виробів методом лиття під тиском пропонується застосування такого методу. На термопластавтоматі здійснюють впорскування в форму розплаву полімеру до моменту її заповнення під заданим тиском. Після цього вводять шупом датчик на задану координату по товщині та ширині виробу, виводять шуп з порожнини форми, а тиск знижують до заданого в технологічному регламенті значення і витримують певний час, потім охолоджують без тиску, розкривають форму та виймають виріб.

Для виготовлення виробів методом екструзії та співекструзії пропонується попередньо сформований довгомірний елемент, який може бути виконаний циліндричної або довільної форми поперечного перерізу, з розміщеними в ньому чи на його поверхні ІД, заправляти в екструзійну головку, крізь яку екструдувати розплав термопластичного полімеру, в ході чого відбувається оплавлення довгомірного елемента, спільна течія з основним потоком полімеру та охолодження.

Для формування виробів з ІД методом пресування запропонована конструкція прес-форми, оснащеної пристроєм їх дозованого введення в задану точку об'єму виробу. Прес-форма складається з двох півформ – матриці 1 та пуансона 2 (рис. 1).

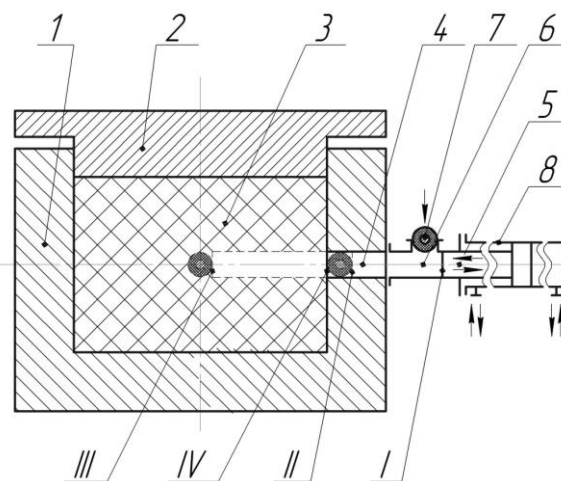


Рис. 1 – Схема прес-форми

Технологічний процес формування виробів за запропонованою конструкцією здійснюється таким чином. Відбувається заповнення формуючої порожнини 3 прес-форми прес-матеріалом, після чого здійснюється її проміжне зімкнення шляхом переміщення пуансона 2 відносно матриці 1. Закладна деталь 7, наприклад у вигляді полімерної капсули з ІД, подається в порожнину завантажувального пристрою 6, в якій знаходиться у вихідному положенні I виштовхувач 5, який виконаний у вигляді

щупа з можливістю закріплення на ньому і відкріплення від нього ІД (на рисунку не показано) і оснащений пристроєм зворотньо-поступального переміщення.

Після чого привід 8 переміщує виштовхувач 5 по порожнині завантажувального пристрою 6 і переміщує закладну деталь 7 в положення II.

Виштовхувач 5 за допомогою приводу 8 переміщує закладну деталь 7 з положення II в задану точку формуючої порожнини, положення III. Через заданий проміжок часу виштовхувач 5 за допомогою приводу 8 повертається у положення IV.

Після заданого проміжку часу на остаточне формування виробу виштовхувач 5 повертається у вихідне положення I. Після цього форма розкривається, а виріб виймається з формуючої порожнини 3.

Для формування виробів методом лиття під тиском (рис. 2) підготовлена порція полімеру з певним тиском вприскується у формуючу порожнину 3 прес-форми, яка утворена матрицею 1 та пуансоном 2 до моменту її заповнення. Щуп 4 в цей момент знаходиться в початковому положенні, у його внутрішню порожнину подається закладна деталь 6, завдяки тому, що отвір у стінці прес-форми та отвір 5 на поверхні щупа 4 сполучаються. В цей момент привід 11 переміщує заслінку 10, відкриваючи вихідний отвір щупа 4. Після цього привід 7 щупа 4 переміщує його в напрямку формуючої порожнини 3 на задану величину, після чого привід 8 переміщує виштовхувач 9 по внутрішньому каналу щупа 4, виштовхує закладну деталь 6 в заповнену формуючу порожнину 3 на задану величину ходу телескопічного щупа 4. Після виштовхування закладної деталі щуп 4 разом з виштовхувачем 9 переміщується в початкове положення приводом 7, а заслінка 10 закривається приводом 11. Здійснюється витримка матеріалу в формуючій порожнині

3 та охолодження виробу. Після цього форма розкривається, а виріб виймається з формуючої порожнини.

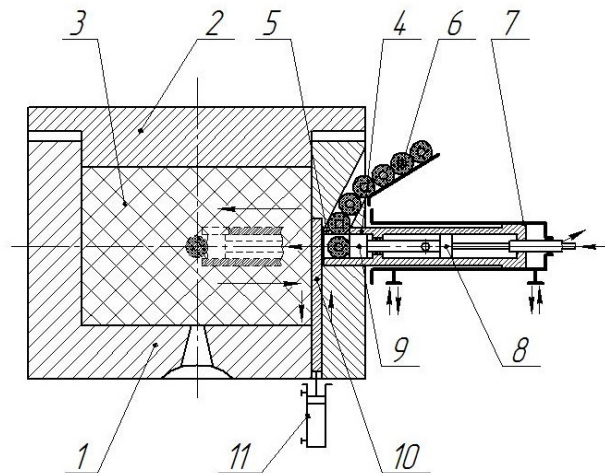


Рис. 2 – Схема форми для лиття під тиском

Для формування споряджених ІД довгомірних виробів з внутрішньою порожниною методом екструзії запропоновано конструкцію екструзійної головки (рис. 3), яка містить вхідний канал живлення 1, матрицю 2, що формує зовнішню поверхню полімерного виробу та дорн 3, що утворює внутрішню поверхню виробу. Дорн 3 кріпиться в корпусі 2 за допомогою дорнотримача 4 у вигляді ніжок. Дорнотримач 4 оснащено щонайменше одним каналом 5, який на вході з'єднаний з пристроєм додаткового живлення 6, а на виході зі зворотним клапаном 7 (за необхідності). В пристрої додаткового живлення 6 знаходиться концентрат суміші полімерів та інтелектуальних датчиків 8. Кінцеве розташування інтелектуальних датчиків 8 в готовому виробі визначає радіальну координату вихідного формуючого каналу 9.

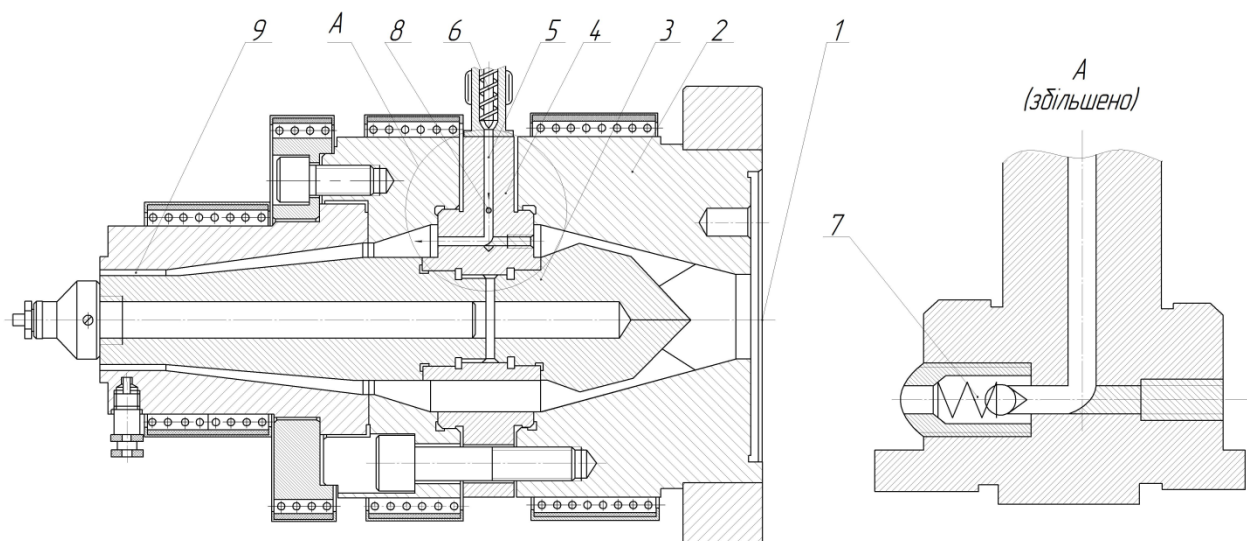


Рис. 3 – Схема головки



Пройшовши зону дорнотримача 4, в розплав через канал 5 з пристрою додаткового живлення 6 крізь зворотний клапан 7 разом із полімером потрапляють ІД 8, які в подальшому рухаються до вихідного формуючого каналу 9. В результаті на виході з головки одержуємо полімерний виріб, в стінці якого містяться інтелектуальні датчики.

Оскільки ІД зазвичай розташовуються біля стінки виробу, велике значення мають ефекти, що виникають у пристінних шарах полімерного матеріалу [9]. Зазначені ефекти можуть впливати на зміну в'язкості полімеру у пристінному шарі, що в свою чергу впливатиме на точність розташування ІД [10]. Раніше проведені числові моделювання [11, 12] продемонстрували високу ступінь впливу пристінних ефектів на процес течії. З огляду на специфіку введення ІД у полімерний матеріал, врахування пристінних ефектів є вкрай важливим при моделюванні і проектуванні обладнання для створення ІПКМ.

Для дозованого введення ІД при формуванні профільних полімерних виробів в екструзійній головці пропонується два варіанти конструктивного оформлення інжектуючих пристроїв, розташованих в зоні вихідного формуючого каналу. На рис. 4 представлено пристрій для дозованого введення ІД на певну глибину та з певним кроком їх розташування. Мікродатчики змішуються з полімером в черв'ячному пластикаторі 1, з якого утворена суміш потрапляє в інжекційний циліндр 2 і дозовано впорскується ним під заданим тиском безпосередньо в формуючий канал головки 3 за заданою періодичністю циклу. Синхронно з рухом інжекційного циліндра заслінка відкриває та закриває отвір до формуючого каналу. Тиск в гідроциліндрі інжекції перевищує тиск в формуючому каналі, що дозволяє занурювати датчики на задану глибину.

В разі необхідності введення, наприклад одного датчика в певну точку профільного екструдованого виробу запропоновано конструкцію інжекційного пристрою, схему якого представлено на рис. 5. В процесі екструзії частка полімерної композиції з формуючого каналу заповнює порожнину інжекційного циліндра 1. Після чого відкривається заслінка 2 і датчик 3, наприклад, який знаходиться в полімерній оболонці, проштовхується плунжером в інжекційну порожнину, де змішується з розплавом, що знаходиться в ній. Заслінка 2 закривається і за допомогою плунжера 6 здійснюється інжекція розплаву з датчиком 3 в формуючий канал 7.

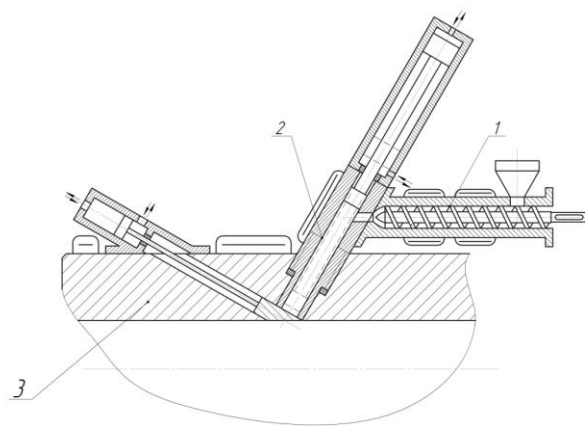


Рис. 4 – Схема інжектуючого пристрою для введення суміші ІД з розплавом

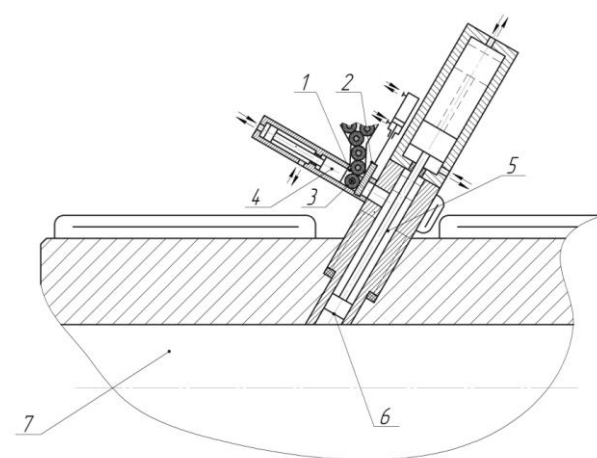


Рис. 5 – Схема інжектуючого пристрою для введення відокремлених ІД

З метою встановлення необхідних значень тиску інжекційного пристрою для занурення ІД на задану глибину здійснювалось числове моделювання [13], в ході якого змінювався тиск і кут нахилу інжекційного пристрою та визначалася глибина занурення датчика. Встановлено, що найбільша глибина введення датчиків досягається при куті нахилу у  $25^\circ$ . Результати розрахунків при куті нахилу інжекційного пристрою  $25^\circ$  зображено на рис. 6.

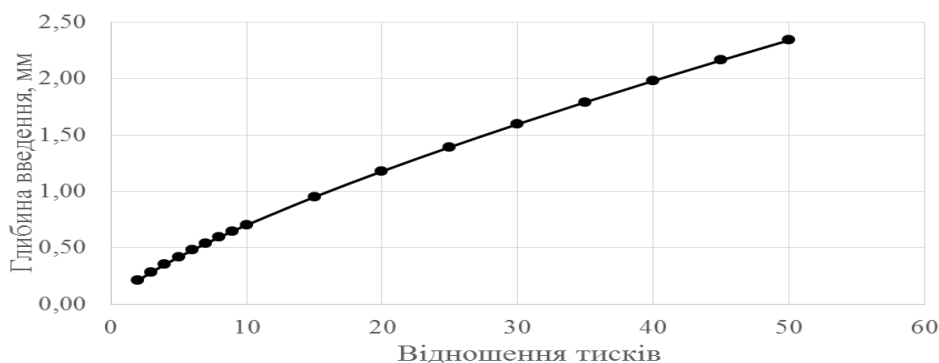


Рис. 6 – Залежність глибини введення датчика від відношення тисків

Отже, завдяки використанню інжекційних пристроїв з'явиться можливість вводити ІД крізь формулюючу головку безпосередньо в екструдовані вироби, що дасть змогу при подальшій експлуатації виробів контролювати їх напружено-деформований стан та інші параметри.

### Висновки

1. Сфера використання бездротових ІД у полімерних матеріалах надзвичайно широка. Проте відсутні технології та обладнання для автоматизованого дозованого введення датчиків у задані області полімерних виробів при їх виготовленні.

2. Запропоновані методи та пристрої забезпечать введення ІД в будь-які задані точки полімерних виробів, що дозволить зменшити кількість аварій та нещасних випадків під час експлуатації таких виробів завдяки завчасному отриманню сигналів від введених ІД про настання критичного стану.

### Список літератури:

1. Романченко, М. А. Характерні дефекти одержуваних екструзією полімерних профілів та шляхи їх усунення [Текст] / М. А. Романченко, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонюк, І. А. Горбань // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 6/11 (72). – С. 30–34. doi:[10.15587/1729-4061.2014.33648](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.33648)
2. Михайлін, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю. А. Михайлин. – Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, 2008. – 822 с.
3. Уорден, К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции [Текст] / К. Уорден. – Москва: Техносфера, 2006. – 224 с.
4. Молодцов, Г. А. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов [Текст] / Г. А. Молодцов, В. Е. Биткин, В. Ф. Симонов, Ф. Ф. Урмансов. – Москва: Машиностроение, 2000. – 352 с.
5. Barisci, J. N. Conducting polymer sensors [Text] / J. N. Barisci, C. Conn, G. G. Wallace // Trends in Polymer Science. – 1996. – Vol. 4, № 9. – P. 307–311.
6. Wallace, G. G. Conductive Electroactive Polymers: Intelligent Polymer Systems [Text] / G. G. Wallace, P. R. Teasdale, G. M. Spinks, L. A. P. Kane-Maguire. – Florida: CRC Press LLC, 2003. – 230 p. doi:[10.1201/9781420031898.fmatt](https://doi.org/10.1201/9781420031898.fmatt)
7. Hoffman, A. S. «Intelligent» polymers in medicine and biotechnology [Text] / A. S. Hoffman // Macromolecular Symposia. – 1995. – Vol. 98, № 1. – P. 645–664. doi:[10.1002/masy.19950980156](https://doi.org/10.1002/masy.19950980156)
8. Wallace, G. G. Intelligent polymer systems-concepts, approaches present uses and potential applications [Text] / G. G. Wallace // Material Forum. – 1992. – Vol. 16, № 2. – P. 111–115.
9. Sokolskiy, A. L. Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment [Text] / A. L. Sokolskiy, I. I. Ivitskiy // Modern Scientific Research and their Practical application. – 2014. – Vol. J21410. – P. 137–140.
10. Сокольський, О. Л. Визначення в'язкості пристінного шару у формуючих каналах обладнання для переробки полімерів [Текст] / О. Л. Сокольський, І. І. Івицький, В. І. Сивецький, І. О.

Мікульонюк // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – № 2. – С. 66–69.

11. Івицький, І. І. Числове моделювання впливу пристінного шару на процес течії полімеру в переробному обладнанні [Текст] / І. І. Івицький, О. Л. Сокольський, В. І. Сивецький, І. О. Мікульонюк // Хімічна промисловість України. – 2013. – № 6. – С. 34–37.
12. Івицький, І. І. Моделирование пристенного скольжения полимера [Текст] / И. И. Ивицкий // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – № 5/3 (19). – P. 8–11. doi:[10.15587/2312-8372.2014.27927](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.27927)
13. Івицький, І. І. Моделювання введення інтелектуальних датчиків у розплавленого полімерного композиційного матеріалу [Текст] / І. І. Івицький, О. Л. Сокольський, В. М. Куриленко // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2016. – № 5/3 (31). – С. 22–26. doi:[10.15587/2312-8372.2016.81236](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81236)

### Bibliography (transliterated):

1. Romanchenko, M. A., Sokolskiy, O. L., Mikulonok, I. O., Horban, I. A. (2014). Characteristic defects of extruded polymeric profiles and methods of their elimination. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(11(72)), 30–34. doi:[10.15587/1729-4061.2014.33648](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.33648)
2. Михайлін, Ю. А. (2008). Spetsial'nyye polimernyye kompozitsionnyye materialy. Saint-Petersburg: Nauchnyye osnovy i tekhnologii, 660.
3. Worden, K. (2006). Novyye intellektual'nyye materialy i konstruksii. Moscow: Tekhnosfera, 223.
4. Molodtsov, G. A., Bitkin, V. E., Simonov, V. F., Uрмансов, F. F. (2000). Formostabil'nyye i intellektual'nyye konstruksii iz kompozitsionnykh materialov. Moscow: Mashinostroyeniye, 352.
5. Barisci, J. N., Conn, C., Wallace, G. G. (1996). Conducting polymer sensors. Trends in Polymer Science, 4 (9), 307–311.
6. Wallace, G. G., Teasdale, P. R., Spinks, G. M., Kane-Maguire, L. A. P. (2003). Conductive Electroactive Polymers: Intelligent Polymer Systems. Florida: CRC Press LLC, 230. doi:[10.1201/9781420031898.fmatt](https://doi.org/10.1201/9781420031898.fmatt)
7. Hoffman, A. S. (1995). «Intelligent» polymers in medicine and biotechnology. Macromolecular Symposia, 98 (1), 645–664. doi:[10.1002/masy.19950980156](https://doi.org/10.1002/masy.19950980156)
8. Wallace, G. G. (1992). Intelligent polymer systems-concepts, approaches present uses and potential applications. Materials forum, 16 (2), 111–115.
9. Sokolskiy, A. L., Ivitskiy, I. I. (2014). Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment. Modern Scientific Research and their Practical application, J21410, 137–140.
10. Sokolskiy, O. L., Ivitskiy, I. I., Sivetskiy, V. I., Mikulonok, I. O. (2014). Vyznachennya v'язkosti prystinnoho шару u formuyuychykh kanalakh obladnannya dlya pererobky polimeriv. Naukovi visti NTUU «KPI», 2, 66–69.
11. Sokolskiy, O. L., Sivetskiy, V. I., Mikulonok, I. O., Ivitskiy, I. I. (2013). Chyslove modelyuvannya vplyvu prystinnoho шару na protses techiyi polimeru v pererobnomu obladnanni. Khimichna promyslovist Ukrainy, 6, 34–37.
12. 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)
13. Ivitskiy, I. I., Sokolskiy, O. L., Kurilenko, 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) 08.01.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Методи та пристрої для виготовлення виробів з інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів/ В. І. Сивецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івицький, О. Є. Колосов, В. М. Куриленко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.95–101. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Методы и устройства для изготовления изделий из интеллектуальных полимерных композиционных материалов/ В. И. Сивецкий, А. Л. Сокольский, И. И. Ивицкий, А. Е. Колосов, В. М. Куриленко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.95–101. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Methods and apparatus for the manufacture of intelligent polymer composites/ V. Sivetskiy, O. Sokolskiy, I. Ivitskiy, O. Kolosov, V. Kurylenko//**Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P.95–101. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-5459.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Сівецький Володимир Іванович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: [siv-vi@ukr.net](mailto:siv-vi@ukr.net).

**Сокольський Олександр Леонідович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: [sokolkiev@ukr.net](mailto:sokolkiev@ukr.net).

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

**Колосов Олександр Євгенович** – доктор технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: [a-kolosov@ukr.net](mailto:a-kolosov@ukr.net)

**Куріленко Валерій Миколайович** – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», асистент кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: [valera2106@ukr.net](mailto:valera2106@ukr.net).

**Сивецький Володимир Іванович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри хімічної, полімерної та силікатної машинобудування; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: [siv-vi@ukr.net](mailto:siv-vi@ukr.net).

**Сокольський Олександр Леонідович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: [sokolkiev@ukr.net](mailto:sokolkiev@ukr.net).

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

**Колосов Олександр Євгенович** – доктор технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: [a-kolosov@ukr.net](mailto:a-kolosov@ukr.net).

**Куріленко Валерій Миколайович** – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», асистент кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: [valera2106@ukr.net](mailto:valera2106@ukr.net).

**Sivetskiy Vladimir** – Candidate of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" head of the department of chemical, polymer and silicate engineering; Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: [siv-vi@ukr.net](mailto:siv-vi@ukr.net).

**Sokolskiy Olexander** – Candidate of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", assistant professor of chemistry, polymer engineering and silicate; Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: [sokolkiev@ukr.net](mailto:sokolkiev@ukr.net).

**Ivitskiy Igor** – Candidate of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", senior lecturer in chemical, polymer and silicate engineering; Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, 03056.; e-mail: [i.ivitskiy@kpi.ua](mailto:i.ivitskiy@kpi.ua).

**Kolosov Olexander** – Doctor of Engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", professor of chemistry, polymer engineering and silicate; Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, 03056.; e-mail: [a-kolosov@ukr.net](mailto:a-kolosov@ukr.net).

**Kurilenko Valeriy** – post-graduate student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", assistant of the department of chemical, polymer and silicate engineering; Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, 03056.; e-mail: [valera2106@ukr.net](mailto:valera2106@ukr.net).

УДК 533.24.083

Л. П. ШУМСЬКА

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ ПРИ УТЕПЛЕННІ ПОРИСТИМИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ**

В статті розглядаються результати досліджень, які проводились експериментально в лабораторних умовах та в діючих будівлях. Досліджувалися зразки нових пористих матеріалів на основі стучених гідро розчинних силікатів та кремнезему. На основі отриманих даних аналізувалися методи утеплення огорожувачих конструкцій, перебіг теплових і вологісних процесів, що відбуваються в огорожувальних конструкціях не утеплених та утеплених будівель. Отриману інформацію закладено в основу методики розрахунку параметрів мікроклімату в приміщеннях.

**Ключові слова:** теплоізоляційні пористі вироби, огорожувальна конструкція, теплопровідність, тепломасообмін, вологовміст, енергоефективність.

В статье рассматриваются результаты исследований, которые проводились экспериментально в лабораторных условиях и в действующих зданиях. Исследовались образцы новых пористых материалов на основе стучених гидрорастворимых силикатов и кремнезема. На основе полученных данных анализировались методы утепления ограждающих конструкций, протекание тепловых и влажностных процессов, происходящих в ограждающих конструкциях неутепленных и утепленных зданий. Полученную информацию заложено в основу методики расчета параметров микроклимата в помещениях.

**Ключевые слова:** теплоизоляционные пористые материалы, ограждающая конструкция, теплопроводность, тепломассообмен, влагосодержание, энергоэффективность.

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. Therefore, the problem of creating new porous insulation materials and production technologies are extremely important.

Also, one of the today current requirements is increasing of the buildings energy efficiency that primarily is implemented by increasing their thermal protection. Thermal protection increasing effect directly on improving thermal comfort rooms in the cold season. In addition, reducing the heat load for heating at enhancing thermal protection can reduce the temperature of the coolant. This leads to improved thermal comfort and air quality in premises.

The results of studies, which are carried out experimentally in the laboratory and in existing buildings, are considered. The samples of new porous materials based on chain hydro-soluble silicates and silica are described. Based on these results, methods of covering constructions insulation, the flow of heat and humidity processes occurring in the protective structures of insulated and non-insulated buildings are analyzed. Obtained information is incorporated in the basic method for microclimate parameters calculating in the premises.

**Keywords:** heat-insulation materials, covering construction, thermal conductivity, heat-and-mass transfer, moisture content, energy efficiency.

**Вступ.** Теплоізоляційні пористі вироби на основі силікатів та кремнезему належать до найбільш ефективних матеріалів для захисних елементів різного призначення. Низька густина, вогнестійкість, мала теплопровідність, разом з тим достатньо висока конструктивна міцність дозволяють вважати пористо-керамічний матеріал одним із найбільш перспективних матеріалів для будівництва. Тому проблема створення нових пористих теплоізоляційних матеріалів і технологій їх виробництва є надзвичайно актуальною.

Також однією з актуальних вимог сучасності є підвищення енергетичної ефективності будівель, що реалізується, насамперед, за рахунок посилення їх теплового захисту. Посилення теплозахисту прямо позначається на поліпшенні теплового комфорту приміщень у холодну пору року. Крім того, зменшення теплового навантаження на опалення при посиленні теплозахисту дозволяє знизити температуру теплоносія. Це призводить до поліпшення теплового комфорту і якості повітря в приміщенні.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** В літературі наводиться багато інформації щодо різних схем утеплюючих конструкцій [1–5], теплофізичних властивостей нових теплоізоляційних матеріалів [3–8] та способів їх виробництва [5–11].

Наприклад, в роботах [1, 2] наводиться детальний аналіз структури матеріалів, залежності теплофізичних характеристик від структурних показників та закономірності перебігу теплообмінних процесів. Але відсутня інформація щодо впливу на ці процеси вологості.

В роботах [5–8], крім того, теоретично аналізуються процеси перенесення тепла в пористому середовищі, але не враховуються вологовміст та форма пор. Звісно, це призводить до зниженої оцінки теплопровідності.

Роботи [9–11] присвячено розробці методів формування пористої структури. Але вологісні параметри не досліджувалися. Врахування впливу вологи на інтенсивність теплообмінних процесів в теоретичних моделях – задача складна і, ймовірно, не може бути повною мірою вирішена. Тому тільки експериментальні дані можуть надавати реальні результати щодо зазначеного впливу вологості і їх, звичайно, слід використовувати в теоретичних моделях.

**Цілі та задачі дослідження. Методи проведення експерименту.** Для оцінки кількісного ефекту утеплення будівлі була створено різні математичні моделі перехідних теплових процесів у будівлі та відповідні методики розрахунку.

Метою експериментальних досліджень було визначення тепловологісного стану огорожувальної конструкції будівлі із нового матеріалу, а також для оцінки її ефективності.

Моделювання тепловологісного режиму огорожувальної конструкції при програмному відпуску теплоти виконувалось на експериментальному стенді, в основу якого покладено регулювання відпуску теплоти в приміщенні. Схему установки в цілому та її загальний вигляд представлено на рис. 1, 2.

© Л. П. Шумська. 2016



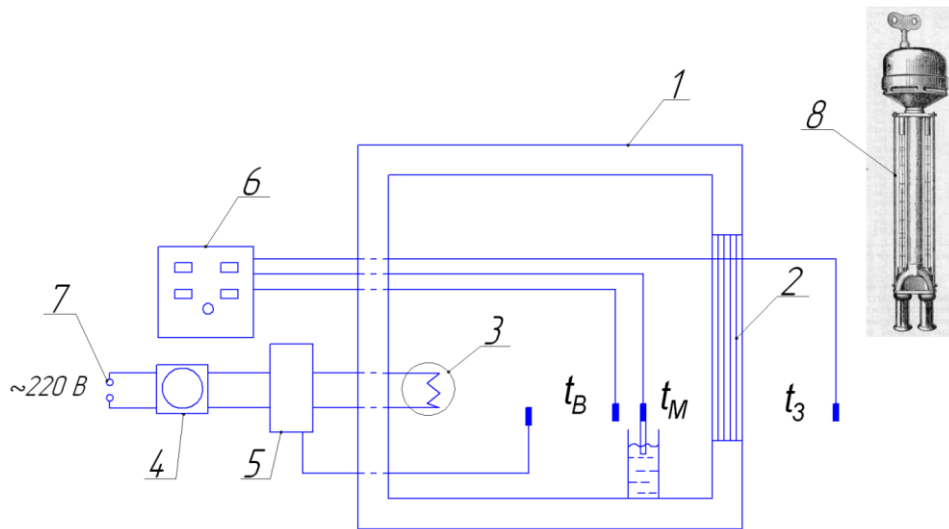


Рис. 1 – Схема експериментальної установки

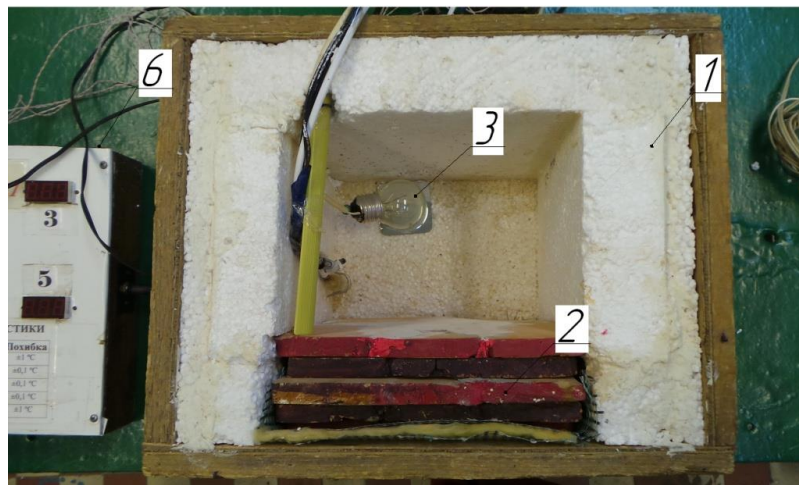


Рис. 2 – Фото експериментальної установки (вигляд зверху)

Експериментальна установка складається з коробки (1) зі стінками, утепленими пінопластом товщиною 5 см. Одна із стінок коробки має прямокутний виріз для вставлення тонких цегляних пластин (2), на прикладі яких досліджувались нестационарні процеси тепло- та вологообміну. В середині та зовні експериментальної установки встановлені датчики температури «сухого» і «мокрого» термометрів. Температура в середині установки регулювалась нагрівачим елементом (3), що автоматично вмикалась та вимикалась за допомогою датчика програми (4) та терморегулятора (5), імітуючи програмне регулювання. Датчик програми та терморегулятор працюють від електромережі (7). Результати замірів температури виводились на цифровий екран датчиків температури (6). Контрольні виміри проводилися аспіраційним психрометром Ассмана (8).

Експериментальна огорожувальна конструкція складалась з п'яти цегляних пластин розміром 20×20 см товщиною 1 см кожна (рис. 3). Торці кожної пластини були оброблені лаком для запобігання розповсюдження вологи, що міститься всередині огорожувальної конструкції та надходить до неї.

В ході експерименту проводилися заміри температури і вологості повітря в середині та зовні експериментальної установки, та заміри масової вологи

цегляних пластин ваговим методом. В установці було встановлено два датчики температури, один з яких був обмотаний батистом та опущений у ємність з дистильованою водою. За допомогою цього датчика виконувалися заміри температури «мокрого» термометра. Інший датчик температури – заміри сухого термометра. Третій датчик було встановлено на зовнішній стінці коробки для вимірювання температури зовнішнього повітря.



Рис. 3 – Фото експериментальної огорожувальної конструкції

Вологість повітря зовні експериментальної установки вимірювалась один-два рази на добу.



Було проведено лабораторні дослідження для неутепленої та утепленої зовні огорожувальної конструкції.

Усі експерименти проводились в лабораторному приміщенні, а саме у підвалі, де спостерігалась приблизно постійна температура повітря.

Прилади, що використовувались для вимірювань:

– для визначення відносної вологості повітря використовувався аспіраційний психрометр Ассмана (клас точності – 0,1 °С);

– для зважування пластин у ході експерименту використовувалися лабораторні ваги технічні 2-го класу Т-200 з точністю вимірювання до 0,01 г;

– для сушіння пластин використовувалася електрична сушильна шафа з температурою нагріву до 200 °С та плавним регулюванням температури в режимі від 1 до 5;

– у якості регулятора температури для експериментальної установки використовувався терморегулятор плавно затухаючого типу ТРТ-1000, що працює від електричної мережі. Терморегулятор являє собою електронний пристрій з тристоронньою безконтакт-

ною системою регулювання температури у діапазоні від +20 °С до +50 °С. Задання температури виконується двома змінними резисторами, плавного і грубого регулювання.

Результати замірів внутрішньої та зовнішньої температури експериментальної установки виводились на блок приладу МІВ-1, де встановлені датчики температури типу Т-0,56 DS.

#### Неутеплена огорожувальна конструкція.

Вихідні дані:

Параметри приміщення (навколишнього середовища):  $t=18,6$  °С,  $\varphi=92$  %,  $P=1898,88$  Па.

Параметри внутрішнього повітря експериментальної установки задавались за датчиком – періодично нагріваючись та охолоджуючись.

Заміри температури сухого та мокрого термометрів, на основі яких визначався парціальний тиск в середині експериментального приміщення, робились через кожну 1 хвилину протягом циклу ввімкнення та вимкнення нагрівального елемента. Результати розрахунку представлені в табл. 1, рис. 4, 5.

Таблиця 1 – Результати розрахунку

Час експерименту, хв	Температура в середині експериментального приміщення, °С	Парціальний тиск в середині експериментального приміщення, Па	Час експерименту, хв	Температура в середині експериментального приміщення, °С	Парціальний тиск в середині експериментального приміщення, Па
0	22,6	2330,7	39	30,4	2951,9
1	30,3	3065,1	40	30,4	2951,9
2	31,3	3154,0	41	30,4	2951,9
3	31,4	3217,9	42	30,4	2951,9
4	31,4	3171,9	43	30,4	2951,9
5	31,3	3108,3	44	30,4	2951,9
6	31,2	3089,9	45	30,4	2951,9
7	31,1	3072,2	46	29,6	2860,7
8	30,9	3036,9	47	28,8	2795,3
9	30,8	3064,3	48	28,3	2769,1
10	30,7	3002,9	49	27,8	2809,0
11	30,6	2985,2	50	27,3	2721,0
12	30,5	2968,9	51	27,3	2721,0
13	30,4	2951,9	52	26,9	2693,44
14	30,4	2951,9	53	26,9	2693,44
15	30,4	2951,9	54	26,1	2603,37
16	30,4	2951,9	55	26,1	2603,37
17	30,4	2951,9	56	25,5	2544,36
18	30,4	2951,9	57	25,5	2544,36
19	30,4	2951,9	58	25	2534,4
20	30,4	2951,9	59	25	2534,4
21	30,4	2951,9	60	24,6	2536,26
22	30,4	2951,9	61	24,6	2536,26
23	30,4	2951,9	62	24,3	2460,78
24	30,4	2951,9	63	24,3	2460,78
25	30,4	2951,9	64	23,9	2401,65
26	30,4	2951,9	65	23,9	2401,65
27	30,4	2951,9	66	23,6	2388,66
28	30,4	2951,9	67	23,6	2388,66
29	30,4	2951,9	68	23,4	2387,91
30	30,4	2951,9	69	23,4	2387,91
31	30,4	2951,9	70	23,1	2373,84
32	30,4	2951,9	71	23,1	2373,84
33	30,4	2951,9	72	22,9	2345,28
34	30,4	2951,9	73	22,9	2345,28
35	30,4	2951,9	74	22,8	2331,84
36	30,4	2951,9	75	22,8	2331,84
37	30,4	2951,9	76	22,6	2303,28
38	30,4	2951,9	–	–	–

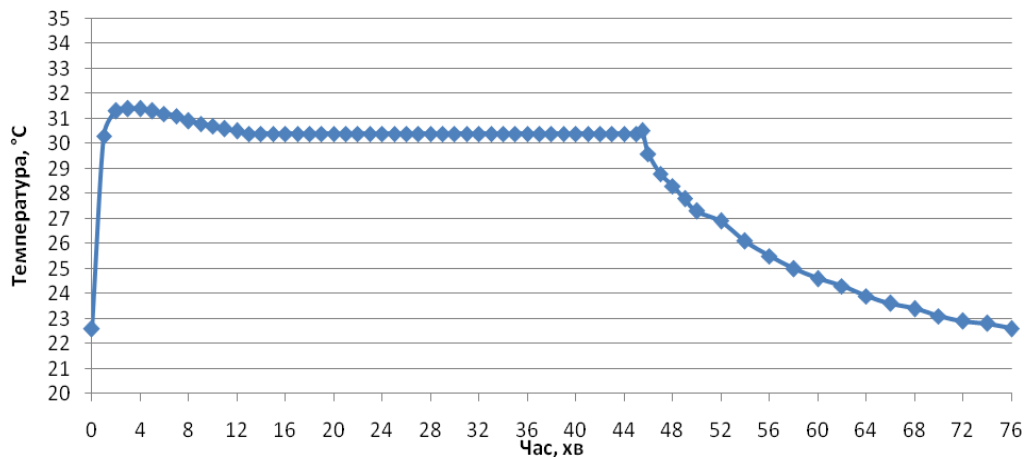


Рис. 4 – Графік температурного розподілу всередині експериментального приміщення

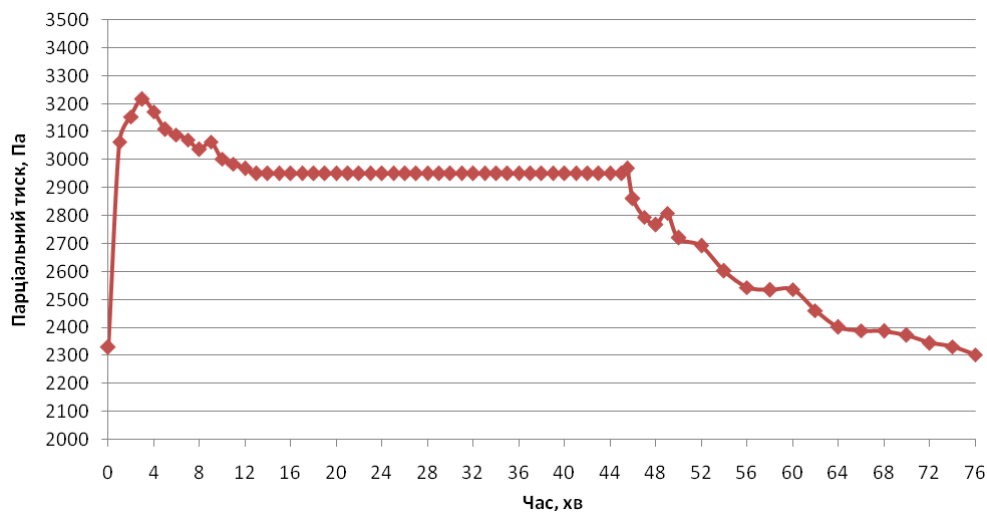


Рис. 5 – Графік розподілу парціального тиску всередині експериментального приміщення

Заміри ваги цегляних пластин виконувались один раз на добу (табл. 2, табл. 3). Тривалість експерименту визначався переходом пластин у стаціонарний режим – коли пластини перестають набирати вологу, їх вага стає незмінною. Загальний час експерименту з не утепленою огорожувальною конструкцією – 187,8 годин.

Таблиця 2 – Вага пластин у сухому стані

Вага пластин у сухому стані, г				
1	6	3	4	2
750,20	712,89	740,00	707,86	825,80

Таблиця 3 – Вага пластин у сухому стані

Час дослід, год	Вага пластин у ході експерименту, г				
	1	6	3	4	2
0	752,57	715,14	741,85	710,23	828,70
19,8	753,13	715,66	743,07	710,54	828,90
44,5	753,23	716,00	743,07	710,9	829,10
68,5	753,52	716,04	743,07	711,10	829,30
144,1	753,29	715,73	743,05	711,26	829,50
164,8	753,31	715,70	742,85	711,21	829,60
187,8	753,3	715,52	742,85	711,18	829,60

На основі отриманих результатів ваги пластин була розрахована їх масова волога  $\omega$ , %:

$$\omega = \frac{m_i - m_1}{m_1}, \quad (1)$$

де  $m_1$  – вага пластин у сухому стані, г;  $m_i$  – вага пластин у ході експерименту, г.

Масова волога пластин за експериментальними даними представлена в табл. 4.

Таблиця 4 – Масова волога пластин

Час дослід, год	$\omega$ , %				
	1	6	3	4	2
0	0,32	0,32	0,25	0,34	0,35
19,8	0,39	0,39	0,42	0,38	0,38
44,5	0,40	0,44	0,42	0,43	0,40
68,5	0,44	0,44	0,42	0,46	0,43
144,1	0,41	0,40	0,41	0,48	0,45
164,8	0,42	0,39	0,39	0,47	0,46
187,8	0,41	0,37	0,39	0,47	0,46

Результати експерименту порівнювались з розрахунками, проведеними за математичною моделлю. Масова волога пластин за розрахунковими даними представлена в табл. 5.

Таблиця 5 – Масова волога пластин за розрахунковими даними

Час дослід, год	$\omega$ , %				
	1	6	3	4	2
0	0,32	0,31	0,25	0,33	0,35
19,8	0,45	0,36	0,33	0,33	0,33
44,5	0,47	0,44	0,4	0,38	0,36
68,5	0,48	0,44	0,42	0,4	0,36
144,1	0,48	0,46	0,45	0,42	0,37
164,8	0,47	0,45	0,43	0,41	0,37
187,8	0,47	0,45	0,44	0,41	0,37

Схема розташування пластин у ході експерименту зображено на рис. 6.

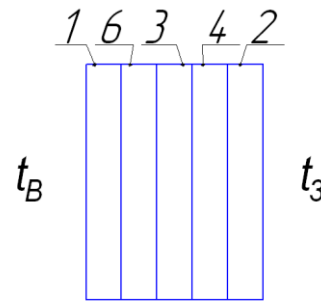


Рис. 6 – Схема розташування пластин, де 1, 2, 3... – номери експериментальних пластин

Результати порівняння масової вологи кожної експериментальної пластини зображені на рис. 7, де червоним кольором позначено розрахункові дані, а синім – експериментальні.

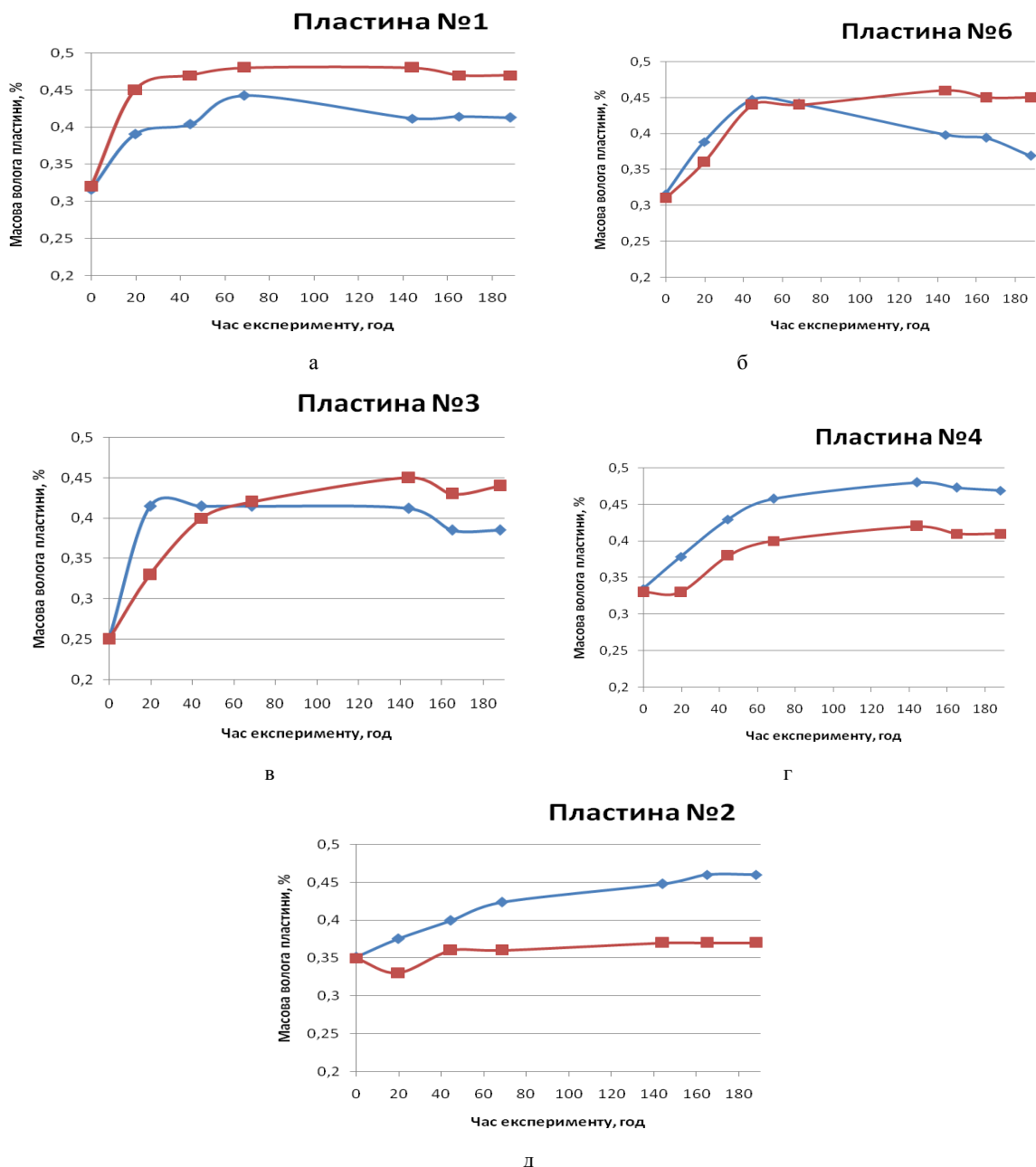


Рис. 7 – Порівняння результатів натурального експерименту з математичним розрахунком: а – пластина №1; б – пластина № 6; в – пластина № 3; г – пластина № 4; д – пластина № 2.

**Утеплена зовні огорожувальна конструкція**

Загальний час експерименту з утепленою зовні огорожувальною конструкцією – 94 години. Вага пластин у сухому стані та у ході експерименту представлено у табл. 6, 7.

Таблиця 6 – Вага пластин у сухому стані

Вага пластин у сухому стані, г				
1	6	3	4	2
750,20	712,89	740,00	707,86	825,80

Таблиця 7 – Вага пластин в ході експерименту

Час до- сліду, год	Вага пластин у ході експерименту, г				
	1	6	3	4	2
0	751,32	714,35	741,21	708,70	826,10
3,9	752,07	715,085	741,805	709,21	827,63
23,2	752,31	715,34	742,35	710,10	828,34
94,0	752,57	715,51	742,60	710,27	828,62

Масова волога пластин за експериментальними даними представлена в табл. 8.

Масова волога пластин за розрахунковими даними представлена в табл. 9.

Таблиця 8 – Масова волога пластин

Час до- сліду, год	$\omega$ , %				
	1	6	3	4	2
0	0,15	0,21	0,16	0,12	0,04
3,9	0,25	0,31	0,24	0,19	0,22
23,2	0,28	0,34	0,32	0,32	0,31
94,0	0,32	0,37	0,35	0,34	0,34

Таблиця 9 – Масова волога пластин

Час до- сліду, год	$\omega$ , %				
	1	6	3	4	2
0	0,15	0,19	0,15	0,11	0,03
3,9	0,29	0,16	0,13	0,14	0,18
23,2	0,35	0,33	0,3	0,28	0,28
94,0	0,36	0,35	0,34	0,32	0,3

Схему розташування пластин у ході експерименту зображено на рис. 6

Результати порівняння масової вологи кожної експериментальної пластини зображені на рис. 8, де червоним кольором позначено розрахункові дані, а синім – експериментальні.

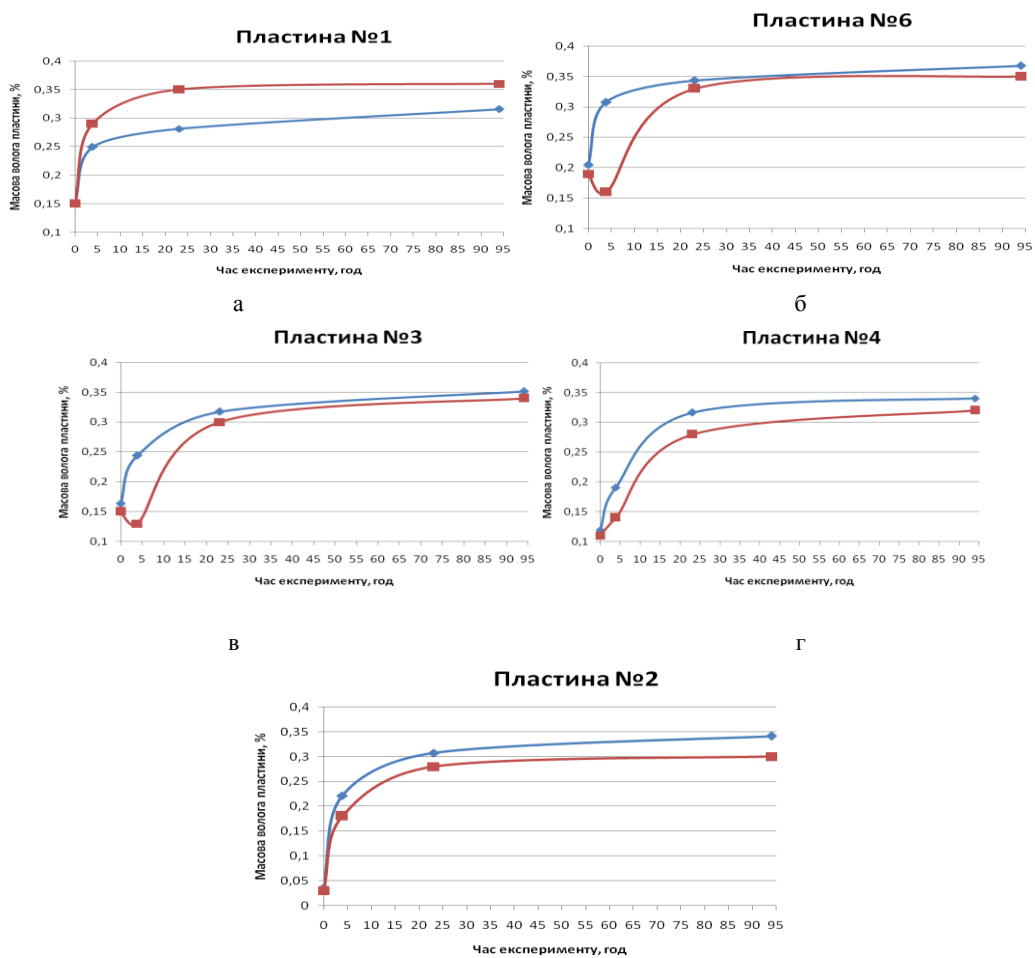


Рис. 8 – Порівняння результатів натурального експерименту з математичним розрахунком: а – пластина №1; б – пластина № 6; в – пластина № 3; г – пластина № 4; д – пластина № 2.

**Висновки**

1. Результати натурного експерименту для неутепленої огорожувальної конструкції показали, що за перші 60 годин експерименту експериментальна конструкція інтенсивно набирала вологу. Далі процес зміни масової вологи кожної експериментальної пластини починав сповільнюватись, тобто конструкція починала виходити на більш стаціонарний режим накопичення вологи. Приблизно ж такі значення були отримані у ході математичного розрахунку даної експериментальної конструкції. Точність наукових розрахунків складає >5%, проте це можна пояснити тим, що у ході експерименту не вдалося забезпечити ідеальний тепловий контакт між пластинами.

За результатами експерименту видно, що максимальний вологовміст спостерігається у зовнішній експериментальній пластині (№1). Це відповідає загальним уявленням про процеси тепломасообміну в неутеплених огорожувальних конструкціях.

2. Результати натурного та цифрового експерименту для огорожувальної конструкції із зовнішнім утепленням показали, що за перші 25 годин експерименту теплоізоляційна конструкція із нового матеріалу інтенсивно набирала вологу. Далі конструкція починала виходити на більш стаціонарний режим накопичення вологи. Приблизно такі ж значення були отримані у ході математичного розрахунку даної експериментальної конструкції. Точність наукових розрахунків складає <5%.

За результатами експерименту встановлено, що кількість вологи, накопиченої у зовнішній експериментальній конструкції, значно менша, ніж у неутепленій огорожі. Це відповідає загальним уявленням про процеси тепломасообміну в утеплених зовнішніх огорожувальних конструкціях.

**Список літератури:**

- Братута С. Г. Пористі теплоізоляційні матеріали [Текст] / С. Г. Братута, А. М. Павленко, А. В. Кошляк, О. В. Кругляков. – Харків: ТОВ «ЕДЕНА», 2010. – 107 с.
- Bodnarova, L. Behaviour of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete Exposed to High Temperatures [Text] / L. Bodnarova, R. Hela, M. Hubertova, I. Novakova // International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. – 2014. – Vol. 8, № 12. – P. 1205–1208.
- Nimmo, J. Porosity and Pore Size Distribution [Text] / J. Nimmo // Encyclopedia of Soils in the Environment. – 2005. – P. 295–303. doi:10.1016/b0-12-348530-4/00404-5
- Pavlenko, A. M. Analysis of thermal peculiarities of alloying with special properties [Text] / A. M. Pavlenko, B. O. Usenko, H. V. Koshlak // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 2. – P. 15–19.
- Lopez-Pamies, O. Effects of internal pore pressure on closed-cell elastomeric foams [Text] / O. Lopez-Pamies, P. P. Castaneda, M. I. Idiart // International Journal of Solids and Structures. – 2012. – Vol. 49, № 19–20. – P. 2793–2798. doi:10.1016/j.ijsolstr.2012.02.024
- Aboudi, J. Multiscale Modeling of Composites [Text] / J. Aboudi, S. M. Arnold, B. A. Bednarczyk // Micromechanics of Composite Materials. – 2013. – P. 447–540. doi:10.1016/b978-0-12-397035-0.00007-0
- Pavlenko, A. M. Design of processes of thermal bloating of silicates [Text] / A. M. Pavlenko, H. V. Koshlak // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 1. – P. 118–122.
- Pavlenko, A. Production of porous material with projected thermophysical characteristics [Text] / A. Pavlenko, H. Koshlak // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 1. – P. 123–128.
- Pavlenko, A. M. Peculiarities of controlled forming of porous structure [Text] / A. M. Pavlenko, H. V. Koshlak, B. O. Usenko // Thermal technology. – 2014. – № 6. – P. 92–95.
- Pavlenko, A. M. Thermal conductivity of the gas small space [Text] / A. M. Pavlenko, H. V. Koshlak, B. O. Usenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 2. – P. 20–24.
- Pavlenko, A. Study of the formation of gas-vapor in the liquid mixture [Text] / A. Pavlenko, H. Koshlak, A. Cheilytko, M. Nosov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/5 (82). – P. 58–65. doi:10.15587/1729-4061.2016.75428
- Bratuta, E. H. (2010). Porysti teploizoliatsiini materialy. Kharkov: TOV «EDENA», 107.
- Bodnarova, L., Hela, R., Hubertova, M., Novakova, I. (2014). Behaviour of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete Exposed to High Temperatures. International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 8 (12), 1205–1208.
- 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
- Pavlenko, A. M., Usenko, B. O., Koshlak, H. V. (2014). Analysis of thermal peculiarities of alloying with special properties. Metallurgical and Mining Industry, 2, 15–19.
- Lopez-Pamies, O., Castaneda, 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
- Aboudi, J., Arnold, S. M., Bednarczyk, B. A. (2013). Multiscale Modeling of Composites. Micromechanics of Composite Materials, 447–540. doi:10.1016/b978-0-12-397035-0.00007-0
- Pavlenko, A. M., Koshlak, H. V. (2015). Design of processes of thermal bloating of silicates. Metallurgical and Mining Industry, 1, 118–122.
- Pavlenko, A. M., Koshlak, H. V. (2015). Production of porous material with projected thermophysical characteristics. Metallurgical and Mining Industry, 1, 123–128.
- Pavlenko, A. M., Koshlak, H. V., Usenko, B. O. (2014). Peculiarities of controlled forming of porous structure. Thermal technology, 6, 92–95.
- Pavlenko, A. M., Koshlak, H. V., Usenko, B. O. (2014). Thermal conductivity of the gas small space. Metallurgical and Mining Industry, 2, 20–24.
- Pavlenko, A., Koshlak, H., Cheilytko, A., Nosov, M. (2016). Study of the formation of gas-vapor in the liquid mixture. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(5(82)), 58–65. doi:10.15587/1729-4061.2016.75428

**Bibliography (transliterated):**

Надійшла (received) 10.01.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Дослідження теплового захисту будівель при утепленні пористими теплоізоляційними матеріалами/ Л. П. Шумська// Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – № 4(1176). – С.102–109. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Исследование тепловой защиты зданий при утеплении пористыми теплоизоляционными материалами/ Л. П. Шумская// Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – № 4(1176). – С.102–109. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.**



**Research of thermal protection of buildings by warming of porous heat-insulation materials / L. Shumska**//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P. 102–109. – Bibliogr.: 11. – 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 теплопостачання, вентиляції та теплоенергетики Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка; Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, Україна 36011; e-mail: [schumska@gmail.com](mailto:schumska@gmail.com)

**Шумская Любовь Петровна** – директор Полтавського коледжа нафти і газу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, соискатель кафедри теплоснабження, вентиляції и теплоенергетики Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка; Першотравневий проспект, 24, г. Полтава, Україна 36011; e-mail: [schumska@gmail.com](mailto: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](mailto:schumska@gmail.com)

УДК 621.316

**М. Я. ОСТРОВЕРХОВ, М. О. РЕУЦЬКИЙ, Д. Я. ТРИНЧУК**

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НЕЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА З АВТОНОМНИМ ЖИВЛЕННЯМ НА ПРИКЛАДІ ПРИВОДА ЕЛЕКТРОСКУТЕРА

У зв'язку з вимогами енергоефективності та екологічності транспортні засоби з автономним електроприводом набувають все більшої популярності. Характеристики цих засобів обмежуються параметрами джерела живлення – літій-іонного акумулятора, який має певні недоліки. Усунути ці недоліки можна шляхом підключення суперконденсаторів паралельно до акумулятора. В роботі за допомогою створеної та перевіреної експериментами комп'ютерної моделі проведено дослідження системи привода електроскутера, що живиться як від акумулятора, так і від акумулятора з паралельно з'єднаним суперконденсатором. За отриманими результатами проведено порівняльний аналіз режимів роботи електроскутера та зроблені висновки щодо ефективності використання суперконденсатора.

**Ключові слова:** електроскутер, літій-іонний акумулятор, суперконденсатор, аналіз, комп'ютерна модель.

В связи с требованиями энергоэффективности и экологичности транспортные средства с автономным электроприводом приобретают все большую популярность. Характеристики этих средств ограничиваются параметрами источника питания – литий-ионного аккумулятора, который имеет определенные недостатки. Устранить эти недостатки можно путем подключения суперконденсаторов параллельно к аккумулятору. В работе с помощью созданной и проверенной экспериментами компьютерной модели проведено исследование системы привода электроскутера, питающейся как от аккумулятора, так и от аккумулятора с параллельно соединенным суперконденсатором. По полученным результатам проведен сравнительный анализ режимов работы электроскутера и сделаны выводы относительно эффективности использования суперконденсатора.

**Ключевые слова:** электроскутер, литий-ионный аккумулятор, суперконденсатор, анализ, компьютерная модель.

In modern world the necessity of meeting requirements of energy efficiency and ecology provide rapid increasing of popularity of vehicles with independent electric drive. However, the performance of such vehicles is limited by the parameters of the power supply, which is mostly the Li-Ion accumulator despite its disadvantages. This paper shows the possibility of increasing of electric drive performance by using supercapacitor, connected to the accumulator battery in parallel.

The results of the research include diagrams and analysis of comparative characteristics of electric scooter drive performance with supercapacitor both used and excluded.

The scientific novelty of this paper is the research and its results as the comparative analysis of working modes of physically existing electric motor for a usage in an independent vehicle electric drive under conditions of using and not using supercapacitors.

The practical significance is the fact that this research can be used in designs of independent electric vehicle drives for increasing its energy efficiency and dynamic characteristics, which also means increasing its competitiveness on the vehicle market.

**Keywords:** electric scooter, Li-Ion accumulator, supercapacitor, analysis, computer model.

**Вступ.** На сьогоднішній день в галузі транспорту значного розвитку набувають електромобілі, поступово витісняючи свої аналоги на двигуні внутрішнього згорання. В якості джерела енергії в електромобілях зазвичай використовують літій-іонні або літій-полімерні акумулятори, котрі мають високі показники питомої енергії. Одним з варіантів вибору перетворювача енергії є двигун постійного струму (ДПС) [1], а в якості регульовального пристрою – напівпровідниковий перетворювач з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Таке виконання має ряд недоліків: великий внутрішній опір акумулятора

обмежує пускову потужність транспортного засобу та зменшує ККД привода, імпульсна форма навантаження на акумулятор, яка утворюється при роботі ШІМ, та великі пускові струми скорочують термін його дії.

Для того, щоб вирішити дані проблеми необхідно зменшити внутрішній опір джерела живлення шляхом підключення паралельно до акумулятора суперконденсаторів, оскільки останні мають суттєво менший активний опір, ніж літій-іонні акумулятори, та менш чутливі до ударних струмів [2].

© М. Я. Островерхов, М. О. Реуцький, Д. Я. Трінчук. 2016

Метою роботи є оцінка ефективності використання паралельного з'єднання акумулятора і суперконденсатора для живлення електропривода транспортного засобу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** По суті, основним обмежуючим продуктивність електричних транспортних засобів об'єктом є акумулятор. Тому вже було проведено ряд робіт, в яких розглядалися варіанти усунення тих чи інших його недоліків.

Був запропонований варіант використання паралельно до акумулятора суперконденсатор [2]. Щоправда, в даній роботі були проведені виключно дослідження впливу суперконденсатора на акумулятор при роботі на навантаження, але не було проведення впливу такого підключення на саме навантаження.

Більш детальні дослідження системи паралельне з'єднання акумулятора та суперконденсатора – двигун були проведені в роботах [3] та [4]. Ці дослідження показали ефективність такого виду живлення для гібридних транспортних засобів. В роботах [5–7] були навіть запропоновані схеми для найбільш ефективного використання такого з'єднання. Електропривод гібридних автомобілів працює у перемінному режимі роботи, живлячись то від генератора, то від акумулятора. Такий режим роботи створює набагато більше проблем як для акумулятора, так і для двигуна, ніж робота тільки від акумулятора, тому використання суперконденсаторів там є більш необхідним.

В роботі [8] досліджений вплив використання суперконденсатора паралельно з акумулятором на двигун гіпотетичного електромобіля. Але в цій роботі була досліджена лише теоретична модель без яких-небудь прив'язок до реальних фізичних об'єктів.

Тому в даній роботі буде проведено дослідження електропривода транспортного засобу з автономним живленням на прикладі вибраного електроскутера. Створена комп'ютерна модель привода буде перевірена на проведених експериментальних дослідженнях двигуна для цього електроскутера. На базі перевіреної моделі будуть досліджені можливі робочі режими такого електроскутера із використанням суперконденсатора та без нього та зроблені висновки щодо ефективності такого рішення для транспортних засобів з автономним живленням.

**Вибір об'єктів електропривода, що досліджується.** Для дослідження електроприводу за транспортний засіб було вибрано електроскутер. Електроскутер – одномісний транспортний засіб, що працює на електричній тязі. За рахунок малої власної маси споживає малу кількість енергії. У зв'язку із високими масогабаритними вимогами до систем електроприводу зазвичай використовують системи з невисокою напругою для економії місця і маси акумуляторів. В якості двигунів використовують системи мотор-колесо, або компактні високошвидкісні двигуни з планетарною передачею. За базову модель електроскутера було вибрано Genata Gt1e 250. Характеристики базового електроскутера:

- потужність – 1,6 кВт;
- максимальна швидкість – 55 км/год;

– максимальна відстань – 80 км при швидкості 30 км/год;

– маса – 45 кг;

– максимальне завантаження – 150 кг.

В якості електромеханічного перетворювача для привода електроскутера був вибраний електродвигун ИУС – 0,8 постійного струму, призначений для використання у якості привода вентилятора для охолодження дизеля спеціальної техніки. Основні заводські параметри двигуна наступні:

– напруга живлення – 28 В;

– корисна механічна потужність – 800 В;

– частота обертання ротора – 6500 – 7700 об/хв;

– номінальний коефіцієнт корисної дії – 0,74;

– маса – 8,7 кг.

Для отримання необхідної потужності електроскутера 1,6 кВт можливе використання двох таких двигунів, працюючих паралельно. Додаткові необхідні параметри двигуна, такі як опори та індуктивності обмоток, момент тертя були визначенні із проведеного розрахунку двигуна на базі заводських параметрів.

Для живлення електропривода, враховуючи високі вимоги з питомої енергії, енергоефективності, низького внутрішнього опору, було вибрано батарею літій-полімерних акумуляторів Polymer Lithium-ion Rechargeable Battery з наступними параметрами:

– напруга – 27 В;

– ємність – 40 А\*год;

– внутрішній опір – 100 мОм;

– маса – 5,6 кг.

Дані об'єкти, а також система керування на базі перетворювача з ШІМ створюють систему електропривода, що живиться лише від акумулятора. Для того, щоб визначити, яку батарею суперконденсаторів слід використати, щоб ефективно покращити роботу даного привода, слід визначити необхідну ємність суперконденсаторів.

Розрахунок необхідної ємності батареї суперконденсаторів проводиться із допущення, що при повному розгоні електроскутера енергія батареї суперконденсаторів переходить в кінетичну енергію електроскутера та водія, при цьому напруга на акумуляторі має впасти до значення, не меншого ніж  $U_p - \Delta U$ , де  $U_p$  – напруга на двигуні в номінальному режимі роботи (з урахуванням падіння напруги на внутрішньому опорі акумулятора),  $\Delta U$  – допустиме тимчасове «просідання» напруги.

$$U_p = U_n - I_n \cdot r_{ак} = 27 - 40 \cdot 0,1 = 23 \text{ В} \quad (1)$$

де  $U_n = 27 \text{ В}$  – ЕРС акумулятора;  $I_n = 40 \text{ А}$  – номінальний струм ДПС;  $r_{ак} = 0,1 \text{ Ом}$  – внутрішній опір акумулятора.

Виходячи із закону збереження енергії:

$$\eta \cdot \left( \frac{2c \cdot U_1^2}{2} - \frac{2c \cdot U_2^2}{2} \right) = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

$$c = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \eta \cdot (U_1^2 - U_2^2)} = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \eta \cdot (U_n^2 - (U_p - \Delta U)^2)} =$$

$$= \frac{115 \cdot 15^2}{2 \cdot 0,74 \cdot (27^2 - (23 - 0,5)^2)} = 78,5 \text{ Ф} \quad (2)$$

де  $\eta = 0,74$  – ККД двигуна;  $m = 45+70 = 115$  кг – маса електроскутера із середньостатистичним водієм;  $v = 55$  км/год = 15 м/с – максимальна швидкість електроскутера;  $\Delta U = 0,5$  В – допустиме тимчасове «просідання» напруги.

Для покращення характеристик живлення була вибрана батарея суперконденсаторів, що складається із 11-ти з'єднаних послідовно суперконденсаторів WIMA SuperCap C з наступними параметрами кожен:

- номінальна напруга – 2,5 В;
- ємність – 1200 Ф;

– внутрішній опір – 0,5 мОм;

– маса – 235 г.

Параметри батареї:

– номінальна напруга – 27,5 В;

– ємність – 109,1 Ф;

– внутрішній опір – 5,5 мОм

– маса – 2,585 кг.

**Експериментальне дослідження ДПС.** Для дослідження двигуна постійного струму була зібрана експериментальна установка, що зображена схематично на рис. 1.

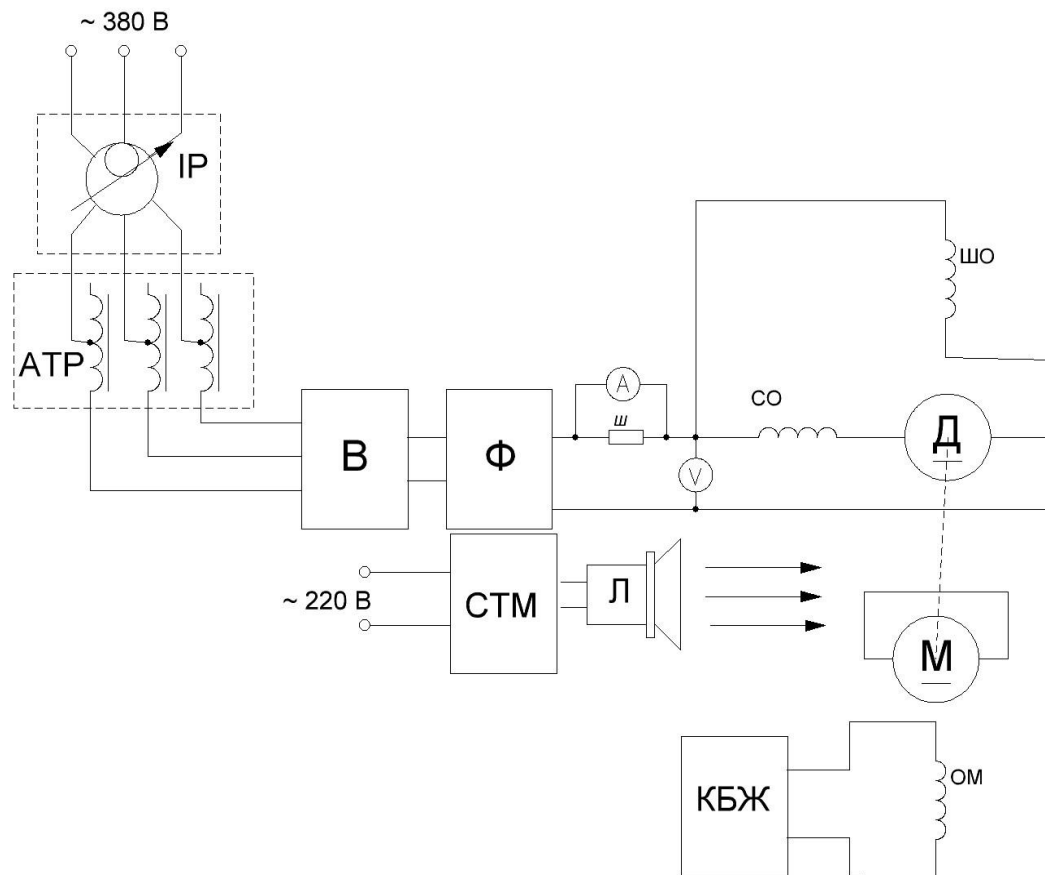


Рис. 1 – Схема експериментальної установки для дослідження двигуна постійного струму

Установка живиться трифазною мережею змінного струму 380 В. Ця напруга понижується індукційним регулятором IP до номінальної напруги входу автотрансформатора АТР – 220 В. Напруга на виході автотрансформатора, яка регулюється оператором, подається на випрямляч В, що виконаний за схемою Ларіонова, і далі йде на фільтр Ф, який являє собою паралельно включений в схему конденсатор МБГВ 1000В 100мкФ+30...10%. Після фільтра в схему включаться двигун Д. Напруга на обмотці якоря ДПС вимірюється вольтметром V, струм обмотки якоря ДПС – амперметром А із використанням шунта Ш. Із ротором ДПС на валу суміщені диски моментоміра М. Обмотки моментоміра М живляться керованим блоком живлення КБЖ, напруга на виході якого регулюється оператором. Для вимірювання частоти обертання ротора ДПС використовувався строботометр СТМ та лампа строботометра Л.

На цій установці були проведені дослід неробочого ходу ДПС, зняті механічні та робочі характеристики ДПС. Згодом дані з цих експериментів будуть співставлені з даними досліджень комп'ютерної моделі.

**Моделювання робочих режимів.** Для моделювання робочих режимів в програмному пакеті Matlab Simulink буда створена модель привода електроскутера та власне ДПС. Модель привода електроскутера зображена на рис. 2. Модель складається з наступних об'єктів:

- 1 – Модель літій-полімерного акумулятора напругою 27 В та опором 0,1 Ом;
- 2 – двигун постійного струму зі змішаним збудженням;
- 3 – блок завдання постійного моменту навантаження;
- 4 – схема обчислення моменту опору, пропорційного до квадрату швидкості;

5 – модель батареї суперконденсаторів ємністю 109,1 Ф та опором 5,5 мОм;  
 6 – ключ ШІМа;  
 7 – зворотний діод, що замикає коло для протікання струму через обмотку якоря двигуна, коли ключ 6 розімкнений;

8 – схема зворотного зв'язку за швидкістю для завдання прогальності імпульсів ШІМа;  
 9 – блок завдання швидкості руху електроскутера.

Деякі блоки та схеми виводу на екран обчислених величин не вказані на рисунку задля покращення його наочності.

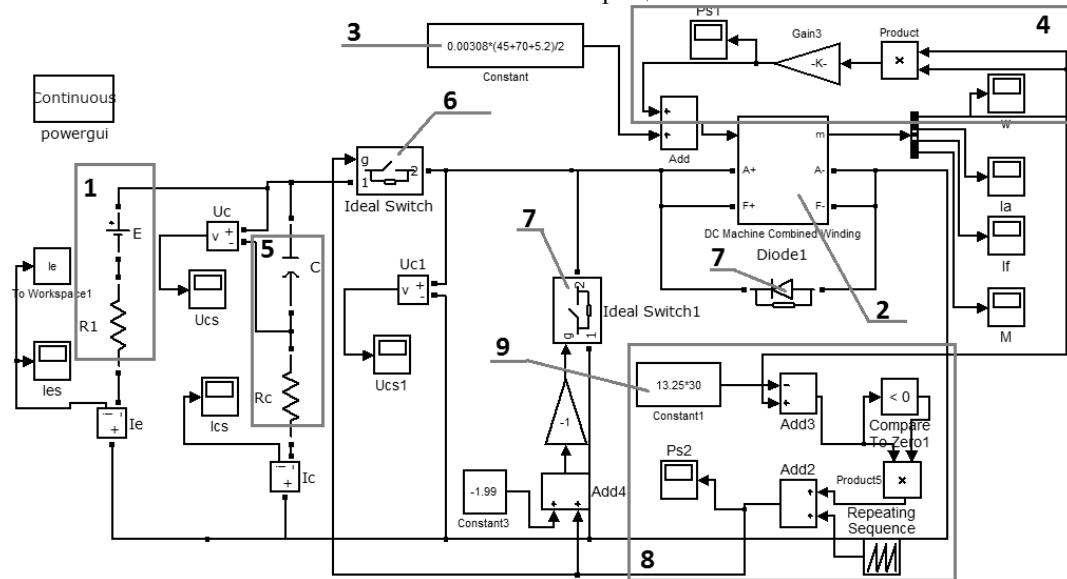


Рис. 2 – Комп'ютерна модель привода електроскутера

В даній моделі навантаження двигуна 2 складається з двох частин: постійного моменту 3, який визначається силою тертя кочення шин коліс та силою тяжіння при русі схилом, та змінного моменту 4, який визначається силою опору повітря та пропорційний до квадрату швидкості. Причому обидва ці навантаження вважаються корисними при розрахунку корисної потужності та ККД електроприводу.

Швидкість руху електроскутера регулюється ШІМом 6 за допомогою зворотного зв'язку за швидкістю 8. Необхідна величина задається блоком 9.

Суперконденсатор 5 може бути підключений паралельно до акумулятора 1 або відключений.

**Співставлення результатів комп'ютерного моделювання режимів роботи двигуна з експериментальними даними.** Для перевірки коректності моделі за її допомогою були проведені експерименти та зняті характеристики, аналогічні до тих, що були зняті під час реального експерименту.

Співставлення характеристики неробочого ходу зображено на рис. 3.

Середньоквадратичне відхилення за частотою обертання ротора результатів моделювання від експериментальних даних склало  $\sigma_n = 7,10\%$

Співставлення механічних характеристик показано зображено на рис. 4.

Також були побудовані та співставлені робочі характеристики. Середньоквадратичні відхилення при змінній нарузі результатів моделювання від експериментальних даних склали:

- за частотою обертання ротора  $\sigma_n = 4,37\%$ ;
- за струмом  $\sigma_I = 6,30\%$ ;
- за споживаною потужністю  $\sigma_{P1} = 6,30\%$ ;
- за ККД  $\sigma_\eta = 9,51\%$ .

**Висновок:** результати комп'ютерного моделювання в програмному пакеті Matlab Simulink моделі двигуна постійного струму в межах похибки, що не перевищує 10 %, співпадають з результатами аналогічних експериментів, що підтверджує правильність і точність комп'ютерної моделі.

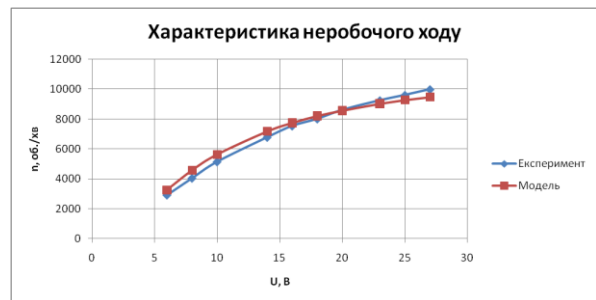


Рис. 3 – Характеристика неробочого ходу експериментальна та змодельована.

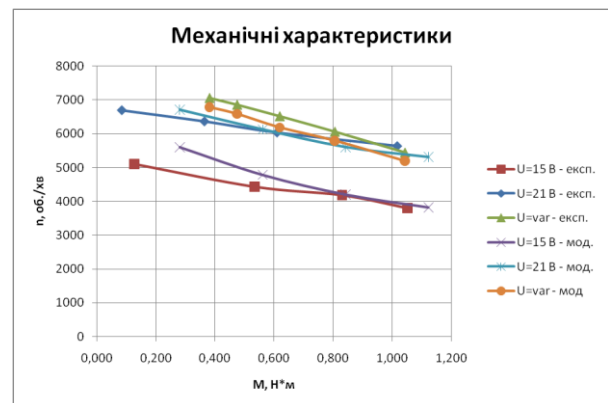


Рис. 4 – Механічні характеристики експериментальні та змодельовані

**Робочі характеристики електроскутера для нормального режиму роботи.** Нормальним режимом роботи визначаємо режим роботи електроскутера за нормальних безвітряних погодних умов при перевезенні людини масою 70 кг асфальтованою дорогою без схилу.

Робочими характеристиками електроскутера визначаємо залежність таких параметрів як час розгону, ККД, питома дистанція, ударний струм акумулятора та максимальний усталений струм акумулятора від швидкості руху.

*Час розгону* – час, за який електроскутер розганяється від нуля до заданої швидкості.

*ККД* – коефіцієнт корисної дії; корисною вважаємо роботу з подолання опору руху електроскутера та сили тяжіння при русі схилом.

*Питома дистанція* – відстань, яку може проїхати електроскутер за одиничну запасену в акумуляторі енергію.

*Ударний струм акумулятора* – максимальна величина струму, що миттєво протікає через акумулятор при перехідних процесах.

*Максимальний усталений струм акумулятора* – максимальна величина струму, що миттєво протікає через акумулятор під час усталеного режиму роботи.

Нормальний режим роботи електроскутера був промодельований та розрахований в програмному пакеті Matlab Simulink в моделі рис. 2 для різних швидкостей руху. Результати зображені на рис. 5, 6.

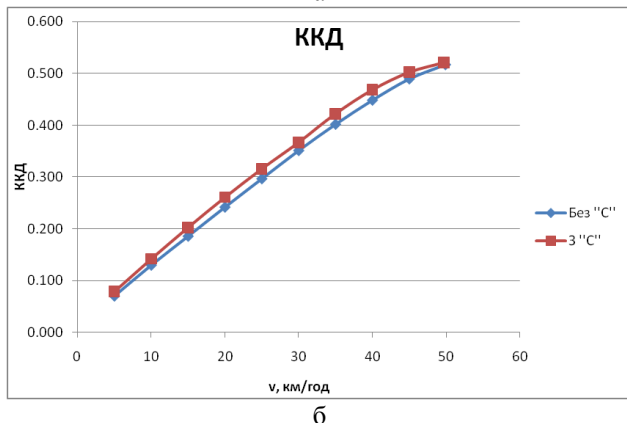
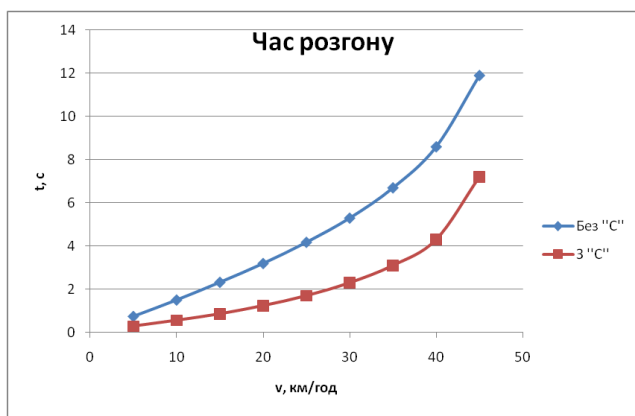


Рис. 5 – Робочі характеристики електроскутера для нормального режиму роботи із та без суперконденсатора: а – залежність часу розгону від швидкості; б – ККД від швидкості.

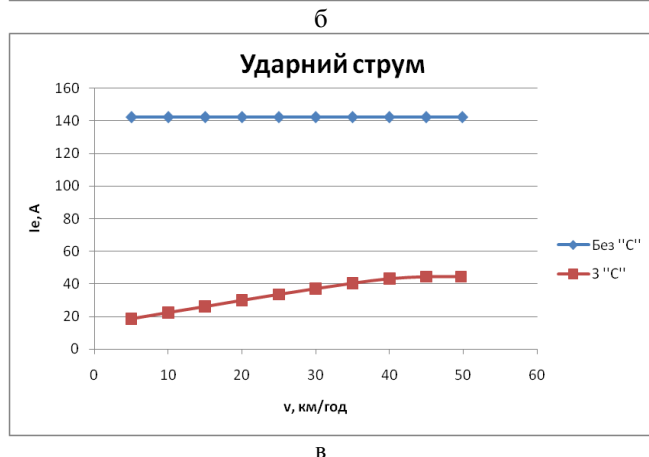
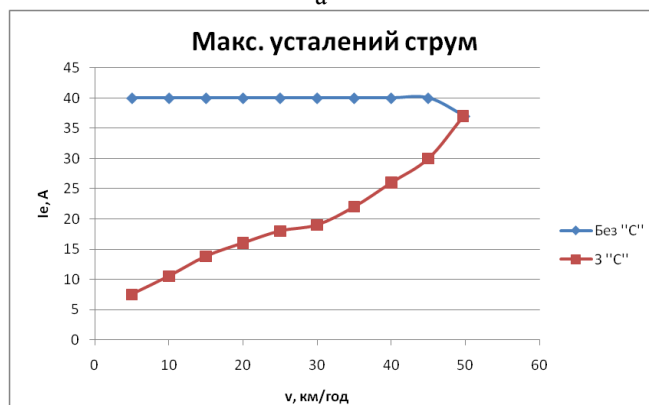
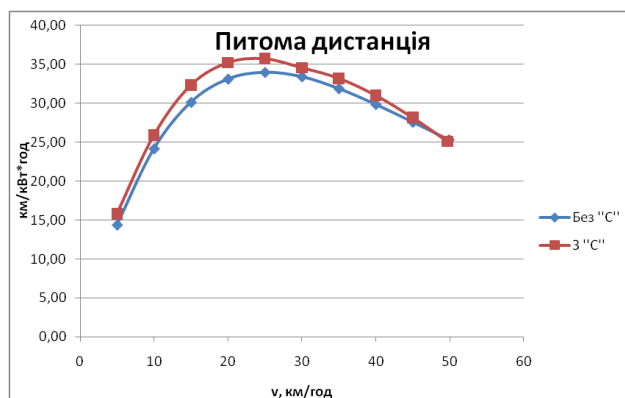


Рис. 6 – Робочі характеристики електроскутера для нормального режиму роботи із та без суперконденсатора: а – залежність питомої дистанції; б – максимального усталеного струму; в – ударного струму від швидкості

**Висновок:** використовуючи в електроприводі суперконденсатор паралельно із акумулятором можна досягнути ряду переваг:

- зменшення потужності, що споживається, на величину до 9,2 %;
- збільшення ККД електропривода на величину від 4 % до 12,5 % (в залежності від швидкості електроскутера);
- зменшення часу на розгін до усталеної швидкості на величину від 39 % до 63 %;
- зменшення максимального струму, що проходить через акумулятор в усталеному режимі роботи на величину до 81 %;
- зменшення максимального ударного струму через акумулятор при розгоні електроскутера на величину від 68 % до 87 %;



– збільшення шляху, який можна проїхати на одному заряді на величину до 10%.

**Висновки.** Створена комп'ютерна модель продемонструвала свою адекватність на проведених дослідках неробочого ходу та зі зняття механічних та робочих характеристик. Відхилення результатів комп'ютерного моделювання від експериментальних даних не перевищувало 10% в точках з найбільшою розбіжністю.

Дослідження, проведені на комп'ютерній моделі показали, що використання у джерелі живлення електропривода транспортних засобів паралельного з'єднання акумулятора та суперконденсатора надає значні переваги порівняно з роботою лише від акумулятора: покращення динамічних та енергетичних характеристик привода, обмеження та вирівнювання струмів через акумулятор, що збільшує термін служби останнього, збільшення відстані, яку може подолати транспортний засіб на одному заряді. Покращення цих показників буде відчутне навіть для такого малопотужного транспортного засобу як електроскутер.

#### Список літератури:

1. Yang, Z. Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction and Switched reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications [Text] / Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown, M. Krishnamurthy // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2015. – № 1 (3). – P. 245–254. doi:[10.1109/tte.2015.2470092](https://doi.org/10.1109/tte.2015.2470092)
2. Шидловский, А. К. Применение суперконденсаторов в автономном аккумулятором электротранспорте [Текст] / А. К. Шидловский, В. Б. Павлов, А. В. Попов // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 4. – С. 43–47.
3. Pitorac, C. Using Li-Ion accumulators as traction batteries in the automotive industry. Cost reduction using ultra-capacitors [Text] / C. Pitorac // International Conference on Development and Application Systems. – 2016. – P. 212–218. doi:[10.1109/daas.2016.7492575](https://doi.org/10.1109/daas.2016.7492575)
4. Singh, A. Lead-acid battery for HEV using fuzzy controller and ultracapacitor [Text] / A. Singh, P. B. Karandikar // Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE). – 2016. – P. 1–5. doi:[10.1109/pestse.2016.7516443](https://doi.org/10.1109/pestse.2016.7516443)
5. Liu, S. A MPC based energy management strategy for battery-supercapacitor combined energy storage system of HEV [Text] / S. Liu, J. Peng, L. Li, X. Gong, H. Lu. // 35th Chinese Control Conference. – 2016. – p. 8727–8731. doi:[10.1109/chicc.2016.7554751](https://doi.org/10.1109/chicc.2016.7554751)
6. Butterbach, S. Design of a supercapacitor-battery storage system for a waste collection vehicle [Text] / S. Butterbach, B. Vulturescu, G. Coquery, Ch. Forgez, G. Friedrich // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. – 2010. – P. 1–6. doi:[10.1109/vppc.2010.5729238](https://doi.org/10.1109/vppc.2010.5729238)
7. Herrera, V. I. Optimal Operation Mode Control and Sizing of a Battery-Supercapacitor Based Tramway [Text] / V. I. Herrera, H. Gaztanga, A. Milo, T. Nieva, I. Etxeberria-Otadui // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. – 2015. – P. 1–6. doi:[10.1109/vppc.2015.7352988](https://doi.org/10.1109/vppc.2015.7352988)
8. Reuc'kyj, M. O., Trinchuk, D. Ya., Dешко, A. O. (2014). Zastosuvannya superkondensatoriv u pry'vodi elektromobilya na bazi dvy'guna postijnogo strumu z nezalezny'm zbudzhennyam. Suchasni problemy' elektroenergetychny' ta avtomaty'ky'. Kyiv.
9. Popov, S. V., Gurtovoj, M. Ju. (2015). Razrabotka matematicheskoj modeli jelektromobilija s kombinirovannymi rezhimami elektropitanija. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/8, 4–8. doi:[10.15587/1729-4061.2015.50612](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.50612)
10. Slipchenko, N. I., Gurtovoj, M. Ju. (2014). Razrabotka stenda dlja issledovanija tjavovoj sistemy jeletromobilija s superkondensatorami. Easter-European Journal of Enterprise Technologies, 1/8, 36–40. doi:[10.15587/1729-4061.2014.19898](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.19898)

Поступила (received) 15.01.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження енергоефективності нелінійного електричного кола з автономним живленням на прикладі привода електроскутера/ М. Я. Островерхов, М. О. Реуцький, Д. Я. Трінчук// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.109–115. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Исследование энергоэффективности нелинейной электрической цепи с автономным питанием на примере привода электроскутера/ Н. Я. Островерхов, Н. А. Реуцкий, Д. Я. Тринчук// Вісник НТУ «ХПІ».

Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.109–115. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Research of the efficiency of a nonlinear electric circuit with independent power supply on the example of the electric scooter drive / M. Ostroverkhov, M. Reutskyi, D. Trinchuk**//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176) .– P. 109–115. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Островерхов Микола Якович** – доктор технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри "Теоретична електротехніка"; адреса: пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: [n.ostroverkhov@hotmail.com](mailto:n.ostroverkhov@hotmail.com)

**Островерхов Николай Яковлевич** – доктор технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», заведующий кафедрой "Теоретическая электротехника"; адрес: пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: [n.ostroverkhov@hotmail.com](mailto:n.ostroverkhov@hotmail.com)

**Ostroverkhov Mykola** – Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Head of Department "Electrical Engineering"; address: 37, Peremohy ave., Kyiv, 03056, Ukraine; e-mail: [n.ostroverkhov@hotmail.com](mailto:n.ostroverkhov@hotmail.com)

**Реуцький Микола Олександрович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри "Електромеханіка"; адреса: пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: [m.reutskyi@kpi.ua](mailto:m.reutskyi@kpi.ua)

**Реуцкий Николай Александрович** – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», доцент кафедры "Электромеханика"; адрес: пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: [m.reutskyi@kpi.ua](mailto:m.reutskyi@kpi.ua)

**Reutskyi Mykola** – Candidate of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Associate Professor of "Electromechanics"; address: 37, Peremohy ave., Kyiv, 03056, Ukraine; e-mail: [m.reutskyi@kpi.ua](mailto:m.reutskyi@kpi.ua)

**Трінчук Данило Ярославович** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», аспірант кафедри "Теоретична електротехніка"; адреса: пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: [dartdanil@mail.ru](mailto:dartdanil@mail.ru)

**Тринчук Данило Ярославович** – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», аспирант кафедры "Теоретическая электротехника"; адрес: пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: [dartdanil@mail.ru](mailto:dartdanil@mail.ru)

**Trinchuk Danylo** – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, graduate student "Electrical Engineering"; address: 37, Peremohy ave., Kyiv, 03056, Ukraine; e-mail: [dartdanil@mail.ru](mailto:dartdanil@mail.ru)

**ОХОРОНА ПРАЦІ, БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ  
ТА ЕКОЛОГІЯ**

УДК 543.27; 533.2

М. Т. КЛІМІШИНА

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ І ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ ВИКИДІВ ПРИ ПІРОЛІЗНІЙ ПЕРЕРОБЦІ ШИН**

Проаналізовано особливості впливу утилізації і переробки шин на атмосферне повітря. Розглянуто технологічні процеси утилізації відпрацьованих шин, такі як, отримання гумової крихти, спалювання, піролізна технологія. Також, перемелювання при температурі навколишнього середовища та при наднизьких температур. На основі розрахункових методик визначено обсяги, концентрацію і номенклатуру викидів. Визначено засоби інструментального контролю викидів піролізного виробництва. Створено математичну модель розповсюдження зони викидів. Побудували розсіювання на основі проведених розрахунків викидів забруднюючих речовин та покладено на місцевість.

**Ключові слова:** утилізація, викиди, переробка шин, методи переробки шин, забруднення, полімерні відходи, автомобільні покришки, спалювання, вторичні матеріальні ресурси.

Проанализированы особенности влияния утилизации и переработки шин на атмосферный воздух. Рассмотрены технологические процессы утилизации отработанных шин, такие как, получение резиновой крошки, сжигание, пиролизная технология. Также, перемалывания при температуре окружающей среды и при сверхнизких температур. На основе расчетных методик определены объемы, концентрацию и номенклатуру выбросов. Определены средства инструментального контроля выбросов пиролизного производства. Создана математическая модель распространения зоны выбросов. Построили рассеяние на основе проведенных расчетов выбросов загрязняющих веществ и положено на местность.

**Ключевые слова:** утилизация, выбросы, переработка шин, методы переработки шин, загрязнения, полимерные отходы, автомобильные покришки, сжигание, вторично материальные ресурсы.

Analyzed the influence recovery and recycling of tires in the air. Considered the technological processes of recycling waste tires, such as getting the crumb rubber by crushing or granulating and its subsequent use in industry, burning to obtain heat and electricity, pyrolysis technology of tire recycling. Also, milling at ambient temperature and milling at very low temperatures (vacuum method). On the basis of calculation methods we specified volume, concentration and emission range. Identified tools control pyrolysis production emissions. Created the mathematical model of the emission distribution with taking into account wind speed according to the parameters of organized and unorganized sources of emission. Have built the scattering based on the calculations of emissions and put on the area. Given technological schemes with specific gross pollutant emissions during combustion of the year 850-1000 tons of tires per year. Showing data pollutant emissions by burning coal and the burning of tires in cement kilns. Made determine concentrations of dioxin emissions of nitrogen, carbon monoxide, sulfur dioxide, suspended solid particles from each source based on direct measurements of the enterprise pyrolysis tire recycling and gross emissions in the calculation methods.

**Keywords:** recycling, emissions, tire recycling, tire recycling methods, pollution, plastic waste, tires, burning, secondary material resources.

**Вступ.** Загальносвітові запаси відпрацьованих (зношених) автомобільних шин оцінюються в 25 млн т при щорічному прирості не менше 7 млн т. На європейські країни припадає близько 2 млн т (3 млрд шт. відпрацьованих автомобільних шин). рівень переробки відпрацьованих шин в різних країнах коливається в межах від 10 % – 15 % до майже 100 % в Німеччині, Японії і скандинавських країнах; середній рівень переробки відпрацьованих шин в державах – членах ЄС становить 82 % [1]. В Україні рівень переробки складає 10 % автомобільних шин. За різними оцінками, кількість неутілізованих шин в Україні перевищує 10 млн тонн. Питання переробки шин і відповідно екологічних проблем які виникають в відповідних технологічних процесах потребують відповідних наукових досліджень, теоретичних розрахунків, експериментальних досліджень. [2]

**Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.** За даними наукових розробок, викинуті на смітник автошини в природних умовах розкладаються не менше 100 років. Під дією атмосферних опадів і ґрунтових вод з покришок вимиваються токсичні органічні сполуки: дифеніламін, дибутилфталат, фенантрен. Крім того, такі відходи легко займаються і при горінні виділяють в атмосферу токсичні речовини [2]

У зв'язку з заборонаю в державах – членах ЄС складування відпрацьованих шин та відсутністю дос-

татнього місця для їх зберігання виникло питання про способи їх утилізації і переробки. У Франції 18 % відпрацьованих шин спалюють, 21 % подрібнюють в крихту, 11 % використовують в парках, портах і т.п., для 46 % знаходять можливість відновлення, інші розміщують безконтрольно. В Японії спалюють близько 65% – 70 % відпрацьованих шин, в Німеччині – 45 % – 50 %, у Великобританії – 30 %. [3] У США 115 млн відпрацьованих шин використовують, як паливо. Згідно з американськими даними, теплота згоряння однієї типової пасажирської автомашини еквівалентна теплоті згоряння 26,5 л нафти. Застосовувана в якості палива дроблена автомобільна гума дає на 10 % – 16 % більше тепла, ніж кам'яне вугілля. Також відпрацьовані шини використовують при будівництві автомобільних доріг. Зношені автошини містять в собі цінну сировину: каучук, метал і текстильний корд [4]. Ці матеріали в процесі експлуатації в основному не змінюють первинні властивості. На європейські країни припадає 3 млрд. шт. зношених автошин (близько 2 млн. т.). З цієї кількості в світі тільки 23 % покришок знаходять застосування (експорт в інші країни, спалювання з метою отримання енергії, механічне подрібнення для покриття доріг, спортмайданчиків та ін.), а решту 77 % зношених автошин не використовується через відсутність рентабельного способу утилізації. [5]

© М. Т. Клімішина.2016

В роботах [2–5] значна увага приділена технологічній, теплотехнічній, економічній складовій переробки шин, а зона їх впливу на довкілля, обсяги, склад і концентрація компонентів викидів для конкретного технологічного циклу переробки шин дослідженні не в повній мірі, також відсутні дослідження по вибору засобів вимірювання: газоаналізаторів при контролі викидів.

**Ціль та задачі дослідження.** Метою досліджень є визначення обсягів викидів і номенклатури, забруднюючих речовин при типовому технологічному процесі піролізного перероблення шин, створення моделі розповсюдження викидів, вибір засобів інструментального контролю.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Дослідити технологічні процеси переробки шин.
2. На основі розрахункових методик визначити обсяги, концентрацію і номенклатуру викидів.
3. Створити математичну модель розповсюдження викидів.
4. Визначити засоби інструментального контролю викидів.

**Технології утилізації відпрацьованих шин.** Серед найбільш доступних технологій утилізації відпрацьованих автомобільних шин та покришок, інших відходів виробництва гумовотехнічних виробів застосовують:

- отримання гумової крихти шляхом подрібнення або гранулювання і її подальше використання в промисловості;
- спалювання з отриманням теплової та електричної енергії;
- піролізна технологія перероблення шин.

**Подрібнення відходів шин і інших умовотехнічних виробів** пов'язано з великими енерговитратами – до 50 – 700 кВт і більше на 1 т гуми. Значне енергоспоживання здорожує вартість кінцевої продукції і змушує сферу застосування даної технології. Існує два основні методи гранулювання покришок, які завершили життєвий цикл:

- перемелювання при температурі навколишнього середовища;
- перемелювання при наднизьких температурах (вакуумний метод).

Під час перемелювання при температурі навколишнього середовища покришки, подрібнюють і потім завантажують в дробарку. Після дроблення отриманий продукт поділяють на гумовий гранулят, сталь і текстиль. Отриману при перемелюванні гуму можна безпосередньо застосовувати в сумішах, що використовуються при виробництві нових і відновлених покришок.

Під час перемелювання при наднизьких температурах (вакуумний метод) покришки, які завершили життєвий цикл, і обрізки покришок охолоджують нижче точки замерзання, після чого подрібнюють в молотковій дробарці. Цей процес дозволяє швидко розділити волокна, метали і гуму.

Загальні витрати експлуатації обладнання для подрібнення і гранулювання покришок також включають в себе витрати на робочу силу і енергетичні витрати, обчислені виходячи з місцевих цін. Співвідно-

шення між доходом і витратами обчислюють виходячи з діючих цін на мелену гуму чи іншу продукцію об'єкта.

Спалювання шин можна використовувати як основне або додаткове паливо при виробництві пара, електроенергії, цементу, вапна, сталі і при спалюванні сміття. Спалювання з виробництвом пара використовують переважно в шинній і шиновідновлювальній промисловості. Вироблений пар можна використовувати в різних виробничих процесах. Наприклад, в гумотехнічній промисловості пар використовують для вулканізації. Деякі теплові електростанції в цілях зниження вартості палива спроектовані з урахуванням можливості спалювання покришок, які завершили життєвий цикл. При спалюванні покришки розміщують на колосникових решітках, які забезпечують віддачу повітря зверху і знизу покришок для спалювання, при збереженні низької температури решітки. Решітка також дозволяє фільтрувати шлак і попел на конвеєр, який скидає їх в воронкоподібні бункери за межами підприємства. Магнітна система розпізнавання наявності металу відсортовує спалені покришки, що містять металеві елементи. Кожна спалювальна піч обладнана власним бойлером, який виконує пар для обертання парової турбіни (генератора).

Для порівняння, викиди забруднюючих речовин при спалюванні вугілля: сірка 2.0 %, зола 11.3 %, хлор 0.14 %, цинк 27.2 ч / млн ч повітря, хром 20.5 ч / млн ч повітря, нікель 16.9 ч / млн ч повітря, свинець 8.3 ч / млн ч повітря, кадмій 0.91 год / млн ч повітря. Викиди забруднюючих речовин при спалюванні шин в цементних печах: сірка 1.3 – 2.2 %, зола 12.5 – 18.6 %, хлор 0.20 %, цинк 9300 – 20500 ч / млн ч повітря, хром 97 ч / млн ч повітря, нікель 77 ч / млн ч повітря, свинець 60 – 760 ч / млн ч повітря, кадмій 5–10.

**Піролізна технологія перероблення шин.** Піроліз – хімічне розкладання органічних сполук за допомогою нагрівання при повній або частковій відсутності кисню повітря.

Попередньо підготовлені шини завантажуються через завантажувальний люк в котли-утилізатори. Котли утилізатори нагріваються до 500<sup>0</sup> С за рахунок спалювання палива: пелети, дрова інші види палива., Під дією температури шини піддаються піролізу з утворенням парогазу, технічного вуглецю, відделенням металокорду. При повітряному охолодженні парогаз конденсується в рідину фракцію вуглеводневих продуктів піроліза. Несконденсований газ надходить у газгольдер низького тиску, і далі, через блок фільтрів, подається трубопроводами газопостачання модуля до горілок котлів-утилізаторів. Злив рідкої фракції відбувається в ємності збору рідкої фракції. Основним показником закінчення процесу утилізації відходів є – припинення виділення парогазової суміші і зниження тиску газу в системі. Після закінчення процесу утилізації в котлі-утилізаторі залишається твердий залишок, який вивантажується через вивантажувальний люк і подається на дільницю його зберігання.

Продукти, які отримуються в процесі переробки при температурі проходження процесу 400–500<sup>0</sup>С: рідка фракція, напівкокс (вуглець технічний), газ, металобрухт.

Рідку фракцію можна використовувати як паливо або змішувати в рівних пропорціях з дизельним паливом. Після очищення технічний вуглець можна використовувати як наповнювач або активоване вугілля. Металобрухт використовується в металургійній промисловості.

Топки котлів завантажуються твердим паливом (дровами). Конструктивне виконання котла забезпечує рівномірне розподілення тепла по всьому об'єму корпусу. Зміна температурного режиму, в залежності від режиму термічного розпаду вихідної сировини, здійснюється шляхом регулювання подачі в топку твердого палива.

**Аналіз типового піролізного процесу перероблення шин.** Для аналізу піролізного технологічного перероблення шин було взято типове виробництво, яке складається з чотирьох котлів утилізаторів типу БКР-003-2, які працюють на дровах та газу, що отримується під час піролізу, і допоміжних виробничих ділянок. Відповідно до ДСП-173-96 «Державних санітарних правил планування та забудови населених пунктів», затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України від 19.06.96р. №173, підприємство відноситься до 3 класу, «Підприємства по регенерації гум та каучуку» з 3 санітарно захисною зоною 300 м. Найближча житлова забудова розміщена в північно-західному напрямку на відстані 550 м від джерела викиду №1. Перероблення гумо-технічних відходів (автомобільних шин) базується на методі піролізу – нагріву автомобільних шин без доступу кисню в котлах утилізаторах БКР-003-2. [5].

В якості сировини виступають відходи гумово-технічних виробів. В процесі такої обробки отримується продукція:

- рідка фракція (паливо пічне альтернативне);
- напівокс (вуглець технічний): використовується в якості твердого палива, наповнювачів, модифікаторів, пігментів;
- газ: використовується на технологічні потреби (підтримання технологічного процесу);
- металобрухт: використовується для послідуочної переробки на метал.

Відповідно до особливостей виробничих процесів, в результаті переробки гумових виробів виробляються додаткові сировини. За технологічним регламентом продуктивність модуля БКР-003-2 по сухій сировині – 2 тонну/добу. Режим роботи двозмінний, тривалість зміни – 8 годин.

Продуктивність установки по виходу продукції:

- Рідка фракція – 500 л/добу ( 500 м<sup>3</sup>/рік);
- Високо вуглецевий залишок – 1 т/добу (1000 т/рік);
- Метал – 0,2 т/добу (200 т/рік);
- Газ – 200 м<sup>3</sup>/добу (200000 м<sup>3</sup>/рік).

Виробничий процес включає в себе ділянки: термічної обробки палива, зберігання рідкої фракції, зберігання твердого залишку, кожна з цих дільниць є джерелом викидів в атмосферу. Обсяги і номенклатура викидів по технологічним дільницям наступні:

*Дільниця термічної обробки сировини*

За допомогою термічної обробки виконується переробка сировини. Дільниця обладнана чотирма котлами-утилізаторами типу БКР-003-2. Топка котлів

завантажуються деревиною, після початку процесу піролізу утворюється газ який подається до горілок котлів-утилізаторів і котел

При цьому при спалюванні деревини та газу утворюються забруднюючі речовини: речовини у вигляді суспендованих твердих частинок недиференційованих за складом, оксиди азоту (оксид та діоксид азоту) в перерахунку на діоксид азоту, оксид вуглецю, метан, вуглецю діоксид, азоту (1) оксид [N<sub>2</sub>O], ртуть та її сполуки, (у перерахунку на ртуть), неметанові леткі органічні сполуки валовий викид яких розраховується згідно за формулою [6]: за формулою:

$$E_j = \sum_i E_{ji} = 10^{-6} \sum_i k_{ji} B_i (Q_i^r), \quad (1)$$

де  $E_{ji}$  – валовий викид  $j$ -ї забруднювальної речовини під час спалювання  $i$ -го палива за проміжок часу  $P$ , т;  $k_{ji}$  – показник емісії  $j$ -ї забруднювальної речовини для  $i$ -го палива, г/ГДж;  $B_i$  – витрата  $i$ -го палива за проміжок часу  $P$ , т;  $(Q_i^r)_i$  – нижча робоча теплота згоряння  $i$ -го палива, МДж/кг.

Рідка фракція, що утворюється від 4-х котлів-утилізаторів спочатку подається до двох буферних ємностей кожний об'ємом 3,7 м<sup>3</sup>. Під час заповнення резервуарів викидаються забруднююча речовина: вуглеводні насичені С12–С19 (розчинник РПК-26611 і ін.) у перерахунку на сумарний органічний вуглець. Величини викидів забруднюючих речовин від однієї ємності під час наливання нафтопродуктів розраховуються за формулою, відповідно методиці [7]:

$$P_{\text{цн}} = 2,52 \cdot V_{\text{ж}}^{\text{цн}} \cdot P_{S(38)} \cdot M_{\text{п}} \cdot (K_{5X} + K_{5T}) \times \\ \times K_8 \cdot (1 - \eta) \cdot 10^{-9}, \text{ кг / год} \quad (2)$$

де  $V_{\text{ж}}^{\text{цн}}$  – річний об'єм рідини, яка наливається, м<sup>3</sup>/рік;  $P_{S(38)}$  – тиск насичених парів рідини при температурі 38°C;  $M_{\text{п}}$  – молекулярна маса парів рідини;  $\eta$  – коефіцієнт ефективності газозловлюючих пристроїв резервуару;  $K_{5T}, K_{5X}$  – коефіцієнти, які залежать від  $P_{S(38)}$  та температури газового простору відповідно у теплу та холодну пори року;  $K_8$  – коефіцієнт, який залежить від  $P_{S(38)}$  та кліматичної зони.

*Дільниця зберігання рідкої фракції*

Після наповнення буферних ємностей, рідку фракцію перекачують на зберігання до трьох резервуарів ємністю 25 м<sup>3</sup>, 10 м<sup>3</sup> та 10 м<sup>3</sup>. Під час заповнення резервуарів викидаються забруднююча речовина: вуглеводні насичені С12–С19 (розчинник РПК-26611 і ін.) у перерахунку на сумарний органічний вуглець. Розрахунок викидів під час наливання нафтопродуктів розраховуються за формулою (1), викиди при зберіганні розраховуються за формулою (2)

$$P_p = 2,52 \cdot V_{\text{ж}}^p \cdot P_{S(38)} \cdot M_{\text{п}} \cdot (K_{5X} + K_{5T}) \times \\ \times (K_6 \cdot K_7 \cdot (1 - \eta) \cdot 10^{-9}, \text{ кг / год} \quad (3)$$

де  $V_{\text{ж}}^p$  – об'єм рідини, яка наливається у резервуари на протязі року, м<sup>3</sup>/рік;  $P_{S(38)}$  – тиск насичених парів рі-



дини при температурі 38°C;  $M_{II}$  – молекулярна маса парів рідини;  $\eta$  – коефіцієнт ефективності газозловлюючих пристроїв резервуару;  $K_{ST}, K_{SX}$  – коефіцієнти, які залежать від  $P_{S(38)}$  та температури газового простору відповідно у теплу та холодну пори року;  $K_6$  – коефіцієнт, який залежить від  $P_{S(38)}$  та річного оберту резервуарів;  $K_7$  – коефіцієнт, який залежить від технічного оснащення та режиму експлуатації.

#### Дільниця зберігання твердого залишку

На дільниці виконується відділення напівкоксу та металобрухту з подальшим зберіганням. Забруднююча речовина: речовини у вигляді суспендованих твердих частинок недиференційованих за складом.

Визначення викидів забруднюючих речовин при проведенні вантажно-розвантажувальних робіт, а також при статичному зберіганні сипких вантажів виконується згідно методики за формулами [8]:

$$A = (K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot G \cdot B' \cdot 10^6) / 3600; (\text{г/с}) \quad (4)$$

$$B = K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot q_1 \cdot F; (\text{г/с}), \quad (5)$$

де  $A$  – Розрахунок викидів при переробці (перевалка, змішування) матеріалу, г/с;  $B$  – викиди при статичному зберіганні матеріалу, г/с;  $K_1$  – масова доля пил в

матеріалі;  $K_2$  – доля пилу (від усієї маси), що переходить в аерозоль;  $K_3$  – коефіцієнт, що враховує місцеві метеорологічні умови;  $K_4$  – коефіцієнт, що враховує місцеві умови, ступінь захисту вузла від зовнішнього впливу, умови пилоутворення;  $K_5$  – коефіцієнт, що враховує вологість матеріалу;  $K_6$  – коефіцієнт, що враховує профіль матеріалу що складається і визначається як відношення  $\frac{F_{\text{факт}}}{F}$ , значення  $K_6$  коливається в межах 1,3-1,6 в залежності від крупності матеріалу і ступеня заповнення.  $K_7$  – коефіцієнт, що враховує крупність матеріалу;  $F_{\text{факт}}$  – фактична поверхня матеріалу з врахуванням рельєфу його перерізу (враховується лише площадка, на якій виконуються загрузочно-розгрузочні роботи);  $F$  – поверхня запилення в плані;  $q_1$  – унесення пилу з одного квадратного метра фактичної поверхні;  $G$  – сумарна кількість матеріалу, що перероблюється за годину;  $B'$  – коефіцієнт що враховує висоту пересипання.

На рис. 1 наведені технологічні схеми вищерозглянутих ділянок з конкретним даними обсягів валових викидів забруднюючих речовин при спалювання на рік 850-1000т покришок на рік.

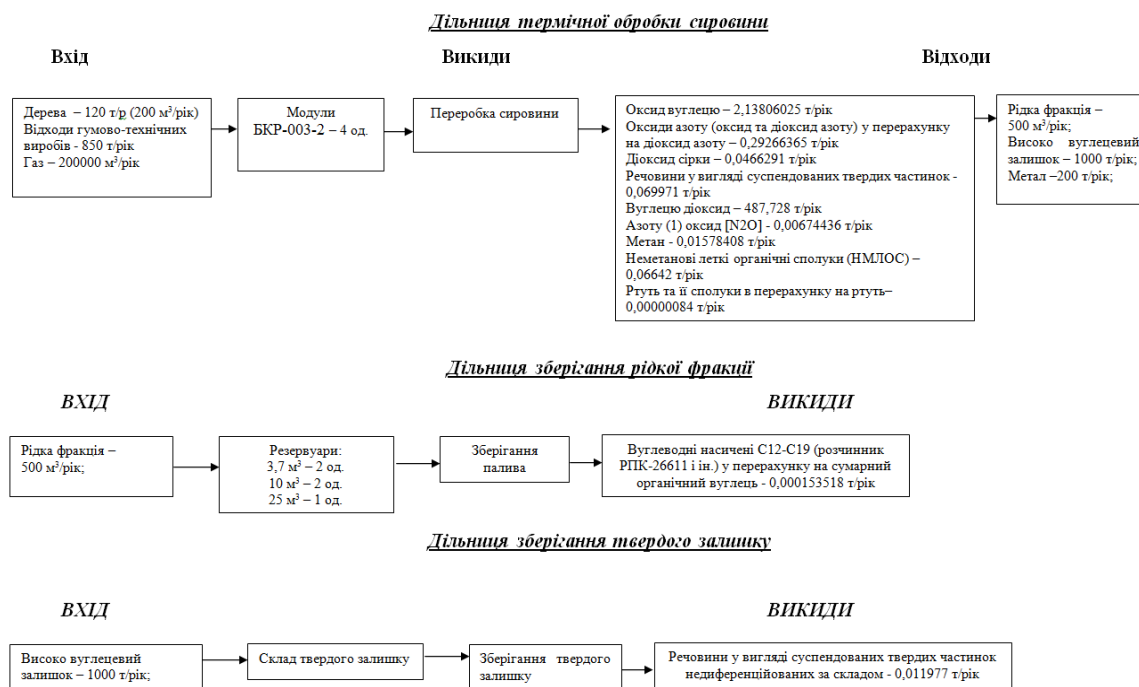


Рис. 1 – Технологічні схеми ділянок піролізної переробки шин з обсягами викидів забруднюючих речовин

**Математична модель розповсюдження зони викидів піролізної переробки шин.** Отримані дані (рис. 1) зафіксували викиди оксиду вуглецю, оксидів азоту, твердих суспендованих частинок, але не під час піролізу шин, а при нагріванні котла-утилізатора, тобто сам процес піролізу, замкнений і його викиди на довкілля мінімальні, а основним джерелом викиду є димова труба котла – утилізатора в процесі спалю-

вання деревин і рідкого палива, яке утворилось в результаті піролізу в котлі. Для визначення зони забруднення довкілля розроблена математична модель розповсюдження викидів. виробництва. Розвиток методів прогнозу ґрунтується на результатах теоретичного і експериментального вивчення закономірностей поширення домішок, що викидаються джерелами забруднення атмосфери.

Серед існуючих методів опису закономірностей розповсюдження домішок залежно від математичного апарату можна виділити:

- а) емпірично – статистичні методи;
- б) статистичні методи;
- в) гаусівські моделі;
- г) моделі турбулентної дифузії.

Емпірично – статистичні моделі є найпростішими моделями та об'єднують практично всі методи первинної обробки експериментальної інформації, що формулюється у вигляді алгебраїчних співвідношень. Основною метою побудови цих моделей є:

- упорядкування або агрегація інформації щодо показників забруднення повітря;
- пошук, кількісна оцінка та змістовна інтерпретація причинно-наслідкових зв'язків між рівнем забруднення атмосфери та кількістю викидів від джерел забруднення;
- ідентифікацію параметрів розрахункових рівнянь, їх зміну в часі і просторі.

Модель розподілу побудована на площинні **600м×600м з кроком 50м**, центром координат обрано точки по  $x$  0м по  $y$  0м. Для кожного вузла координатної площини обрано напрям вітру відповідно до джерел, які впливають на дану точку координат, середня швидкість вітру для даного регіону становить **7 – 8 м/с**.

Для побудови моделі використано наступні дані:

- організованих джерел викиду – висота, об'ємна витрата та швидкість вітру в залежності від висоти (для високих джерел від 4м – найбільша швидкість вітру, для низьких джерел менше 4м – найнижча швидкість вітру, характерна для даної місцевості);
- неорганізованих джерел викиду – розрахункові значення масової об'ємної витрати та швидкість вітру для низьких джерел викиду.

На рис. 2 – наведені зони розповсюдження викидів діоксиду азоту, оксиду вуглецю, діоксиду сірки, твердих суспендованих частинок, та значення в частках ГДК на санітарно-захисній зоні (300 м). Розподіл концентрацій забруднюючих речовин виконувався за допомогою програми «ЕОЛ+» (версія 5.23).

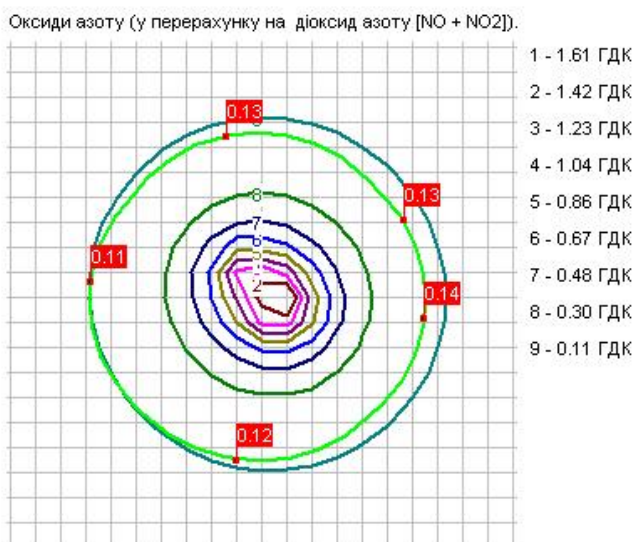


Рис. 2 – Зони розповсюдження викидів діоксиду азоту

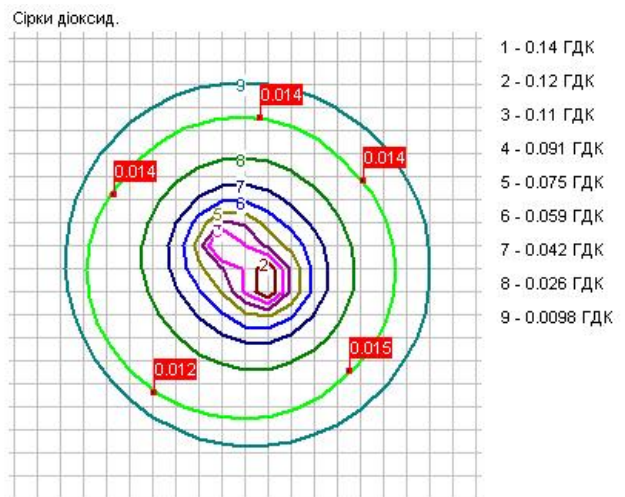


Рис. 3 – Зони розповсюдження викидів діоксиду сірки

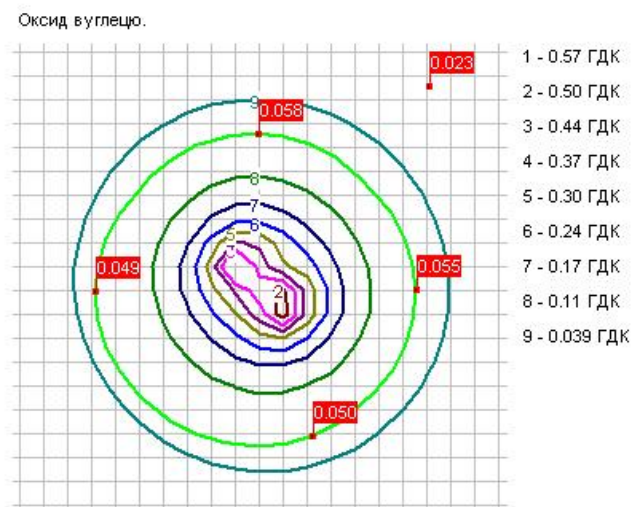


Рис. 4 – Зони розповсюдження викидів оксиду вуглецю

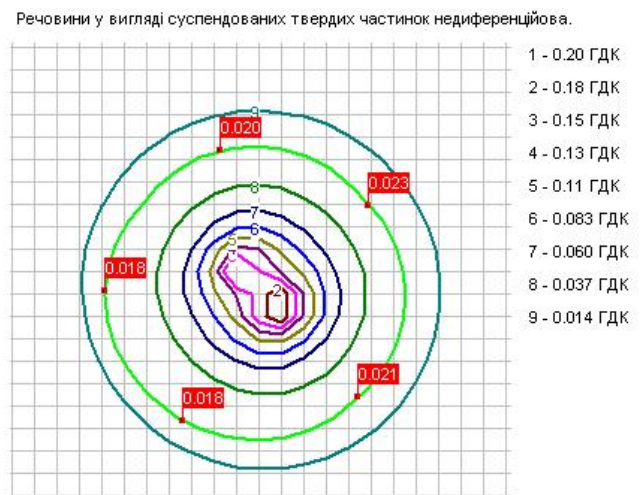


Рис. 5 – Зони розповсюдження викидів твердих суспендованих частинок

Показники часток ГДК відповідають дев'яти зонам розташування, яких залежить від рівня концентрацій забруднюючих речовин у приземному шарі. Встановлено, що максимальна концентрація на межі СЗЗ, для оксиду вуглецю становить – 0,058 ГДК, діок-

сину азоту – 0,14 ГДК, діоксину сірки – 0,014 ГДК, твердих суспендованих частинок – 0,023 ГДК. Відповідно отриманих результатів перевищення значення часток ГДК на межі санітарно-захисної зони відсутні.

**Інструментальні засоби контролю викидів піролізного виробництва.** На даний час в Україні

серійно випускаються прилади для інспекційного контролю викидів дахових котельень по усьому спектру компонентів, що викидаються котлами [9, 10]. В табл. 1 наведені технічні характеристики переносного газоаналізатора типу ОКСИ, як найбільш ефективного і типового переносного приладу для контролю викидів з котлів-утилізаторів.

Таблиця 1 – Технічні характеристики газоаналізатора ОКСИ-5М

Газовий компонент	Діапазон вимірювань	Інтервал діапазону вимірювань	Межа допустимих похибок	
			абсолютна	Відносна
O <sub>2</sub>	0 – 21 %	–	± 0,2 %	–
CO	0 – 5000 млн <sup>-1</sup>	0 – 200 млн <sup>-1</sup>	± 10 млн <sup>-1</sup>	–
		200 – 5000 млн <sup>-1</sup>	–	± 5 %
NO	0 – 2000 млн <sup>-1</sup>	0 – 200 млн <sup>-1</sup>	± 20 млн <sup>-1</sup>	–
		200 – 2000 млн <sup>-1</sup>	–	± 10 %
NO <sub>2</sub>	0 – 300 млн <sup>-1</sup>	–	± 10 млн <sup>-1</sup>	–
SO <sub>2</sub>	0 – 5000 млн <sup>-1</sup>	0 – 200 млн <sup>-1</sup>	± 10 млн <sup>-1</sup>	–
		200 – 5000 млн <sup>-1</sup>	–	± 5 %
Температура газу	0 – 1000°	0 – 100°	± 1°	–
		100 – 1000 °	–	± 0,5 %
Тиск газу P*)	– 1000 – 7000 Па	шкала - 1 Па	–	0,5 % (привед.)

Час виходу газоаналізатора на робочий режим не більше 60 с

Прилад серії ОКСИ призначений для еколого-теплотехнічних вимірювань об'ємної концентрації кисню O<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub> і SO<sub>2</sub> в димових газах і в повітрі, температури димових газів (Т), а також отримання розрахунковим шляхом концентрації діоксиду вуглецю CO<sub>2</sub>, коефіцієнта надлишку повітря і до коефіцієнта корисної дії з попередньою установкою CO<sub>2max</sub> для обраного виду палива, з літерною і цифровою індикацією величини вимірюваних параметрів на рідкокристалічному індикаторі (PKI), з можливістю запам'ятовування до 250 результатів вимірювань. Зв'язок з комп'ютером по RS 232, програмне забезпечення. Газоаналізатори являють собою переносні автоматичні мікропроцесорні прилади безперервної дії і виготовляються для потреб народного господарства. Область застосування: газоаналізатори необхідні для фахівців при технічному обслуговуванні, ремонті і налагодженні паливоспалюючих обладнання.

### Висновки

1. В Україні зареєстровано близько 11млн. автотранспортних засобів відповідно через 5–6 років стане проблема утилізації 50-60млн. шт. шин. В більшості країн шини розглядають, як важливий вторинний ресурс, що має різноманітні сфери застосування: енергетика, дорожнє будівництво, металургія, виробництво палива і хімічних речовин і т.д.

2. Розглянуто технологію та обладнання піролізної технології переробки шин визначено, що час роботи обладнання становить 4000 год/рік, кількість джерел викидів – 20, з них неорганізованих 1, висота джерел викидів коливається від 2 м до 4,2 м, швидкість вітру по сторонам світу має середнє значення у 8 м/с.

3. Проаналізовано методики розрахунку викидів від робіт котлів утилізаторів на дільниці термічної обробки сировини, резервуарів зберігання рідкої фракції, та дільниці зберігання твердого залишку, також під час розрахунку не враховується багато параметрів

таких як щільність забудови, через це похибка становить 10–15 %.

4. Проведено визначення викидів концентрацій діоксиду азоту, оксиду вуглецю, діоксиду сірки, твердих суспендованих частинок, від кожного джерела на основі прямих вимірювань на підприємстві піролізного перероблення шин та валових викидів по розрахунковим методикам. На базі розрахунків побудовано розповсюдження викидів на місцевості.

5. Створено математичну модель розподілу викидів забруднюючих речовин підприємства з піролізного перероблення шин з врахуванням швидкості вітру відповідно до параметрів організованих та неорганізованих джерел викиду. Встановлено, що максимальна концентрація на межі СЗЗ, для оксиду вуглецю становить – 0,058 ГДК, діоксину азоту – 0,14 ГДК, діоксину сірки – 0,014 ГДК, твердих суспендованих частинок – 0,023 ГДК.

### Список літератури:

1. Анализ технологий переработки автошин [Електронний ресурс]. – Справочно-информационная система. – Режим доступу: <http://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=140>
2. В Україні правильно утилізується лише 10 % автомобільних шин [Електронний ресурс]. – EcoTown. – Режим доступу: <http://ecotown.com.ua/news/V-Ukrayini-pravlyno-utylyzuyetsya-lyshe-10-avtomobilnykh-shyn/>
3. Pererobka [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://pererobka.com>
4. Кужель, В. П. Ресурсозбереження за рахунок повторного використання автомобільних шин [Текст]: XLV Науково-технічна конференція факультету машинобудування та транспорту / В. П. Кужель, С. В. Мотолов. Вінницький національний технічний університет, 2016. – 4 с.
5. Переработка автомобильных шин методом низкотемпературного пролиза [Електронний ресурс]. – Первый экологический портал. – Режим доступа: [http://www.rav.com.ua/useful\\_know/nature/sorting/piroliz/](http://www.rav.com.ua/useful_know/nature/sorting/piroliz/)
6. Показники емісії викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Друга редакція [Текст] Донецьк, 2008. – Т. 1–3.
7. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами [Текст] Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. – 162 с.



8. Сборник методик по расчету содержания загрязняющих веществ в выбросах от неорганизованных источников загрязнения атмосферы [Текст] Донецьк: УкрНТЭК, 1994. – 155 с.
9. Приміський, В. П. Стан та перспективи розвитку полум'яно-іонізаційного методу для вимірювання концентрації вуглеводнів [Текст] / В. П. Приміський, А. В. Жужа // Метрологія та прилади. – 2013. – № 2. – С. 45–52.
10. Приміський, В. П. Особливості застосування і контролю відповідності технологічних нормативів викидів в промисловості [Текст] / В. П. Приміський, В. М. Івасенко, Д. Г. Корнієнко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 3, № 1 (69). – С. 8–15. doi:10.15587/1729-4061.2014.24973
1. Analyz tehnologyj pererabotky avtoshyn. Spravochno-nformacyonnaya sistema. Available at: <http://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=140>
2. V Ukraini pravylno utylizuyet'sya lyshе 10% avtomobil'ny'h shy'n. EcoTown. Available at: <http://ecotown.com.ua/news/V-Ukrayini-pravylno-utylizuyetsya-lyshe-10-avtomobilnykh-shyn/>
3. Pererobka. Available at: <http://pererobka.com>
4. Kuzhel', V. P., Motolov, S. V. (2016). Resursozberezhennya za rahunok povtornogo vykory'stannya avtomobylny'h shy'n. XLV Naukovo-tehnichna konferenciya fakul'tetu mashynobuduvannya ta transportu. Vinny'cz'ky'j nacional'ny'j tehnicny'j universytet, 4.
5. Pererabotka avtomobil'nyh shin metodom nizkotemperaturnogo proliza. Pervyj ekologichskij portal. Available at: [http://www.rav.com.ua/useful\\_know/nature/sorting/piroliz/](http://www.rav.com.ua/useful_know/nature/sorting/piroliz/)
6. Pokazny'ky` emisiyi vy'ky'div zabrudnyuyuchy'h rehovyn v atmosferne povitrya. Druga redakciya (2008). Donec'k, 1–3.
7. Sbornik metodik po raschetu vybrosov v atmosferu zagraznjajushhih veshhestv razlichnymi proizvodstvami (1986). Leningrad: Gidrometeoizdat, 162.
8. Sbornik metodik po raschetu soderzhanija zagraznjajushhih veshhestv v vybrosah ot neorganizovannyh istochnikov zagraznenija atmosfery (1994). Donec'k: UkrNTJeK, 155.
9. Pry'mis'ky`j, V. P., Zhuzha, A. V. (2013). Stan ta perspektyvy` rozvy'tku polum'jano-ionizacijnogo metodu dlya vy'miryuvannya koncentraciyi vuglevodniv. Metrologiya ta pry'lady`, 2, 45–52.
10. Pry'mis'ky`j, V. P., Ivashenko, V. M., Korniyenko, D. G. (2014). Osoblyvosti zastosuvannya i kontrolyu vidpovidnosti tehnologichny'h normatyviv vy'ky'div v promy'slovosti. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/1 (69), 8–15. doi:10.15587/1729-4061.2014.24973

**Bibliography (transliterated):**

Поступила (received) 14.01.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Дослідження методів розрахунків і інструментальний контроль викидів при піролізній переробці шин/ М. Т. Клімишина// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.116–122. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Исследование методов расчетов и инструментальный контроль выбросов при пиролизной переработке шин/ М. Т. Климишина// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.116–122. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Researching methods of calculation and instrumental control emissions during tire pyrolysis recycling/ M. Klimishyna// Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P. 116–122. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Клімишина Марія Тарасівна** – ведучий спеціаліст, науково-виробничої компанії ТОВ «АВТОЕКОПРИЛАД», вул. Межигірська, 82А, м. Київ, Україна, 04080; e-mail: [mklimishyna@gmail.com](mailto:mklimishyna@gmail.com).

**Климишина Мария Тарасовна** – ведучий спеціаліст, науково-виробничої компанії ООО «АВТОЕКОПРИБОР», ул. Межигорская, 82А, г. Киев, Украина., 04080; e-mail: [mklimishyna@gmail.com](mailto:mklimishyna@gmail.com).

**Klimishyna Mariia** – the leading specialist in the scientific group LTD "AVTOEKOPRYLAD" street Mezhygorskaya, 82A, Kyiv, Ukraine, 04080; e-mail: [mklimishyna@gmail.com](mailto:mklimishyna@gmail.com).

УДК 517.95

**Ю. Є. КЛИМЮК****ПРОГНОЗУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАГАТОШАРОВИХ ШВИДКИХ ФІЛЬТРІВ З КУСКОВО-ОДНОРІДНИМИ ПОРИСТИМИ ЗАВАНТАЖЕННЯМИ**

Запропоновано просторову математичну модель для прогнозування процесу доочистки води від багатокомпонентних домішок у багатошарових швидких фільтрах з кусково-однорідними пористими завантаженнями при додержанні сталої швидкості фільтрації. Отримано алгоритм числово-асимптотичного наближення розв'язку відповідної нелінійної сингулярно-збуреної крайової задачі. Запропонована модель дозволяє шляхом проведення комп'ютерних експериментів отримати оптимальні варіанти використання фільтрувальних матеріалів та збільшення тривалості роботи фільтрів за рахунок вибору їх форми і висоти шарів.

**Ключові слова:** математична модель, процес доочистки води, багатокомпонентна домішка, багатошаровий швидкий фільтр.

Предложено пространственную математическую модель для прогнозирования процесса доочистки воды от многокомпонентных примесей в многослойных скорых фильтрах с кусочно-однородными пористыми загрузками при соблюдении постоянной скорости фильтрации. Получен алгоритм численно-асимптотического приближения решения соответствующей нелинейной сингулярно-возмущенной краевой задачи. Предложенная модель позволяет путем проведения компьютерных экспериментов получить оптимальные варианты использования фильтрующих материалов и увеличения продолжительности работы фильтров за счет выбора их формы и высоты слоев.

**Ключевые слова:** математическая модель, процесс доочистки воды, многокомпонентная добавка, многослойный быстрый фильтр.

© Ю.Є.Климюк,2016

A spatial mathematical model to predict the process of water purification from multi-components impurities in multi-layers rapid filters with piecewise-homogeneous porous loadings subject to constant rate filtration, which takes into account the reverse impact of component concentrations of multi-component impurities, adsorbed on the grains loading, on the active porosity, is proposed. In the model assumed that the convective component mass of transfer and adsorption prevail over the contribution of the diffusion and desorption. The algorithm for numerically-asymptotic approximation of the solution of the corresponding nonlinear singular-perturbed boundary problem for the spatial domain, which a having the shape of a curvilinear parallelepiped, bounded two equipotential surfaces and four surfaces of the flow, separated by some specified of the equipotential surfaces on several subdomains, is developed. The proposed model allows by conducting computer experiments to obtain optimal use of the filtering materials and the increase in the length work filters due to the choice of their form and height layers.

**Keywords:** mathematical model, process of water purification, multi-component impurity, multilayer rapid filter.

**Вступ.** Будь-яка прісна вода перед її використанням для водопостачання, зрошення земельних угідь та у інших видах господарської діяльності потребує попередньої очистки від багатокомпонентних домішок, компонентами яких можуть бути: гази, мінеральні й органічні речовини, що знаходяться в розчиненому, колоїдному і завислому станах, а також мікроорганізми. Значна частина технологій доочистки води від багатокомпонентних домішок базується на використанні швидких фільтрів із багат шаровими пористими завантаженнями [1–4]. Зростаюча вартість фільтруючих матеріалів вимагає проведення досліджень для їх більш якісного використання.

**Аналіз літературних даних.** До 50-х років ХХ ст. основними фільтруючими зернистими завантаженнями для очищення води були кварцові піски, які важчі за воду і тонули в ній. Ці їхні властивості визначали типи й умови роботи фільтрів. Останнім часом на додачу до традиційно використовуваного кварцового піску з'явилося багато нових матеріалів: керамзит, аглопорит, шлакова пемза, погорілі породи, вулканічні шлаки, базальтові та мармурові піски і таке інше. Різноманітні природні властивості нових фільтруючих завантажень фільтрів впливають на ефективність їхньої роботи, розміри споруд, продуктивність і т. п. У ХХІ ст. йде пошук нових фільтруючих матеріалів. У двошарових фільтрах використовують усілякі зернисті інертні матеріали, компонуючи їхні шари так, щоб верхній складався з більш легких і величезної частки. Вдається підібрати навіть тришарові завантаження (наприклад, керамічна крихта – аглопоритовий пісок – антрацит), які складаються із шарів по 0,5 м і мають сорбційну ємність крашу, ніж двошарові [1].

**Методика досліджень.** Розробкою теоретичних основ очистки рідин від домішок шляхом їх фільтрування через пористі завантаження та подальшим її вдосконаленням займалося чимало вітчизняних і зарубіжних вчених [5–12]. В якості математичної моделі процесу фільтрування води через пористі завантаження більшістю дослідників використовується модель Д. М. Мінца при сталій швидкості фільтрації або деяка її модифікація (вдосконала модель). У [13] запропоновано просторове узагальнення математичної моделі Д. М. Мінца, яка є більш ефективною для проведення теоретичних досліджень, націлених на оптимізацію параметрів процесу фільтрування (часу захисної дії завантаження, розмірів фільтра тощо). У [14] вона вдосконала шляхом введення додаткового рівняння для визначення зміни активної пористості завантаження вздовж висоти фільтру. Математичні моделі у [13, 14] описані просторовими сингулярно-збуреними крайовими задачами для модельних областей – криволінійних паралелепіпедів, обмежених двома екіпотенціальними поверхнями та чотирма поверхнями течії. Загальна методика їх розв'язання поля-

гає у наступному: поетапній фіксації характеристик і складових процесу та середовища; розв'язанні задачі фільтрації з використанням просторових аналогів конформних відображень області комплексного потенціалу на фізичну область (що включає побудову гідродинамічної сітки, поля швидкостей, обчислення величин різних перетоків тощо); переході у рівняннях конвективної дифузії і граничних та початкових умовах від фізичних змінних до координат області комплексного потенціалу, що значно спрощує їх запис і забезпечує можливість проведення автономних досліджень, розпаралелювання обчислень; розв'язанні задач конвективної дифузії з використанням числово-асимптотичних методів.

**Ціль та задачі дослідження.** Сформулювати математичну модель задачу для прогнозування процесу доочистки води від багатокомпонентних домішок у багат шарових швидких фільтрах з кусково-однорідними пористими завантаженнями при додержанні сталої швидкості фільтрації, яка дозволяла б шляхом проведення комп'ютерних експериментів отримати оптимальні варіанти використання фільтрувальних матеріалів та збільшення тривалості роботи фільтрів за рахунок вибору їх форми та висоти шарів. Отримати алгоритм числово-асимптотичного наближення розв'язку відповідної нелінійної сингулярно-збуреної крайової задачі.

**Постановка задачі.** Для області  $G = G_z \times (0, \infty)$  ( $z = (x, y, z)$ ),  $G_z = ABCDA_*B_*C_*D_*$  – однозв'язний криволінійний паралелепіпед, обмежений гладкими, ортогональними між собою в кутових точках та по ребрах, двома екіпотенціальними поверхнями  $ABB_*A_* = \{z: f_1(x, y, z) = 0\}$ ,  $CDD_*C_* = \{z: f_2(x, y, z) = 0\}$  і чотирма поверхнями течії  $ADD_*A_* = \{z: f_3(x, y, z) = 0\}$ ,  $BCC_*B_* = \{z: f_4(x, y, z) = 0\}$ ,  $ABCD = \{z: f_5(x, y, z) = 0\}$ ,  $A_*B_*C_*D_* = \{z: f_6(x, y, z) = 0\}$  та розділений деякими екіпотенціальними поверхнями  $E_s F_s F_{*s} E_{*s} = \{z: f_{*s}^*(x, y, z) = 0\}$  ( $s = \overline{1, p-1}$ ) на деякі  $p$  підобластей  $G_2^1 = ABF_1 E_1 A_* B_* F_{*1} E_{*1}$ ,  $G_2^s = E_s F_s F_{*s+1} E_{*s+1} E_{*s} F_{*s} F_{*s+1} E_{*s+1}$  ( $s = \overline{2, p-2}$ ),  $G_2^p = E_{p-1} F_{p-1} CDE_{*p-1} F_{*p-1} C_* D_*$  (рис. 1), розглянемо модельну задачу, описану системою рівнянь:

$$\vec{v} = \kappa \cdot \text{grad } \varphi, \text{ div } \vec{v} = 0, \quad (1)$$



$$\begin{cases} (\sigma \cdot C_j)'_t = \text{div}(D_j \cdot \text{grad } C_j) - \vec{v} \cdot \text{grad } C_j - \\ - \sum_{k=1}^m a_{j,k} \cdot C_j + \sum_{k=1}^m a_{k,j} \cdot C_k - \alpha_j \cdot C_j + \beta_j \cdot U_j, \\ (\sigma \cdot U_j)'_t = - \sum_{k=1}^m a_{j,k}^* \cdot U_j + \sum_{k=1}^m a_{k,j}^* \cdot U_k + \alpha_j \cdot C_j - \beta_j \cdot U_j, \\ \sigma'_t = - \sum_{j=1}^m \gamma_j \cdot U_j \quad (j = \overline{1, m}), (x, y, z) \in G_z^s, s = \overline{1, p} \end{cases} \quad (2)$$

за крайових умов:

$$\begin{aligned} \varphi|_{ABB_*A} = \varphi_*, \quad \varphi|_{CDD_*C} = \varphi^*, \\ \varphi'_n|_{ADD_*A \cup BCC_*B \cup ABCD \cup A_*B_*C_*D_*} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} C_j|_{ABB_*A} = C_{j*}, \quad C'_j|_{CDD_*C} = 0, \\ C'_j|_{ADD_*A \cup BCC_*B \cup ABCD \cup A_*B_*C_*D_*} = 0 \quad (j = \overline{1, m}), \end{aligned} \quad (4)$$

початкових умов:

$$C_j|_{t=0} = c_j^0, \quad U_j|_{t=0} = u_j^0 \quad (j = \overline{1, m}), \quad \sigma|_{t=0} = \sigma_0^0 \quad (5)$$

і умов узгодженості на поверхнях розділу  $E_s F_s F_{*s} E_{*s}$  ( $s = \overline{1, p-1}$ ):

$$\begin{aligned} \varphi|_{E_s F_s F_{*s} E_{*s}} = \varphi|_{E_s F_s F_{*s} E_{*s}} = \varphi^*, \\ \kappa_s \cdot \varphi'_n|_{E_s F_s F_{*s} E_{*s}} = \kappa_{s+1} \cdot \varphi'_n|_{E_s F_s F_{*s} E_{*s}} \quad (s = \overline{1, p-1}), \\ C_j|_{E_s F_s F_{*s} E_{*s}} = C_j|_{E_s F_s F_{*s} E_{*s}}, \\ U_j|_{E_s F_s F_{*s} E_{*s}} = U_j|_{E_s F_s F_{*s} E_{*s}}, \\ D_{s,j} \cdot C'_j|_{E_s F_s F_{*s} E_{*s}} - v_n^s \cdot C_j|_{E_s F_s F_{*s} E_{*s}} = D_{s+1,j} \cdot C'_j|_{E_s F_s F_{*s} E_{*s}} - v_n^s \cdot C_j|_{E_s F_s F_{*s} E_{*s}}, \\ \left( \sigma \cdot \sum_{j=1}^m (C_j + U_j) \right)'_t|_{E_s F_s F_{*s} E_{*s}} = \left( \sigma \cdot \sum_{j=1}^m (C_j + U_j) \right)'_t|_{E_s F_s F_{*s} E_{*s}}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} (s = \overline{1, p-1}, \quad j = \overline{1, m}), \end{aligned} \quad (7)$$

де  $\varphi = \varphi(x, y, z)$  і  $\vec{v} = \vec{v}(v_x, v_y, v_z)$  – відповідно потенціал і вектор швидкості фільтрації,  $\varphi_* < \varphi < \varphi^*$ ,  $0 < \varphi_* = \varphi_{*0} < \varphi_{*1} < \varphi_{*2} < \dots < \varphi_{*p-1} < \varphi_{*p} = \varphi^* < \infty$ ,

$|\vec{v}| = \sqrt{v_x^2(x, y, z) + v_y^2(x, y, z) + v_z^2(x, y, z)} > 0$ ,  $\kappa$  – коефіцієнт фільтрації,  $\kappa_s = \{ \kappa_s, (x, y, z) \in G_z^s, s = \overline{1, p} \}$ ,  $\kappa_s > 0$  ( $s = \overline{1, p}$ ),  $\vec{n}$  – зовнішня нормаль до відповідної поверхні;  $C_j = C_j(x, y, z, t)$  і  $U_j = U_j(x, y, z, t)$  – відповідно концентрації  $j$ -тої компоненти багатокомпонентної домішки у фільтраційній течії і осаді, адсорбованому на зернах завантаження;  $\sigma = \sigma(x, y, z, t)$  – активна пористість завантаження,  $D_j$  – власний коефіцієнт дифузії  $j$ -тої компоненти багатокомпонентної домішки у фільтраційній течії,  $D_j = \{ D_{s,j}, (x, y, z) \in G_z^s, s = \overline{1, p} \}$ ,  $D_{s,j} = \varepsilon \cdot d_{s,j}$ ,  $d_{s,j} > 0$  ( $s = \overline{1, p}$ ),  $a_{j,k}$  і  $a_{j,k}^*$  – коефіцієнти, що характеризують швидкість протікання масообмінних про-

цесів між  $j$ -тою і  $k$ -тою компонентами багатокомпонентної домішки відповідно у фільтраційній течії і осаді, адсорбованому на зернах завантаження,  $a_{j,k} = \{ a_{s,j,k}, (x, y, z) \in G_z^s, s = \overline{1, p} \}$ ,

$$\begin{aligned} a_{s,j,k} = \begin{cases} \varepsilon \cdot \bar{a}_{s,j,k}, & j < k, \\ 0, & j = k, \end{cases} \\ a_{j,k}^* = \{ a_{s,j,k}^*, (x, y, z) \in G_z^s, s = \overline{1, p} \}, \\ a_{s,j,k}^* = \begin{cases} \varepsilon \cdot \bar{a}_{s,j,k}^*, & j < k, \\ 0, & j = k, \end{cases} \end{aligned}$$

α<sub>j</sub> і β<sub>j</sub> – коефіцієнти, що ха-

рактризують обсяги адсорбованої і десорбованої за одиницю часу  $j$ -тої компоненти багатокомпонентної домішки,

$$\alpha_j = \{ \alpha_{s,j}, (x, y, z) \in G_z^s, s = \overline{1, p} \}, \quad \beta_j = \{ \beta_{s,j}, (x, y, z) \in G_z^s, s = \overline{1, p} \}, \quad \beta_{s,j} = \varepsilon \cdot \bar{\beta}_{s,j}$$

( $s = \overline{1, p}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ),  $\gamma_j$  – коефіцієнт, що характеризує швидкість зміни активної пористості завантаження за рахунок адсорбції  $j$ -тої компоненти багатокомпонентної домішки,

$$\gamma_j = \{ \gamma_{s,j}, (x, y, z) \in G_z^s, s = \overline{1, p} \}, \quad \gamma_{s,j} = \varepsilon \cdot \bar{\gamma}_{s,j} \quad (s = \overline{1, p}, \quad j = \overline{1, m}), \quad \bar{a}_{s,j,k} = \bar{a}_{s,j,k}(x, y, z, t),$$

$\bar{a}_{s,j,k}^* = \bar{a}_{s,j,k}^*(x, y, z, t)$ ,  $\alpha_{s,j} = \alpha_{s,j}(x, y, z, t)$ ,  $\bar{\beta}_{s,j} = \bar{\beta}_{s,j}(x, y, z, t)$  і  $\bar{\gamma}_{s,j} = \bar{\gamma}_{s,j}(x, y, z, t)$  – деякі неперервні обмежені функції ( $s = \overline{1, p}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ),  $\varepsilon$  – малий параметр ( $\varepsilon > 0$ ),

$$c_0^0 = \{ c_s^0, (x, y, z) \in G_z^s, s = \overline{1, p} \}, \quad u_0^0 = \{ u_s^0, (x, y, z) \in G_z^s, s = \overline{1, p} \},$$

$$\sigma_0^0 = \{ \sigma_s^0, (x, y, z) \in G_z^s, s = \overline{1, p} \}, \quad c_s = c_s(M, t),$$

$$c_s^0 = c_s^0(x, y, z), \quad u_s^0 = u_s^0(x, y, z) \quad \text{і} \quad \sigma_s^0 = \sigma_s^0(x, y, z)$$

( $s = \overline{1, p}$ ) – достатньо гладкі функції, узгоджені між собою на ребрах області  $G$  [15],  $M \in ABB_*A_*$ ,  $v_n^s$  ( $s = \overline{1, p-1}$ ) – нормальні складові швидкості відповідно на поверхнях  $E_s F_s F_{*s} E_{*s}$  ( $s = \overline{1, p-1}$ ).

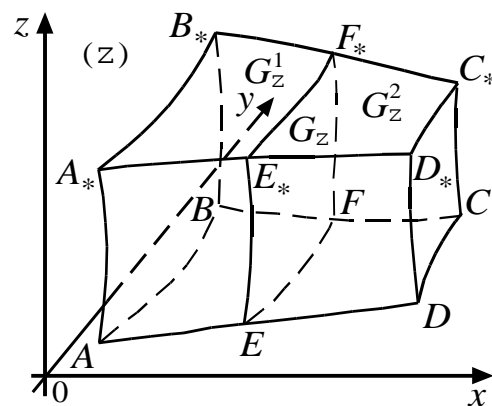


Рис. 1 – Двошарова просторова область фільтрації  $G_z$

Шляхом введення пари функцій  $\psi = \psi(x, y, z)$ ,  $\eta = \eta(x, y, z)$  (просторово комплексно спряжених із функцією  $\varphi(x, y, z)$ ) таких, що  $\kappa \cdot \text{grad } \varphi = \text{grad } \psi \times \text{grad } \eta$  [16] і заміною останніх чотирьох з граничних умов (3) на умови:  $\psi|_{ADD_1A} = 0$ ,  $\psi|_{BCC_1B_1} = Q_*$ ,  $\eta|_{ABCD} = 0$ ,  $\eta|_{A_1B_1C_1D_1} = Q^*$ , задача (1), (3), (6) замінюється більш загальною прямою задачею на знаходження просторового аналогу кусково-конформного відображення області  $G_z$  на відповідну область комплексного потенціалу – прямокутний паралелепіпед  $G_w = A'B'C'D'A_1'B_1C_1D_1$ , який розділений деякими заданими поверхнями  $E'_s F'_s E'_s F'_s$  ( $s = \overline{1, p}$ ) на деякі  $p$  підобластей  $G_w^1 = A'B'E_1 F_1 A_1' B_1' E_1' F_1'$ ,  $G_w^s = E'_s F'_s F'_s E'_s E'_{s+1} F'_{s+1} E'_{s+1} F'_{s+1} E'_{s+1}$  ( $s = \overline{2, p-2}$ ),  $G_w^p = E'_p F'_p F'_p E'_p C'D'E'_{p-1} F'_{p-1} C'D'$  (рис. 2), де  $G_w^s = \{w = (\varphi, \psi, \eta) : \varphi_{*(s-1)}^* < \varphi < \varphi_{*s}^*, 0 < \psi < Q_*, 0 < \eta < Q^*\}$  ( $s = \overline{1, p}$ ),  $\varphi_{*s}^*$  ( $s = \overline{1, p-1}$ ),  $Q_*$ ,  $Q^*$  – невідомі параметри,  $Q = Q_* \cdot Q^*$  – повна фільтраційна витрата.

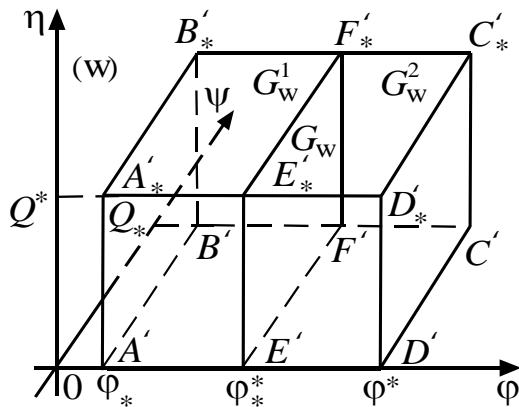


Рис. 2 – Двошарова область комплексного потенціалу  $G_w$

Припустимо, що ця задача є розв’язаною [15], зокрема, знайдено поле швидкостей  $\vec{v}$ , параметри  $\varphi_{*s}^*$  ( $s = \overline{1, p-1}$ ),  $Q_*$ ,  $Q^*$ ,  $Q$  та ряд інших величин. Здійснивши заміну змінних  $x = x(\varphi, \psi, \eta)$ ,  $y = y(\varphi, \psi, \eta)$ ,  $z = z(\varphi, \psi, \eta)$  у рівнянні (2) та умовах (4), (5), (7), отримаємо відповідну “дифузійну задачу” для області  $G_w \times (0, \infty)$ , що описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} (\tilde{\sigma} \cdot c_j)'_t = D_j \cdot (b_1 \cdot c_j''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot c_j''_{\psi\psi} + b_3 \cdot c_j''_{\eta\eta} + b_4 \cdot c_j'_{\psi\varphi} + b_4 \cdot c_j'_{\eta\varphi}) - \\ - \kappa \cdot b_1 \cdot c_j'_{\varphi} - \sum_{k=1}^m \tilde{a}_{j,k} \cdot c_j + \sum_{k=1}^m \tilde{a}_{k,j} \cdot c_k - \tilde{\alpha}_j \cdot c_j + \tilde{\beta}_j \cdot u_j, \\ (\tilde{\sigma} \cdot u_j)'_t = - \sum_{k=1}^m \tilde{a}_{j,k}^* \cdot u_j + \sum_{k=1}^m \tilde{a}_{k,j}^* \cdot u_k + \tilde{\alpha}_j \cdot c_j - \tilde{\beta}_j \cdot u_j, \\ \tilde{\sigma}'_t = - \sum_{j=1}^m \tilde{\gamma}_j \cdot u_j \quad (j = \overline{1, m}), (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^s, s = \overline{1, p} \end{cases} \quad (8)$$

за крайових умов:

$$\begin{aligned} c_j|_{\varphi=\varphi_*} &= \tilde{c}_{j*}, \quad c_j'|_{\varphi=\varphi_*} = 0, \\ c_j'|_{\psi=0} &= c_j'|_{\psi=Q_*} = c_j'|_{\eta=0} = c_j'|_{\eta=Q^*} = 0 \\ (j = \overline{1, m}), \end{aligned} \quad (9)$$

початкових умов:

$$c_j|_{t=0} = \tilde{c}_j^0, \quad u_j|_{t=0} = \tilde{u}_j^0 \quad (j = \overline{1, m}), \quad \tilde{\sigma}|_{t=0} = \tilde{\sigma}_0^0, \quad (10)$$

і умов узгодженості на поверхнях розділу  $E'_s F'_s E'_s F'_s$  ( $s = \overline{1, p}$ ):

$$\begin{aligned} \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*s-0}^*} c_j &= \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*s+0}^*} c_j, \quad \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*s-0}^*} u_j = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*s+0}^*} u_j, \\ \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*s-0}^*} (D_{s,j} \cdot c_j'_{\varphi} - \kappa_s \cdot c_j) &= \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*s+0}^*} (D_{s+1,j} \cdot c_j'_{\varphi} - \kappa_{s+1} \cdot c_j), \end{aligned}$$

$$\lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*s-0}^*} \left( \sigma \cdot \sum_{j=1}^m (c_j + u_j) \right)'_t = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*s+0}^*} \left( \sigma \cdot \sum_{j=1}^m (c_j + u_j) \right)'_t \quad (s = \overline{1, p-1}, j = \overline{1, m}), \quad (11)$$

де

$$\begin{aligned} c_j &= c_j(\varphi, \psi, \eta, t) = \\ &= C_j(x(\varphi, \psi, \eta), y(\varphi, \psi, \eta), z(\varphi, \psi, \eta), t), \\ u_j &= u_j(\varphi, \psi, \eta, t), \quad \tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}(\varphi, \psi, \eta, t), \\ \tilde{c}_{j*} &= \tilde{c}_{j*}(\psi, \eta, t), \\ \tilde{c}_j^0 &= \{ \tilde{c}_{s,j}^0, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^s, s = \overline{1, p} \}, \\ \tilde{u}_j^0 &= \{ \tilde{u}_{s,j}^0, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^s, s = \overline{1, p} \}, \\ \tilde{\sigma}_0^0 &= \{ \tilde{\sigma}_s^0, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^s, s = \overline{1, p} \}, \\ \tilde{a}_{j,k} &= \{ \tilde{a}_{s,j,k}, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^s, s = \overline{1, p} \}, \\ \tilde{a}_{j,k}^* &= \{ \tilde{a}_{s,j,k}^*, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^s, s = \overline{1, p} \}, \\ \tilde{\alpha}_j &= \{ \tilde{\alpha}_{s,j}, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^s, s = \overline{1, p} \}, \\ \tilde{\beta}_j &= \{ \tilde{\beta}_{s,j}, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^s, s = \overline{1, p} \}, \\ \tilde{\gamma}_j &= \{ \tilde{\gamma}_{s,j}, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^s, s = \overline{1, p} \}, \\ \tilde{c}_{s,j}^0 &= \tilde{c}_{s,j}^0(\varphi, \psi, \eta), \quad \tilde{u}_{s,j}^0 = \tilde{u}_{s,j}^0(\varphi, \psi, \eta), \\ \tilde{\sigma}_s^0 &= \tilde{\sigma}_s^0(\varphi, \psi, \eta), \\ \tilde{a}_{s,j,k} &= \begin{cases} \varepsilon \cdot \tilde{a}_{s,j,k}, & j < k, \\ 0, & j = k, \end{cases} \quad \tilde{a}_{s,j,k}^* = \begin{cases} \varepsilon \cdot \tilde{a}_{s,j,k}^*, & j < k, \\ 0, & j = k, \end{cases} \\ \tilde{a}_{s,j,k} &= \tilde{a}_{s,j,k}(\varphi, \psi, \eta), \quad \tilde{a}_{s,j,k}^* = \tilde{a}_{s,j,k}^*(\varphi, \psi, \eta), \\ \tilde{\alpha}_{s,j} &= \tilde{\alpha}_{s,j}(\varphi, \psi, \eta, t), \quad \tilde{\beta}_{s,j} = \varepsilon \cdot \tilde{\beta}_{s,j}, \\ \tilde{\beta}_{s,j} &= \tilde{\beta}_{s,j}(\varphi, \psi, \eta, t), \\ \tilde{\gamma}_{s,j} &= \varepsilon \cdot \tilde{\gamma}_{s,j}, \quad \tilde{\gamma}_{s,j} = \tilde{\gamma}_{s,j}(\varphi, \psi, \eta, t) \quad (s = \overline{1, p}, \\ & j = \overline{1, m}, k = \overline{1, m}), \\ \tilde{v} &= \{ \tilde{v}_s, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^s, s = \overline{1, p} \}, \quad \tilde{v}_s = \tilde{v}_s(\varphi, \psi, \eta), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_r &= \{b_{r,s}, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^s, s = \overline{1, p}\}, \\ b_{r,s} &= b_{r,s}(\varphi, \psi, \eta) \quad (r = \overline{1, 5}, s = \overline{1, p}), \\ b_{1,s} &= \varphi_x'^2 + \varphi_y'^2 + \varphi_z'^2 = \tilde{v}_s^2 \cdot \kappa_s^{-2}, \\ b_{2,s} &= \psi_x'^2 + \psi_y'^2 + \psi_z'^2, \\ b_{3,s} &= \eta_x'^2 + \eta_y'^2 + \eta_z'^2, \quad b_{4,s} = \psi_{xx}'' + \psi_{yy}'' + \psi_{zz}'', \\ b_{5,s} &= \eta_{xx}'' + \eta_{yy}'' + \eta_{zz}'' \quad [15]. \end{aligned}$$

**Розв'язання задачі**

Аналогічно до [13-15] числово-асимптотичне наближення  $c_j = \{c_{s,j}, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^s, s = \overline{1, p}\}$ ,

$$u_j = \{u_{s,j}, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^s, s = \overline{1, p}\},$$

$\tilde{\sigma} = \{\tilde{\sigma}_s, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^s, s = \overline{1, p}\}$  ( $j = \overline{1, m}$ ) розв'язку задачі (8) – (11) з точністю  $O(\varepsilon^{n+1})$  знайдено у вигляді таких рядів:

$$\begin{aligned} c_{s,j} &= \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot c_{s,j,i} + \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot \tilde{P}_{s,j,i} + \\ &+ \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot \tilde{\tilde{P}}_{s,j,i} + \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot \tilde{P}_{s,j,i} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot \hat{\tilde{P}}_{s,j,i} + \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot \tilde{\tilde{P}}_{s,j,i} + \\ &+ \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot \tilde{\tilde{\tilde{P}}}_{s,j,i} + R_{s,j,n+1} \end{aligned} \quad (s = \overline{1, p}, j = \overline{1, m}),$$

$$\begin{aligned} u_{s,j} &= \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot u_{s,j,i} + \sum_{i=0}^{n+1} \varepsilon^i \cdot \tilde{H}_{s,j,i} + \\ &+ \sum_{i=0}^{n+1} \varepsilon^i \cdot \tilde{\tilde{H}}_{s,j,i} + \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot \hat{\tilde{H}}_{s,j,i} + \\ &+ \sum_{i=0}^{n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot \hat{\tilde{\tilde{H}}}_{s,j,i} + \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot \tilde{\tilde{\tilde{H}}}_{s,j,i} + \\ &+ \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot \tilde{\tilde{\tilde{\tilde{H}}}}_{s,j,i} + \tilde{R}_{s,j,n+1} \end{aligned} \quad (s = \overline{1, p}, j = \overline{1, m}),$$

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_s &= \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot \tilde{\sigma}_{s,i} + \sum_{i=0}^{n+1} \varepsilon^i \cdot \tilde{h}_{s,i} + \\ &+ \sum_{i=0}^{n+1} \varepsilon^i \cdot \tilde{\tilde{h}}_{s,i} + \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot \hat{\tilde{h}}_{s,i} + \\ &+ \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot \hat{\tilde{\tilde{h}}}_{s,i} + \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot \tilde{\tilde{\tilde{h}}}_{s,i} + \\ &+ \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot \tilde{\tilde{\tilde{\tilde{h}}}}_{s,i} + \tilde{R}_{s,n+1} \end{aligned} \quad (s = \overline{1, p}),$$

де  $c_{s,j,i} = c_{s,j,i}(\varphi, \psi, \eta, t)$ ,  $u_{s,j,i} = u_{s,j,i}(\varphi, \psi, \eta, t)$ ,  $\tilde{\sigma}_{s,i} = \tilde{\sigma}_{s,i}(\varphi, \psi, \eta, t)$  ( $s = \overline{1, p}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $i = \overline{0, n}$ ) – члени регулярних частин асимптотик,  $\tilde{P}_{s,j,i} = \tilde{P}_{s,j,i}(\tilde{\phi}_{s-1}, \psi, \eta, t)$ ,  $\tilde{H}_{s,j,i} = \tilde{H}_{s,j,i}(\tilde{\phi}_{s-1}, \psi, \eta, t)$ ,  $\tilde{h}_{s,i} = \tilde{h}_{s,i}(\tilde{\phi}_{s-1}, \psi, \eta, t)$ ,  $\tilde{\tilde{P}}_{s,j,i} = \tilde{\tilde{P}}_{s,j,i}(\tilde{\tilde{\phi}}, \psi, \eta, t)$ ,  $\tilde{\tilde{H}}_{s,j,i} = \tilde{\tilde{H}}_{s,j,i}(\tilde{\tilde{\phi}}, \psi, \eta, t)$ ,  $\tilde{\tilde{h}}_{s,i} = \tilde{\tilde{h}}_{s,i}(\tilde{\tilde{\phi}}, \psi, \eta, t)$  ( $s = \overline{1, p}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $i = \overline{0, n+1}$ ) – функції типу примежового шару в околах  $\varphi = \varphi_{*s}^*$  ( $s = \overline{0, p}$ ) (поправки на вході у фільтр, на виході з фільтру та в околі меж шарів фільтру),  $\hat{P}_{s,j,i} = \hat{P}_{s,j,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t)$ ,  $\hat{\tilde{P}}_{s,j,i} = \hat{\tilde{P}}_{s,j,i}(\varphi, \tilde{\tilde{\psi}}, \eta, t)$ ,  $\hat{H}_{s,j,i} = \hat{H}_{s,j,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t)$ ,  $\hat{\tilde{H}}_{s,j,i} = \hat{\tilde{H}}_{s,j,i}(\varphi, \tilde{\tilde{\psi}}, \eta, t)$ ,  $\hat{h}_{s,i} = \hat{h}_{s,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t)$ ,  $\hat{\tilde{h}}_{s,i} = \hat{\tilde{h}}_{s,i}(\varphi, \tilde{\tilde{\psi}}, \eta, t)$ ,  $\tilde{\tilde{P}}_{s,j,i} = \tilde{\tilde{P}}_{s,j,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t)$ ,  $\tilde{\tilde{\tilde{P}}}_{s,j,i} = \tilde{\tilde{\tilde{P}}}_{s,j,i}(\varphi, \psi, \tilde{\tilde{\eta}}, t)$ ,  $\tilde{\tilde{H}}_{s,j,i} = \tilde{\tilde{H}}_{s,j,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t)$ ,  $\tilde{\tilde{\tilde{H}}}_{s,j,i} = \tilde{\tilde{\tilde{H}}}_{s,j,i}(\varphi, \psi, \tilde{\tilde{\eta}}, t)$ ,  $\tilde{\tilde{h}}_{s,i} = \tilde{\tilde{h}}_{s,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t)$ ,  $\tilde{\tilde{\tilde{h}}}_{s,i} = \tilde{\tilde{\tilde{h}}}_{s,i}(\varphi, \psi, \tilde{\tilde{\eta}}, t)$  ( $s = \overline{1, p}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $i = \overline{0, 2n+1}$ ) – функції типу примежового шару відповідно в околах  $\psi = 0$ ,  $\psi = Q_*$ ,  $\eta = 0$ ,  $\eta = Q^*$  (поправки на бічних стінках фільтру),  $\tilde{\phi}_s = \frac{\varphi - \varphi_{*s}^*}{\varepsilon}$  ( $s = \overline{0, p-1}$ ),  $\tilde{\phi}_s = \frac{\varphi_{*s}^* - \varphi}{\varepsilon}$  ( $s = \overline{1, p}$ ),  $\tilde{\psi} = \frac{\psi}{\sqrt{\varepsilon}}$ ,  $\tilde{\tilde{\psi}} = \frac{Q_* - \psi}{\sqrt{\varepsilon}}$ ,  $\tilde{\eta} = \frac{\eta}{\sqrt{\varepsilon}}$ ,  $\tilde{\tilde{\eta}} = \frac{Q^* - \eta}{\sqrt{\varepsilon}}$  – відповідні їм регуляризуючі перетворення (розтяги),  $R_{s,j,n+1}(\varphi, \psi, \eta, t, \varepsilon)$ ,  $\tilde{R}_{s,j,n+1}(\varphi, \psi, \eta, t, \varepsilon)$ ,  $\tilde{\tilde{R}}_{s,n+1}(\varphi, \psi, \eta, t, \varepsilon)$  ( $s = \overline{1, p}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ) – залишкові члени.

Зокрема, для знаходження для знаходження  $c_{s,j,i}$ ,  $u_{s,j,i}$ ,  $\tilde{\sigma}_{s,i}$  ( $s = \overline{1, p}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $i = 0, n$ ),  $\tilde{P}_{s,j,i}$ ,  $\tilde{H}_{s,j,i}$ ,  $\tilde{h}_{s,i}$  ( $s = \overline{1, p}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $i = \overline{0, n+1}$ ) і  $\tilde{\tilde{P}}_{s,j,i}$ ,  $\tilde{\tilde{H}}_{s,j,i}$ ,  $\tilde{\tilde{h}}_{s,i}$  ( $s = \overline{1, p}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $i = \overline{0, n+1}$ ) одержано наступні формули:

$$c_{s,j,0} = \begin{cases} \tilde{c}_{j*}(\psi, \eta, t - f_1(\varphi, \psi, \eta)) \cdot e^{-\tilde{\lambda}_{s,j,1}(\varphi, \psi, \eta, t)}, & t \geq \tilde{f}_1, \\ c_{s-1,j,0}(\psi, \eta, t - f_s(\varphi, \psi, \eta)) \cdot e^{-\tilde{\lambda}_{s,j,1}(\varphi, \psi, \eta, t)}, & t \geq \tilde{f}_s, \\ \tilde{c}_{s,j}^0(f_s^{-1}(f_s(\varphi, \psi, \eta) - t, \psi, \eta), \psi, \eta) \cdot e^{-\tilde{\lambda}_{s,j,2}(\varphi, \psi, \eta, t)}, & t < \tilde{f}_s, \end{cases}$$

$$u_{s,j,0} = \frac{1}{\tilde{\sigma}_s^0} \int_0^t \tilde{\alpha}_{s,j}(\varphi, \psi, \eta, \hat{t}) \cdot c_{s,j,0}(\varphi, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} + \tilde{u}_{s,j}^0, \quad \tilde{\sigma}_{s,0} = \tilde{\sigma}_s^0 \quad (s = \overline{1, p}, j = \overline{1, m});$$

$$c_{s,j,i} = \begin{cases} e^{-\tilde{\lambda}_{s,j,1}(\varphi,\psi,\eta,t)} \cdot \int_{\varphi_{s(s-1)}^{\varphi} \tilde{g}_{s,j,i}(\tilde{\varphi},\psi,\eta,t) \cdot e^{\tilde{\lambda}_{s,j,1}(\tilde{\varphi},\psi,\eta,t)} d\tilde{\varphi}, & t \geq f_s, \\ e^{-\tilde{\lambda}_{s,j,2}(\varphi,\psi,\eta,t)} \cdot \int_0^t \tilde{g}_{s,j,i}(\varphi,\psi,\eta,\tilde{t}) \cdot e^{\tilde{\lambda}_{s,j,2}(\varphi,\psi,\eta,\tilde{t})} d\tilde{t}, & t < f_s, \end{cases}$$

$$u_{s,j,i} = \frac{1}{\tilde{\sigma}_s^0} \cdot \int_0^t \tilde{g}_{s,j,i}(\varphi,\psi,\eta,\tilde{t}) d\tilde{t}, \quad \tilde{\sigma}_{s,i} = \int_0^t \tilde{g}_{s,i}(\varphi,\psi,\eta,\tilde{t}) d\tilde{t} \quad (s = \overline{1,p}, j = \overline{1,m}, i = \overline{1,n}),$$

$$\tilde{P}_{1,j,0} = \left( \tilde{c}_{j*} - c_{1,j,0} \Big|_{\tilde{\varphi}_0=0} \right) \cdot e^{\frac{\kappa_1 \tilde{\varphi}_0}{d_{1,j}}},$$

$$\tilde{P}_{1,j,i} = \frac{1}{d_{1,j}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}_0} \left( e^{\frac{\kappa_1 \tilde{\varphi}}{d_{1,j}}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}} q_{1,1,j,i}(\tilde{\varphi},\psi,\eta,t) \cdot e^{-\frac{\kappa_1 \tilde{\varphi}}{d_{1,j}}} d\tilde{\varphi} - c_{1,j,i} \Big|_{\tilde{\varphi}_0=0} \cdot e^{\frac{\kappa_1 \tilde{\varphi}_0}{d_{1,j}}} \right) d\tilde{\varphi} \quad (j = \overline{1,m}, i = \overline{1,n}),$$

$$\tilde{P}_{1,j,n+1} = \frac{1}{d_{1,j}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}_0} \left( e^{\frac{\kappa_1 \tilde{\varphi}}{d_{1,j}}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}} q_{1,1,j,n+1}(\tilde{\varphi},\psi,\eta,t) \cdot e^{-\frac{\kappa_1 \tilde{\varphi}}{d_{1,j}}} d\tilde{\varphi} \right) d\tilde{\varphi} \quad (j = \overline{1,m}),$$

$$\tilde{H}_{1,j,i} = \frac{1}{\tilde{\sigma}_1^0(\tilde{\varphi}_0,\psi,\eta)} \cdot \int_0^t \tilde{q}_{1,1,j,i}(\tilde{\varphi}_0,\psi,\eta,\tilde{t}) d\tilde{t} \quad (j = \overline{1,m}, i = \overline{0,n+1}),$$

$$\tilde{h}_{1,0} = 0, \quad \tilde{h}_{1,i} = \int_0^t \tilde{q}_{1,1,i}(\tilde{\varphi}_0,\psi,\eta,\tilde{t}) d\tilde{t} \quad (i = \overline{1,n+1}),$$

$$\tilde{P}_{p,j,0} = \frac{d_{p,j}}{\kappa_p} \cdot c'_{(p,j,0)\tilde{\varphi}_p} \Big|_{\tilde{\varphi}_p=0} \cdot e^{-\frac{\kappa_p \tilde{\varphi}_p}{d_{p,j}}} \quad (j = \overline{1,m}),$$

$$\tilde{P}_{p,j,i} = \frac{1}{d_{p,j}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}_p} \left( e^{-\frac{\kappa_p \tilde{\varphi}}{d_{p,j}}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}} q_{2,p,j,i}(\tilde{\varphi},\psi,\eta,t) \cdot e^{\frac{\kappa_p \tilde{\varphi}}{d_{p,j}}} d\tilde{\varphi} - \frac{d_{p,j}}{\kappa_p} \cdot c'_{(p,i,j)\tilde{\varphi}_p} \Big|_{\tilde{\varphi}_p=0} \cdot e^{-\frac{\kappa_p \tilde{\varphi}_p}{d_{p,j}}} \right) d\tilde{\varphi} \quad (j = \overline{1,m}, i = \overline{1,n}),$$

$$\tilde{P}_{p,j,n+1} = \frac{1}{d_{p,j}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}_p} \left( e^{-\frac{\kappa_p \tilde{\varphi}}{d_{p,j}}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}} q_{2,p,j,n+1}(\tilde{\varphi},\psi,\eta,t) \cdot e^{\frac{\kappa_p \tilde{\varphi}}{d_{p,j}}} d\tilde{\varphi} \right) d\tilde{\varphi} \quad (j = \overline{1,m}),$$

$$\tilde{H}_{p,j,i} = \frac{1}{\tilde{\sigma}_p^0(\tilde{\varphi}_p,\psi,\eta)} \cdot \int_0^t \tilde{q}_{2,p,j,i}(\tilde{\varphi}_p,\psi,\eta,\tilde{t}) d\tilde{t} \quad (j = \overline{1,m}, i = \overline{0,n+1}),$$

$$\tilde{h}_{p,i} = 0, \quad \tilde{h}_{p,i} = \int_0^t \tilde{q}_{2,p,i}(\tilde{\varphi}_p,\psi,\eta,\tilde{t}) d\tilde{t} \quad (i = \overline{1,n+1}),$$

$$\tilde{P}_{s+1,j,0} = \frac{1}{2(\kappa_{s+1} - \kappa_s)} \cdot \left( \left( -d_{s,j} \cdot c'_{(s,j,0)\tilde{\varphi}_s} + \kappa_s \cdot c_{s,j,0} \right) \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \left( d_{s+1,j} \cdot c'_{(s+1,j,0)\tilde{\varphi}_s} + \kappa_{s+1} \cdot c_{s+1,j,0} \right) \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \right. \\ \left. - \kappa_s \cdot \left( c_{s,j,0} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - c_{s+1,j,0} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) \right) \cdot e^{-\frac{\kappa_{s+1} \tilde{\varphi}_s}{d_{s+1,j}}} \quad (s = \overline{1,p-1}, j = \overline{1,m}),$$

$$\tilde{P}_{s+1,j,i} = \frac{1}{d_{s+1,j}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}_s} \left( e^{-\frac{\kappa_{s+1} \tilde{\varphi}}{d_{s+1,j}}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}} \tilde{q}_{s,j,i}(\tilde{\varphi},\psi,\eta,t) \cdot e^{\frac{\kappa_{s+1} \tilde{\varphi}}{d_{s+1,j}}} d\tilde{\varphi} + \frac{1}{2(\kappa_{s+1} - \kappa_s)} \cdot \left( \left( -d_{s,j} \cdot c'_{(s,j,i)\tilde{\varphi}_s} + \kappa_s \cdot c_{s,j,i} \right) \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \right. \right. \\ \left. \left. - \left( d_{s+1,j} \cdot c'_{(s+1,j,i)\tilde{\varphi}_s} + \kappa_{s+1} \cdot c_{s+1,j,i} \right) \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \kappa_s \times \left( c_{s,j,i} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - c_{s+1,j,i} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) \right) \cdot e^{-\frac{\kappa_{s+1} \tilde{\varphi}_s}{d_{s+1,j}}} \quad (s = \overline{1,p-1}, j = \overline{1,m}, i = \overline{1,n}),$$

$$\tilde{P}_{s+1,j,n+1} = \frac{1}{d_{s+1,j}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}_s} \left( e^{-\frac{\kappa_{s+1} \tilde{\varphi}}{d_{s+1,j}}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}} \tilde{q}_{s,j,n+1}(\tilde{\varphi},\psi,\eta,t) \cdot e^{\frac{\kappa_{s+1} \tilde{\varphi}}{d_{s+1,j}}} d\tilde{\varphi} \right) d\tilde{\varphi} \quad (s = \overline{1,p-1}, j = \overline{1,m}),$$

$$\tilde{H}_{s+1,j,i} = \frac{1}{\tilde{\sigma}_{s+1}^0(\tilde{\varphi}_s,\psi,\eta)} \cdot \int_0^t \tilde{q}_{1,s+1,j,i}(\tilde{\varphi}_s,\psi,\eta,\tilde{t}) d\tilde{t} - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{\tilde{\sigma}_{s+1}^0(\tilde{\varphi}_s,\psi,\eta)} \times \right. \\ \left. \times \int_0^t \tilde{q}_{1,s,j,i}(\tilde{\varphi}_s,\psi,\eta,\tilde{t}) d\tilde{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \frac{1}{\tilde{\sigma}_s^0(\tilde{\varphi}_s,\psi,\eta)} \cdot \int_0^t \tilde{q}_{2,s,j,i}(\tilde{\varphi}_s,\psi,\eta,\tilde{t}) d\tilde{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2} \cdot \left( u_{s,j,i} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - u_{s+1,j,i} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) \quad (s = \overline{1, p-1}, \quad j = \overline{1, m}, \quad i = \overline{0, n}), \\
 \tilde{H}_{s+1,j,n+1} & = \frac{1}{\tilde{\sigma}_{s+1}^0(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta)} \cdot \int_0^t \hat{q}_{1,s+1,j,n+1}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{\tilde{\sigma}_{s+1}^0(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta)} \cdot \int_0^t \hat{q}_{1,s,j,n+1}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{\tilde{\sigma}_s^0(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta)} \cdot \int_0^t \hat{q}_{2,s,j,n+1}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) \quad (s = \overline{1, p-1}, \quad j = \overline{1, m}), \\
 \tilde{h}_{s+1,0} & = \frac{1}{2} \cdot \left( \tilde{\sigma}_{s,0} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \tilde{\sigma}_{s+1,0} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) \quad (s = \overline{1, p-1}), \\
 \tilde{h}_{s+1,i} & = \int_0^t \tilde{q}_{1,s+1,i}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} - \frac{1}{2} \cdot \left( \int_0^t \tilde{q}_{1,s+1,i}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \right. \\
 & \left. - \int_0^t \tilde{q}_{2,s,i}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left( \tilde{\sigma}_{s,0} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \tilde{\sigma}_{s+1,0} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) \quad (s = \overline{1, p-1}, \quad i = \overline{1, n}), \\
 \tilde{h}_{s+1,n+1} & = \int_0^t \tilde{q}_{1,s+1,n+1}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} - \frac{1}{2} \cdot \left( \int_0^t \tilde{q}_{1,s+1,n+1}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \int_0^t \tilde{q}_{2,s,n+1}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) \quad (s = \overline{1, p-1}), \\
 \tilde{P}_{s,j,0} & = \frac{1}{2(\kappa_{s+1} - \kappa_s)} \cdot \left( \left( -d_{s,j} \cdot c'_{(s,j,0)\tilde{\varphi}_s} + \kappa_s \cdot c_{s,j,0} \right) \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \left( d_{s+1,j,0} \cdot c'_{(s+1,j,0)\tilde{\varphi}_s} + \kappa_{s+1} \cdot c_{s+1,j,0} \right) \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \right. \\
 & \left. - \kappa_{s+1} \cdot \left( c_{s,j,i} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - c_{s+1,j,i} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) \cdot e^{\frac{\kappa_s - \tilde{\varphi}_s}{d_{s,j}}} \right) \quad (s = \overline{1, p-1}, \quad j = \overline{1, m}), \\
 \tilde{P}_{s,j,i} & = \frac{1}{d_{s,j}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}_s} \left( e^{\frac{\kappa_s - \tilde{\varphi}}{d_{s,j}}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}} \hat{q}_{s,j,i}(\tilde{\varphi}, \psi, \eta, t) \cdot e^{-\frac{\kappa_s - \tilde{\varphi}}{d_{s,j}}} d\tilde{\varphi} \right) d\tilde{\varphi} + \frac{1}{2(\kappa_{s+1} - \kappa_s)} \cdot \left( \left( -d_{s,j} \cdot c'_{(s,j,i)\tilde{\varphi}_s} + \kappa_s \cdot c_{s,j,i} \right) \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \right. \\
 & \left. - \left( d_{s+1,j} \cdot c'_{(s+1,j,i)\tilde{\varphi}_s} + \kappa_{s+1} \cdot c_{s+1,j,i} \right) \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \kappa_{s+1} \times \left( c_{s,j,i} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - c_{s+1,j,i} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) \cdot e^{\frac{\kappa_s - \tilde{\varphi}_s}{d_{s,j}}} \right) \quad (s = \overline{1, p-1}, \quad j = \overline{1, m}, \quad i = \overline{1, n}), \\
 \tilde{P}_{s,j,n+1} & = \frac{1}{d_{s,j}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}_s} \left( e^{\frac{\kappa_s - \tilde{\varphi}}{d_{s,j}}} \cdot \int_0^{\tilde{\varphi}} \hat{q}_{s,j,n+1}(\tilde{\varphi}, \psi, \eta, t) \cdot e^{-\frac{\kappa_s - \tilde{\varphi}}{d_{s,j}}} d\tilde{\varphi} \right) d\tilde{\varphi} \quad (s = \overline{1, p-1}, \quad j = \overline{1, m}), \\
 \tilde{H}_{s,j,i} & = \frac{1}{\tilde{\sigma}_s^0(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta)} \cdot \int_0^t \hat{q}_{2,s,j,i}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{\tilde{\sigma}_{s+1}^0(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta)} \times \right. \\
 & \left. \times \int_0^t \hat{q}_{1,s,j,i}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \frac{1}{\tilde{\sigma}_s^0(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta)} \cdot \int_0^t \hat{q}_{2,s,j,i}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) + \\
 & - \frac{1}{2} \cdot \left( u_{s,j,i} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - u_{s+1,j,i} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) \quad (s = \overline{1, p-1}, \quad j = \overline{1, m}, \quad i = \overline{0, n}), \\
 \tilde{H}_{s,j,n+1} & = \frac{1}{\tilde{\sigma}_s^0(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta)} \cdot \int_0^t \hat{q}_{2,s,j,n+1}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{\tilde{\sigma}_{s+1}^0(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta)} \cdot \int_0^t \hat{q}_{1,s,j,n+1}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{\tilde{\sigma}_s^0(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta)} \cdot \int_0^t \hat{q}_{2,s,j,n+1}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) \quad (s = \overline{1, p-1}, \quad j = \overline{1, m}), \\
 \tilde{h}_{s,0} & = -\frac{1}{2} \cdot \left( \tilde{\sigma}_{s,0} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \tilde{\sigma}_{s+1,0} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) \quad (s = \overline{1, p-1}), \\
 \tilde{h}_{s,i} & = \int_0^t \tilde{q}_{2,s,i}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} + \frac{1}{2} \cdot \left( \int_0^t \tilde{q}_{1,s+1,i}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \right. \\
 & \left. - \int_0^t \tilde{q}_{2,s,i}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left( \tilde{\sigma}_{s,0} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \tilde{\sigma}_{s+1,0} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) \quad (s = \overline{1, p-1}, \quad i = \overline{1, n}), \\
 \tilde{h}_{s,n+1} & = \int_0^t \tilde{q}_{2,s,n+1}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} + \frac{1}{2} \cdot \left( \int_0^t \tilde{q}_{1,s+1,n+1}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} - \int_0^t \tilde{q}_{2,s,n+1}(\tilde{\varphi}_s, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \Big|_{\tilde{\varphi}_s=0} \right) \quad (s = \overline{1, p-1}).
 \end{aligned}$$

де



$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_{s,j,1}(\varphi, \psi, \eta, t) &= \kappa_s \int_{\varphi_{*(s-1)}}^{\varphi} \frac{\tilde{\alpha}_{s,j}(\widehat{\varphi}, \psi, \eta, f_s(\widehat{\varphi}, \psi, \eta) + t - f_s(\varphi, \psi, \eta))}{\tilde{v}^2(\widehat{\varphi}, \psi, \eta)} d\widehat{\varphi}, \\ \tilde{\lambda}_{s,j,2}(\varphi, \psi, \eta, t) &= \int_0^t \frac{\tilde{\alpha}_{s,j}(f_s^{-1}(\widehat{t} + f_s(\varphi, \psi, \eta) - t, \psi, \eta), \psi, \eta, \widehat{t})}{\tilde{\sigma}_s^0(f_s^{-1}(\widehat{t} + f_s(\varphi, \psi, \eta) - t, \psi, \eta), \psi, \eta)} d\widehat{t}, \\ \tilde{g}_{s,j,i}(\widehat{\varphi}, \psi, \eta, t) &= \frac{g_{s,j,i}(\widehat{\varphi}, \psi, \eta, f_s(\widehat{\varphi}, \psi, \eta) - f_s(\varphi, \psi, \eta) + t)}{\tilde{v}^2(\widehat{\varphi}, \psi, \eta)}, \\ \tilde{g}_{s,j,i}(\varphi, \psi, \eta, \widehat{t}) &= \frac{g_{s,j,i}(f_s^{-1}(\widehat{t} + f_s(\varphi, \psi, \eta) - t, \psi, \eta), \psi, \eta, \widehat{t})}{\tilde{\sigma}_s^0(f_s^{-1}(\widehat{t} + f_s(\varphi, \psi, \eta) - t, \psi, \eta), \psi, \eta)}, \\ g_{s,j,i} &= I(i, 1) \cdot \left( d_{s,j} \cdot \left( \frac{\tilde{v}^2}{\kappa_s^2} \cdot c''_{(s,j,i-1)\varphi\varphi} + b_1 \cdot c''_{(s,j,i-1)\psi\psi} + b_2 \cdot c''_{(s,j,i-1)\eta\eta} + \right. \right. \\ &+ b_3 \cdot c'_{(s,j,i-1)\psi} + b_4 \cdot c'_{(s,j,i-1)\eta} \left. \right) + \sum_{k=1}^m \tilde{a}_{s,j,k} \cdot c_{s,j,i-1} - \sum_{k=1}^m \tilde{a}_{s,k,j} \cdot c_{s,k,i-1} + \tilde{\beta}_{s,j} \cdot u_{s,j,i-1} - \sum_{l=1}^i (\tilde{\sigma}_{s,l} \cdot c'_{(s,j,i-l)t} - \tilde{\sigma}'_{(s,l)t} \cdot c_{s,j,i-l}) \left. \right), \\ \tilde{g}_{s,j,i} &= \tilde{\alpha}_{s,j} \times c_{s,j,i} + I(i, 1) \cdot \left( \sum_{k=1}^m \tilde{a}_{s,j,k}^* \cdot u_{s,j,i-1} - \sum_{k=1}^m \tilde{a}_{s,k,j}^* \cdot u_{s,k,i-1} - \tilde{\beta}_{s,j} \cdot u_{s,j,i-1} + \sum_{l=1}^i (\tilde{\sigma}_{s,l} \cdot u'_{(s,j,i-l)t} + \tilde{\sigma}'_{(s,l)t} \cdot u_{s,j,i-l}) \right), \\ \tilde{g}_{s,i} &= -I(i, 1) \cdot \sum_{j=1}^m \tilde{\gamma}_{s,j} \cdot u_{s,j,i-1}, \end{aligned}$$

$f_s = f_s(\varphi, \psi, \eta) = \kappa_s \int_{\varphi_{*(s-1)}}^{\varphi} \frac{\tilde{\sigma}_s^0(\widehat{\varphi}, \psi, \eta)}{\tilde{v}^2(\widehat{\varphi}, \psi, \eta)} d\widehat{\varphi}$  – час проходження відповідною частинкою шляху від точки

$(x(\varphi_{*(s-1)}, \psi, \eta), y(\varphi_{*(s-1)}, \psi, \eta), z(\varphi_{*(s-1)}, \psi, \eta)) \in G_z^{s-1}$  до точки  $(x(\varphi, \psi, \eta), y(\varphi, \psi, \eta), z(\varphi, \psi, \eta)) \in G_z^s$  вздовж відпові-

дної лінії течії,  $f_s^{-1}$  – функція, обернена до  $f_s$  відносно змінної  $\varphi$ ,  $q_{1,s,j,i} = \frac{\kappa_s^2}{\tilde{v}^2(\varphi_{*s}, \psi, \eta)} \cdot \left( I(i, 1) \cdot \left( \sum_{l=0}^{i-1} (\tilde{h}_{s,l} \times \right. \right.$

$$\begin{aligned} &\times \tilde{P}'_{(s,j,i-l-1)t} + \tilde{h}'_{(s,l)t} \cdot \tilde{P}_{s,j,i-l-1} + \tilde{\sigma}_{s,l} \cdot \tilde{P}'_{(s,j,i-l-1)t} + \tilde{\sigma}'_{(s,l)t} \cdot \tilde{P}_{s,j,i-l-1} + \\ &+ \tilde{h}_{s,l} \cdot c'_{(s,j,i-l-1)t} + \tilde{h}'_{(s,l)t} \cdot c_{s,j,i-l-1} \left. \right) - \sum_{l=1}^i \frac{\tilde{V}_{s,l}}{\kappa_s^2} \cdot \left( d_{s,j} \cdot \tilde{P}''_{(s,j,i-l)\varphi\varphi} - \right. \\ &\left. - \kappa_s \cdot \tilde{P}'_{(s,j,i-l)\varphi} \right) - \sum_{l=0}^i \tilde{\alpha}_{s,j,l} \cdot \tilde{P}_{s,j,i-l} \left. \right) + I(i, 2) \cdot \left( \sum_{l=0}^{i-2} \sum_{k=1}^m \tilde{a}_{s,k,j,l} \cdot \tilde{P}_{s,k,i-2-l} - \right. \\ &- \sum_{l=0}^{i-2} \sum_{k=1}^m \tilde{a}_{s,k,j,l} \cdot \tilde{P}_{s,j,i-2-l} + \sum_{l=0}^{i-1} \tilde{\beta}_{s,j,l} \cdot \tilde{H}_{s,j,i-l-1} + d_{s,j} \cdot \sum_{l=0}^{i-2} (\tilde{B}_{1,s,l} \times \times \tilde{P}''_{(s,j,i-2-l)\psi\psi} + \tilde{B}_{2,s,l} \cdot \tilde{P}''_{(s,j,i-2-l)\eta\eta} + \tilde{B}_{3,s,l} \cdot \tilde{P}'_{(s,j,i-2-l)\psi} + \tilde{B}_{4,s,l} \times \\ &\left. \left. \times \tilde{P}'_{(s,j,i-2-l)\eta} \right) \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{2,s,j,i} &= \frac{\kappa_s^2}{\tilde{v}^2(\varphi_{*s}, \psi, \eta)} \cdot \left( I(i, 1) \cdot \left( \sum_{l=0}^{i-1} (\tilde{h}_{s,l} \cdot \tilde{P}'_{(s,j,i-l-1)t} + \right. \right. \\ &+ \tilde{h}'_{(s,l)t} \cdot \tilde{P}_{s,j,i-l-1} + \tilde{\sigma}_{s,l} \cdot \tilde{P}'_{(s,j,i-l-1)t} + \tilde{\sigma}'_{(s,l)t} \cdot \tilde{P}_{s,i-l-1} + \tilde{h}_{s,l} \cdot c'_{(s,i-l-1)t} + \\ &+ \tilde{h}'_{(s,l)t} \cdot c_{s,j,i-l-1} \left. \right) - \sum_{l=1}^i \frac{\tilde{V}_{s,l}}{\kappa_s^2} \cdot \left( d_{s,j} \cdot \tilde{P}''_{(s,j,i-l)\varphi\varphi} + \kappa_s \cdot \tilde{P}'_{(s,j,i-l)\varphi} \right) + \sum_{l=0}^i (\tilde{\alpha}_{s,j,l} \times \\ &\times \tilde{P}_{s,j,i-l} \left. \right) \left. \right) + I(i, 2) \cdot \left( \sum_{l=0}^{i-2} \sum_{k=1}^m \tilde{a}_{s,k,j,l} \cdot \tilde{P}_{s,k,i-2-l} - \sum_{l=0}^{i-2} \sum_{k=1}^m \tilde{a}_{s,k,j,l} \cdot \tilde{P}_{s,j,i-2-l} + \right. \end{aligned}$$

$$\left. + \sum_{l=0}^{i-1} \tilde{\beta}_{s,j,l} \cdot \tilde{H}_{s,j,i-l-1} + d_{s,j} \cdot \sum_{l=0}^{i-2} (\tilde{B}_{1,s,l} \cdot \tilde{P}''_{(s,j,i-2-l)\psi\psi} + \tilde{B}_{2,s,l} \cdot \tilde{P}''_{(s,j,i-2-l)\eta\eta} + \tilde{B}_{3,s,l} \cdot \tilde{P}'_{(s,j,i-2-l)\psi} + \tilde{B}_{4,s,l} \cdot \tilde{P}'_{(s,j,i-2-l)\eta}) \right),$$

$$\begin{aligned} \hat{q}_{1,s,j,i} &= \sum_{l=0}^i \tilde{\alpha}_{s,j,l} \cdot \tilde{P}_{s,j,i-l} - I(i, 1) \cdot \left( \sum_{l=0}^{i-2} \sum_{k=1}^m \tilde{a}_{s,k,j,l}^* \cdot \tilde{H}_{s,j,i-2-l} - \sum_{l=0}^{i-2} \sum_{k=1}^m \tilde{a}_{s,k,j,l}^* \cdot \tilde{H}_{s,k,i-2-l} + \sum_{l=0}^{i-1} (\tilde{\beta}_{s,j,l} \times \right. \\ &\left. \times \tilde{H}_{s,j,i-l-1}) + \sum_{l=1}^i (\tilde{\sigma}_{s,l} \cdot \tilde{H}'_{(s,j,i-l)t} + \tilde{\sigma}'_{(s,l)t} \cdot \tilde{H}_{s,j,i-l} + \tilde{h}_{s,l} \cdot \tilde{H}'_{(s,j,i-l)t} + \tilde{h}'_{(s,l)t} \cdot \tilde{H}_{s,j,i-l} + \tilde{h}_{s,l} \cdot u'_{(s,j,i-l)t} + \tilde{h}'_{(s,l)t} \cdot u_{s,j,i-l}) \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{q}_{2,s,j,i} = & \sum_{l=0}^i \left( \tilde{\alpha}_{s,j,l} \times \tilde{P}_{s,j,i-l} \right) - I(i,1) \cdot \left( \sum_{l=0}^{i-2} \sum_{k=1}^m \tilde{\alpha}_{s,k,j,l}^* \cdot \tilde{H}_{s,j,i-2-l} - \sum_{l=0}^{i-2} \sum_{k=1}^m \tilde{\alpha}_{s,k,j,l}^* \cdot \tilde{H}_{s,k,i-2-l} + \right. \\ & \left. + \sum_{l=0}^{i-1} \tilde{\beta}_{s,j,l} \cdot \tilde{H}_{s,j,i-l-1} + \sum_{l=1}^i \left( \tilde{\sigma}_{s,l} \cdot \tilde{H}'_{(s,j,i-l)_t} + \tilde{\sigma}'_{(s,l)_t} \cdot \tilde{H}_{s,j,i-l} + \tilde{h}_{s,l} \times \tilde{H}'_{(s,j,i-l)_t} + \tilde{h}'_{(s,l)_t} \cdot \tilde{H}_{s,j,i-l} + \tilde{h}_{s,l} \cdot u'_{(s,j,i-l)_t} + \tilde{h}'_{(s,l)_t} \cdot u_{s,j,i-l} \right) \right), \\ \tilde{q}_{1,s,i} = & -I(i,1) \cdot \sum_{l=0}^{i-1} \sum_{k=1}^m \tilde{\gamma}_{s,k,l} \cdot \tilde{H}_{s,k,i-l-1}, \quad \tilde{q}_{2,s,i} = -I(i,1) \cdot \sum_{l=0}^{i-1} \sum_{k=1}^m \tilde{\gamma}_{s+1,k,l} \cdot \tilde{H}_{s+1,k,i-l-1} \quad (s = \overline{1,p}, j = \overline{1,m}, i = \overline{0,n+1}), \quad \tilde{V}_{s,l}, \\ \tilde{B}_{r,s,l} \quad (r = \overline{1,4}), \quad \tilde{a}_{s,j,k,l}, \quad \tilde{a}_{s,j,k,l}^*, \quad \tilde{\alpha}_{s,l}, \quad \tilde{\beta}_{s,l}, \quad \tilde{\gamma}_{s,l} \quad \text{і} \quad \tilde{V}_{s,l}, \quad \tilde{B}_{r,s,l} \quad (r = \overline{1,4}), \quad \tilde{a}_{s,j,k,l}, \quad \tilde{a}_{s,j,k,l}^*, \quad \tilde{\alpha}_{s,l}, \quad \tilde{\beta}_{s,l}, \quad \tilde{\gamma}_{s,l} \quad (s = \overline{1,p}, j = \overline{1,m}, \\ k = \overline{1,m}) - & \text{коефіцієнти при } l\text{-тих степенях } \varepsilon \text{ в розкладі відповідно функцій } \tilde{v}^2(\varphi_{*s}^* + \varepsilon \cdot \tilde{\phi}_s, \psi, \eta), \quad b_r(\varphi_{*s}^* + \varepsilon \cdot \tilde{\phi}_s, \\ \psi, \eta) \quad (r = \overline{1,4}), \quad \tilde{\alpha}_j(\varphi_{*s}^* + \varepsilon \cdot \tilde{\phi}_s, \psi, \eta, t), \quad \tilde{a}_{s,j,k,l}(\varphi_{*s}^* + \varepsilon \cdot \tilde{\phi}_s, \psi, \eta, t), \quad \tilde{a}_{s,j,k,l}^*(\varphi_{*s}^* + \varepsilon \cdot \tilde{\phi}_s, \psi, \eta, t), \quad \tilde{\beta}_j(\varphi_{*s}^* + \varepsilon \cdot \tilde{\phi}_s, \psi, \eta, t), \\ \tilde{\gamma}_j(\varphi_{*s}^* + \varepsilon \cdot \tilde{\phi}_s, \psi, \eta, t) \quad (s = \overline{0,p-1}, j = \overline{1,m}, k = \overline{1,m}) \quad \text{і} \quad \tilde{v}^2(\varphi_{*s}^* - \varepsilon \cdot \tilde{\phi}_s, \psi, \eta), \quad b_r(\varphi_{*s}^* - \varepsilon \cdot \tilde{\phi}_s, \psi, \eta) \quad (r = \overline{1,4}), \\ \tilde{a}_{s,j,k,l}(\varphi_{*s}^* - \varepsilon \cdot \tilde{\phi}_s, \psi, \eta, t), \quad \tilde{a}_{s,j,k,l}^*(\varphi_{*s}^* - \varepsilon \cdot \tilde{\phi}_s, \psi, \eta, t), \quad \tilde{\alpha}_j(\varphi_{*s}^* - \varepsilon \cdot \tilde{\phi}_s, \psi, \eta, t), \quad \tilde{\beta}_j(\varphi_{*s}^* - \varepsilon \cdot \tilde{\phi}_s, \psi, \eta, t), \quad \tilde{\gamma}_j(\varphi_{*s}^* - \\ - \varepsilon \cdot \tilde{\phi}_s, \psi, \eta, t) \quad (s = \overline{1,p}, j = \overline{1,m}, k = \overline{1,m}) \text{ у ряд Тейлора в околах } \varphi = \varphi_{*s}^* \quad (s = \overline{0,p}), \quad I(a,b) = \begin{cases} 1, & a \geq b, \\ 0, & a < b \end{cases}. \end{aligned}$$

**Висновки.** Сформовано просторову математичну модель процесу доочистки води від багатоконпонентної домішки у багатозарових швидких фільтрах з кусково-однорідними пористими завантаженнями. Вона враховує як масообмінні процеси між компонентами багатоконпонентної домішки у фільтраційній течії і адсорбованої на зернах завантаження, так і зворотній вплив концентрацій багатоконпонентної домішки на коефіцієнт активної пористості. Отримана модель дозволяє шляхом проведення комп'ютерних експериментів спрогнозувати оптимальні варіанти використання фільтрувальних матеріалів та збільшення тривалості фільтроциклу фільтрів за рахунок вибору їх форми і висоти шарів.

У алгоритмі числово-асимптотичного наближення розв'язку відповідної моделі задачі для фільтру, який має форму криволінійного паралелепіпеда, обмеженого двома еквіпотенціальними поверхнями і чотирма поверхнями течії та розділений деякими еквіпотенціальними поверхнями на кілька підобластей, отримано нового типу поправки, що характеризують механізм перерозподілу концентрацій багатоконпонентної домішки у фільтраційній течії і адсорбованої на зернах завантаження в околах ділянок розділу шарів.

**Список літератури:**

1. Орлов, В. О. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою [Текст] / В. О. Орлов. – Рівне: НУВГП, 2005. – 163 с.
2. Cheremisinoff, N. P. Handbook of water and wastewater treatment technologies [Text] / N. P. Cheremisinoff. – Boston: Butterworth-Heinemann, 2002. – 649 p. doi:10.1016/B978-075067498-0/50000-0
3. Hendricks, D. Fundamentals of water treatment unit processes: physical, chemical, and biological [Text] / D. W. Hendricks. – Boca Raton: CRC Press, 2010. – 417 p.
4. Quevauviller, Ph. Analytical methods for drinking water: advances in sampling and analysis [Text] / Ph. Quevauviller, K. C. Thompson. – John Wiley & Sons Ltd, 2006. – 188 p. doi:10.1002/0470094931
5. Бомба, А. Я. Математичне моделювання процесу аеробного очищення стічних вод в пористому середовищі [Текст] / А. Я. Бомба, А. П. Сафоник // Математичне та комп'ютерне моделювання. – 2011. – № 5. – С. 36–44.
6. Мельцер, В. З. Фильтровальные сооружения в коммунальном водоснабжении [Текст] / В. З. Мельцер. – Москва: Стройиздат, 1995. – 176 с.

7. Минц, Д. М. Теоретические основы технологии очистки воды [Текст] / Д. М. Минц. – Москва: Стройиздат, 1964. – 156 с.
8. Шехтман, Ю. М. Фильтрация малоконцентрированных суспензий [Текст] / Ю. М. Шехтман. – Москва: АН СССР, 1961. – 237 с.
9. Ives, K. J. Deep-bed water filters [Text] / K. J. Ives // New developments. – 1969. – Vol. 6, № 1. – P. 42–48.
10. Kalteh, A. M. Review of the self-organizing map (SOM) approach in water resources: Analysis, modelling and application [Text] / A. M. Kalteh, P. Hjorth, R. Berndtsson // Environmental Modelling & Software. – 2008. – Vol. 23, № 7. – P. 835–845. doi:10.1016/j.envsoft.2007.10.001
11. Maier, H. R. Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications [Text] / H. R. Maier, G. C. Dandy // Environmental Modelling & Software. – 2000. – Vol. 15, № 1. – P. 101–124. doi:10.1016/S1364-8152(99)00007-9
12. Heikkinen, M. Subtraction analysis based on self-organizing maps for an industrial wastewater treatment process [Text] / M. Heikkinen, T. Heikkinen, Y. Hiltunen, M. Liukkonen, H. Poutiainen // Mathematics and Computers in Simulation. – 2011. – Vol. 82, is. 3 – P. 450–459. doi:10.1016/j.matcom.2010.10.021
13. Бомба, А. Я. Числово-асимптотичне наближення розв'язків просторових модельних задач процесу фільтрування [Текст] / А. Я. Бомба, Ю. С. Климок, А. П. Сафоник, В. М. Сивак // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2010. – № 11. – С. 29–38.
14. Климок, Ю. С. Моделювання процесу доочистки води від залишкових катіонів алюмінію фільтруванням через аніоноактивні завантаження із врахуванням зміни фільтраційних властивостей середовища [Текст] / Ю. С. Климок, В. М. Сивак // Волинський математичний вісник. Серія прикладна математика. – 2010. – № 16, Т. 7. – С. 93–109.
15. Бомба, А. Я. Математичне моделювання просторових сингулярно-збурених процесів типу фільтрація-конвекція-дифузія [Текст]: монографія / А. Я. Бомба, Ю. С. Климок. – Рівне: Ассоль, 2014. – 273 с.
16. Пауз, Х. Механика жидкости [Текст] / Х. Пауз. – Москва: Стройиздат, 1967. – 392 с.

**Bibliography (transliterated):**

1. Orlov, V. O. (2005). Vodoochisni fil'tri iz zernistuju zasipkoju. Rivne: NUVGP, 163.
2. Cheremisinoff, N. P. (2002). Handbook of water and wastewater treatment technologies. Boston: Butterworth-Heinemann, 645. doi:10.1016/B978-075067498-0/50000-0
3. Hendricks, D. W. (2010). Fundamentals of water treatment unit processes : physical, chemical, and biological. Boca Raton: CRC Press, 417.
4. Quevauviller, Ph., Thompson, K. C. (2006). Analytical methods for drinking water: advances in sampling and

- analysis. John Wiley & Sons Ltd., 188. doi:[10.1002/0470094931](https://doi.org/10.1002/0470094931)
5. Bomba, A. Ja., Safonik, A. P. (2011). Matematichne modeljuvannja procesu aerobnogo ochishhennja stichnih vod v poristomu seredovishhi. Matematichne ta komp'juterne modeljuvannja, 5, 36–44.
  6. Mel'cer, V. Z. (1995). Fil'troval'nye sooruzhenija v kommunal'nom vodosnabzhenii. Moscow: Strojizdat, 176.
  7. Minc, D. M. (1964). Teoreticheskie osnovy tehnologii ochistki vody. Moscow: Strojizdat, 156.
  8. Shehtman, Ju. M. (1961). Fil'tracija malokoncentrirovannyh suspenzij. Moscow: AN SSSR, 212.
  9. Ives, K. J. (1969). Deep-bed water filters. New developments, 6 (1), 42–48.
  10. Kalthé, A. M., Hjorth, P., Berndtsson, R. (2008). Review of the self-organizing map (SOM) approach in water resources: Analysis, modelling and application. Environmental Modelling & Software, 23 (7), 835–845. doi:[10.1016/j.envsoft.2007.10.001](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.10.001)
  11. Maier, H. R., Dandy, G. C. (2000). Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications. Environmental Modelling & Software, 15 (1), 101–124. doi:[10.1016/s1364-8152\(99\)00007-9](https://doi.org/10.1016/s1364-8152(99)00007-9)
  12. Heikkinen, M., Heikkinen, T., Hiltunen, Y., Liukkonen, M., Poutiainen, H. (2011). Subtraction analysis based on self-organizing maps for an industrial wastewater treatment process. Mathematics and Computers in Simulation, 82 (3), 450–459. doi:[10.1016/j.matcom.2010.10.021](https://doi.org/10.1016/j.matcom.2010.10.021)
  13. Bomba, A. Ja., Klimjuk, Ju. Je., Safonik, A. P., Sivak, V. M. (2010). Chislovo-asimptotichne nablizhennja rozv'jazkiv prostоровih model'nih zadach procesu fil'truvannja. Fiziko-matematichne modeljuvannja ta informacijni tehnologii, 11, 29–38.
  14. Klimjuk, Ju. Je., Sivak, V. M. (2010). Modeljuvannja procesu doochistki vodi vid zalishkovih kationiv aljuminiju fil'truvannjam cherez anionoaktivni zavantazhennja iz vrahuvannjam zmini fil'tracijnih vlastivostej seredovishha. Volins'kij matematichnij visnik. Serija prikladna matematika, 7 (16), 93–109.
  15. Bomba, A. Ja., Klimjuk, Ju. Je. (2014). Matematichne modeljuvannja prostоровih singuljarno-zburenih procesiv tipu fil'tracija-konvekcija-difuzija. Rivne : Assol', 273.
  16. Rauz, H. (1967). Mehanika zhidkosti. Moscow: Strojizdat, 390.

Надійшла (received) 08.01.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Прогнозування оптимальних режимів роботи багатосарових швидких фільтрів з кусково-однорідними пористими завантаженнями/ Ю. Є. Климяк// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.122–131. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Прогнозирование оптимальных режимов работы многослойных скорых фильтров с кусочно-однородными пористыми нагрузками/ Ю. Е. Климяк// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.122–131. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Prediction of optimal modes of operation of multi-layers rapid filters with piecewise-homogeneous porous loads/ Ju. Je. Klimjuk//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P. 122–131. – Bibliogr.: 16.– ISSN 2079-5459.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Климяк Юрій Євгенійович** – кандидат технічних наук, Рівненський державний гуманітарний університет, доцент кафедри інформатики та прикладної математики, вул. Степана Бандери, 12, м. Рівне, Україна, 33028; e-mail: [klimyuk@ukr.net](mailto:klimyuk@ukr.net).

**Климяк Юрий Евгеньевич** – кандидат технических наук, Ровенский государственный гуманитарный университет, доцент кафедры информатики и прикладной математики, ул. Степана Бандеры, 12, г. Ровно, Украина, 33028; e-mail: [klimyuk@ukr.net](mailto:klimyuk@ukr.net).

**Klimjuk Jurij** – candidate of technical sciences, Rivne State University of Humanities, Associate Professor of the Department of Informatics and Applied Mathematics, Str. S. Bandery, 12, Rivne, Ukraine, 33028, e-mail: [klimyuk@ukr.net](mailto:klimyuk@ukr.net).

УДК 504.43

Е. Н. СЕРИКОВА, Е. А. СТРЕЛЬНИКОВА

## ИЗМЕНЕНИЕ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД В ГОРОДСКОЙ ЭКОСИСТЕМЕ Г. ХАРЬКОВА

В больших городах Украины, территории которых в значительной части подтоплена, практически нет систематических наблюдений за этим процессом, мониторинговая сеть скважин или не действует или разрушена. Целью данной работы является анализ изменения глубины залегания уровня грунтовых вод за последние 10 лет, сбор и анализ немногочисленных объективных данных об уровнях грунтовых вод в г. Харькове за период с 2004 по 2014 годы для объективного прогноза развития процесса подтопления в городе.

**Ключевые слова:** подтопление, уровень грунтовых вод, дополнительное питание грунтовых вод.

У великих містах України, території яких в значній частині підтоплені, практично немає систематичних спостережень за цим процесом, моніторингова мережа свердловин або не діє, або зруйнована. Метою даної роботи є аналіз зміни глибини залягання рівня ґрунтових вод за останні 10 років, збір та аналіз нечисленних об'єктивних даних про рівні ґрунтових вод в м. Харкові за період з 2004 по 2014 роки для об'єктивного прогнозу розвитку процесу підтоплення в місті.

**Ключові слова:** підтоплення, рівень ґрунтових вод, додаткове живлення ґрунтових вод.

In Ukraine generally and in Kharkov especially there are no permanent monitoring system for monitoring the groundwater regime, there are no uniform criteria for assessing the flooded lands and quantifying assessment the additional groundwater replenishment. Currently, most of the network of observation wells in Kharkov, founded in the 80s to control the groundwater levels has failed. The water supplying to Kharkov from underground sources has practically stopped and observing the groundwater levels is not performed. In these circumstances, the objective data of groundwater levels changes are extremely impoverished. Most of the existing – is fragmentary data on local construction sites with short observations series

The aim of this paper is to analyze the changes groundwater level depth during the last 10 years, the collection and analysis of the few objective data on the levels of groundwater in Kharkov in the period from 2004 to 2014 for the objective forecast of flooding process in the city.

**Keywords:** flooding, groundwater level, additional groundwater replenishment.

**Введение.** Грунтовые воды обладают известной восприимчивостью к любым антропогенным воздействиям, а изменения в их режиме и качественном состоянии приводят к изменениям различных компонентов природной среды. Одним из часто наблюдаемых воздействий является увеличение питания грунтовых вод, характерное для застроенных территорий, приводящее к подтоплению со всеми последующими негативными последствиями – от деградации коммуникаций, фундамента до ухудшения санитарных условий проживания населения [1, 2].

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Изучением динамики изменения уровней грунтовых вод и развитием процесса подтопления городских территорий занималось много ученых, в том числе Стрижельчик С. С., Шестопапов В. М., Чебанов А. Ю., Яковлев Е. А. и др., но вопросы комплексной оценки техногенного воздействия городской среды на изменение уровня грунтовых вод (УГВ) и прогнозирование его изменения на основе натурных исследований и построения математических моделей в специальной литературе не были достаточно проработаны [3–5].

В Украине в целом и в Харькове в частности отсутствует постоянная мониторинговая система контроля за режимом грунтовых вод. Поэтому прогнозирование развития процесса подтопления в связи с изменениями водохозяйственной деятельности на данных территориях значительно усложняется [6, 7].

**Цель исследования.** Целью данной работы является сбор и анализ немногочисленных объективных данных об УГВ в г. Харькове за период с 2004 по 2014 годы как базы для объективного прогноза развития процесса подтопления в городе.

В настоящее время большая часть сети наблюдательных скважин в г. Харькове, созданная в 80-е годы для контроля УГВ вышла из строя. Водоснабжение города Харькова из подземных источников практически прекратилось и наблюдения за уровнями подземных вод не производится. В этих условиях объективные данные об изменении уровней грунтовых вод

крайне оскудели. Большая часть из имеющихся – это отрывочные данные на локальных объектах строительства с короткими рядами наблюдений [3, 8].

**Материалы и методы исследований.** Автор Серикова Е.Н. выполняла самостоятельные измерения УГВ, а также принимала участие в качестве рабочего наблюдателя Геологической партии в работе с 3-мя режимными водопунктами г. Харькова. Измерения УГВ в специально оборудованных и приспособленных для этого скважинах проводились с помощью уровнемера ГРУ-100 с периодичностью 1 раз в месяц на протяжении 2004–2014 гг.

Статистическая обработка данных выполнена общепринятыми методами, с определением максимальных, минимальных и средних значений уровней, стандартных отклонений, коэффициентов вариаций по каждому ряду наблюдений [9].

Теоретический анализ полученных данных способствовал пониманию общей ситуации с развитием подтопления городской территории, выявлению локальных факторов воздействия на изменение УГВ. Расположение постов наблюдений УГВ показаны на рис. 1.

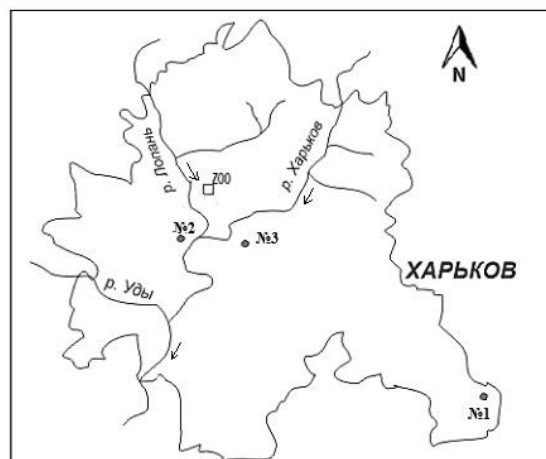


Рис. 1 – Расположение постов наблюдений УГВ

© Е. Н. Серикова, Е. А. Стрельникова. 2016

Точки №1–3 – три режимных водопункта г. Харькова, в которых проводились измерения УГВ.

**Результаты измерения УГВ в 3-х режимных водопунктах г. Харькова. Точка №1** – скважины, оборудованные на первый от поверхности плиоцен-межигорский водоносный горизонт на водозаборе ООО "Пивзавод "Рогань". Координаты: 49,9077 СШ; 36,4286 ВД. Абсолютная отметка устья скважины – 170м.

Данные по изменению УГВ в скв №1-6 и количеству осадков [10] за 2004г. приведены на рис. 2.

В скважинах №1-6 Пивзавода «Рогань» в период прекращения водозабора с апреля по октябрь наблю-

дается резкий подъем УГВ.

**Точка №2** – скважина, оборудованная на аллювиальный четвертичный водоносный горизонт по ул. Краснооктябрьская Координаты: 49,9325 СШ; 36,3741 ВД. Абсолютная отметка устья скважины 171м.

Измерения глубины залегания уровня грунтовых вод в данной скважине производились ежемесячно в период с 2004 г. по 2014 г. Результаты представлены на рис. 3. Ниже, на рис 4 приведено сопоставление средних значений УГВ и количества выпавших осадков за каждый год в период с 2004 г. по 2014 г.

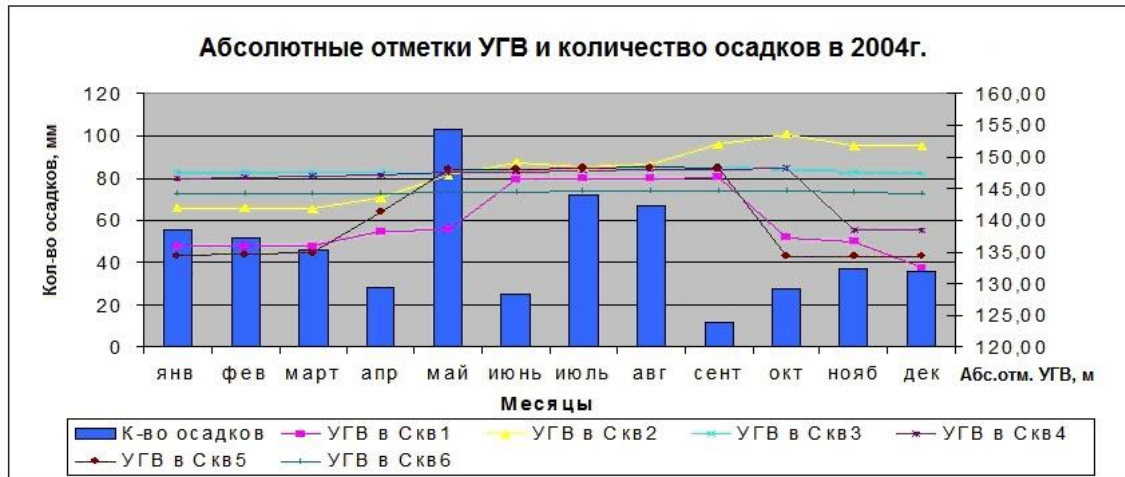


Рис. 2. Изменение УГВ в скважинах №1-6 в 2004г. УГВ показан в абсолютных от метках

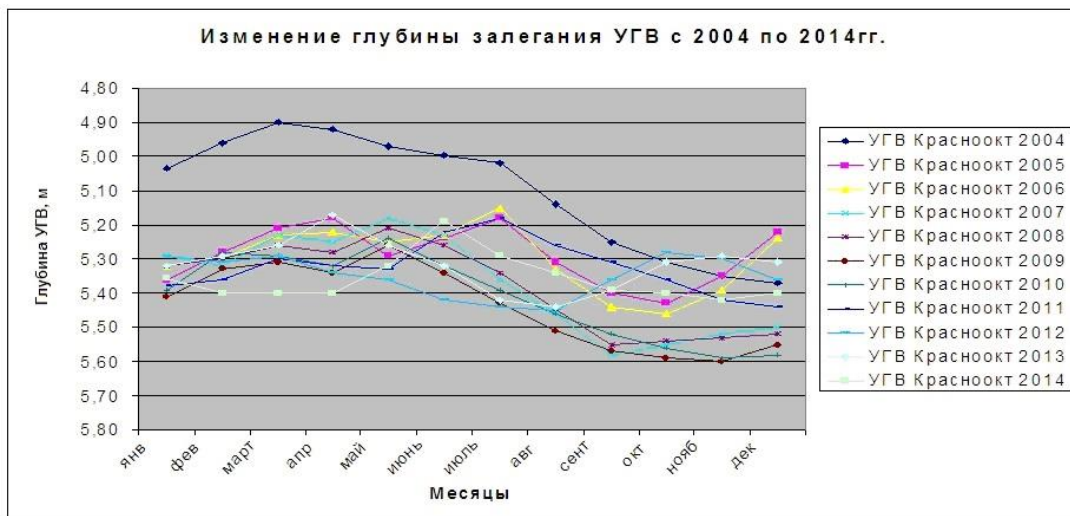


Рис. 3 – Изменения глубины залегания УГВ в скважине по ул.Краснооктябрьской.

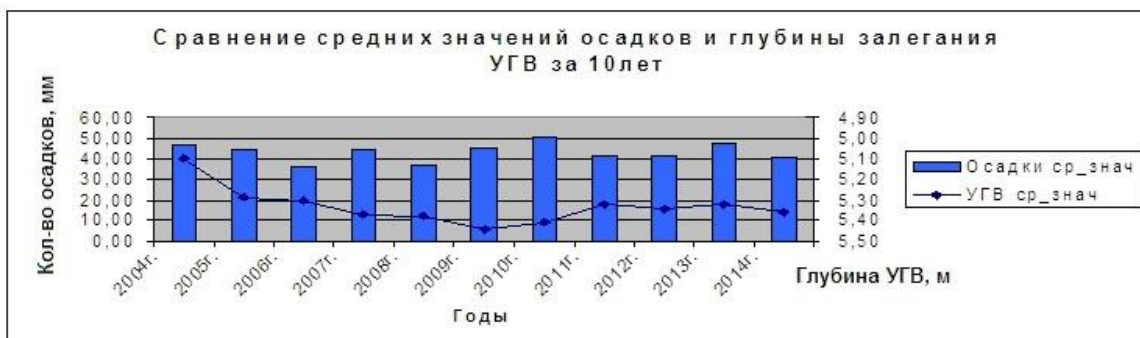


Рис. 4 – Средние значения уровней грунтовых вод в скважине по улице Краснооктябрьская и среднемесячные по году количества выпавших осадков [10] за каждый год в период с 2004 г. по 2014 г.



Как видно из графика, среднее значение УГВ положительно коррелировало с изменением атмосферных осадков за исключением периода с 2006 по 2011 годы.

**Точка № 3** – скважина, оборудованная на аллювиальный четвертичный водоносный горизонт, г. Харьков, ул. А. Невского. Координаты: 49,9736 СШ; 36,2466 ВД. Абсолютная отметка устья скважины 108м.

Измерения глубины залегания уровня грунтовых вод в данной скважине проходили ежемесячно в период с 2004г. по 2014г. Результаты приведены на рис. 5.

На рис 6 приведено сопоставление средних значений УГВ и количества выпавших осадков за каждый год в период с 2004 г. по 2014 г.

На протяжении всего периода исследований УГВ положительно коррелировал с изменением атмосферных осадков. Исключением стал период с сентября по декабрь 2014 г. При незначительном количестве осадков за этот период, УГВ повысился на 16 см. Результаты измерений приведены на рис. 7.

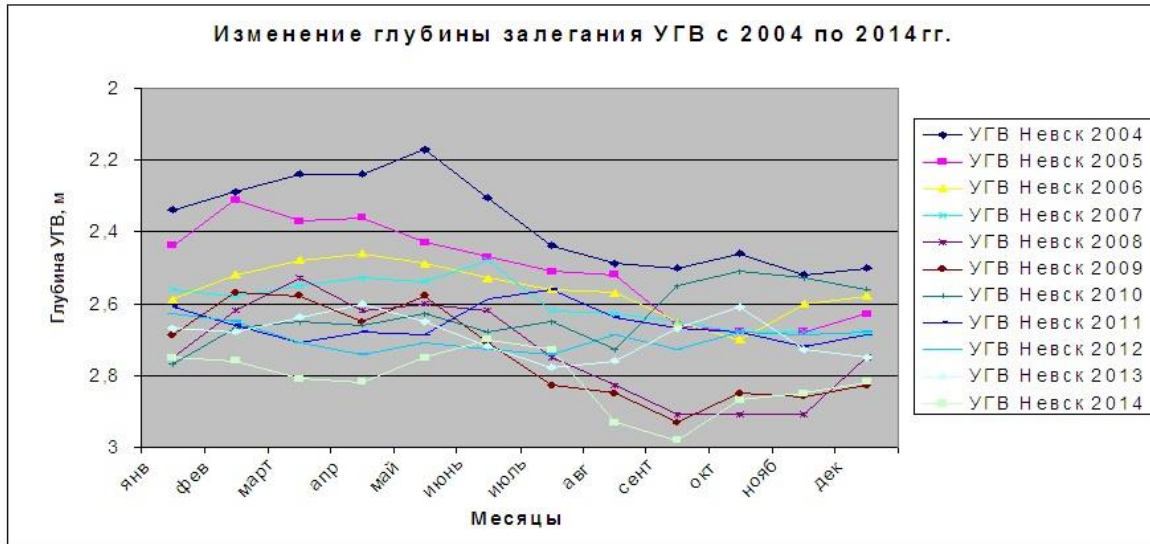


Рис. 5 – Измерения глубины залегания УГВ в скважине по ул. А.Невского.



Рис. 6 – Средние значения и количества выпавших осадков в скважине по улице Невского [10] за каждый год в период с 2004г. по 2014г.



Рис. 7 – Результаты измерений глубины залегания УГВ в 2014г. в скважине по ул. Невского

Колебания глубины залегания УГВ обусловлены режимом атмосферных осадков и изменением уровня воды в водоемах [11]. Максимальная глубина залегания в точке №1 в скважинах 1–6 наблюдается в пери-

од с августа по октябрь 2004г. Минимальная глубина залегания наблюдается с октября по декабрь 2004г. Пик подъема грунтовых вод (подъем УГВ от 30 см до 14 м) пришелся на период прекращения водоотбора из

эксплуатационных скважин. Засушливый период с августа по октябрь обусловил максимальные глубины УГВ в это время.

**Обсуждение результатов измерений УГВ в 3-х режимных водопунктах г. Харькова.** При сравнении тенденций изменения количества осадков и УГВ в точках №2 и №3 за 2004-2014гг., было выявлено:

1. В скважине по ул. Краснооктябрьская в период 2004-2009гг. прослеживается снижение УГВ на 35 см, а в период 2009-2014гг. повышение – на 10 см. При этом среднегодовое количество осадков оставалось стабильным. Это может указывать на влияние техногенных факторов. В тоже время внутригодовые (сезонные) амплитуды колебания уровней были значительно большими. Их характер – с минимальными

глубинами уровней с марта по май однозначно указывает на природный фактор – повышенное питание грунтовых вод в период снеготаяния. Такой же характер режима грунтовых вод наблюдался и в скважине по ул. Невского, с той разницей, что в период 2009-2014 годов уровни не существенно повышались.

2. Повышение уровня грунтовых вод на 20 см на фоне снижения количества осадков на участке по ул. Невского может иметь техногенную природу – например, может быть вызвано с потерями воды из подземных коммуникаций.

Статистическая обработка данных измерений изменения глубины УГВ выполнена методом вариационной статистики, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Стандартное отклонение и коэффициент вариации по каждому ряду наблюдений за УГВ

Название точки, год	Среднее значение	Станд. Откл.	Коеф. вар, %
УГВ Красноокт 2004	5,10	0,174	3
УГВ Красноокт 2005	5,29	0,085	2
УГВ Красноокт 2006	5,30	0,095	2
УГВ Красноокт 2007	5,37	0,142	3
УГВ Красноокт 2008	5,38	0,128	2
УГВ Красноокт 2009	5,44	0,122	2
УГВ Красноокт 2010	5,41	0,126	2
УГВ Красноокт 2011	5,32	0,077	1
УГВ Красноокт 2012	5,35	0,06	1
УГВ Красноокт 2013	5,32	0,074	1
УГВ Красноокт 2014	5,36	0,066	1
УГВ Невск 2004	2,37	0,124	5
УГВ Невск 2005	2,51	0,131	5
УГВ Невск 2006	2,56	0,070	3
УГВ Невск 2007	2,60	0,069	3
УГВ Невск 2008	2,73	0,135	5
УГВ Невск 2009	2,74	0,129	5
УГВ Невск 2010	2,63	0,080	3
УГВ Невск 2011	2,66	0,049	2
УГВ Невск 2012	2,70	0,035	1
УГВ Невск 2013	2,69	0,059	2
УГВ Невск 2014	2,81	0,083	3
УГВ Рогань Скв1 2004	139,79	5,268	4
УГВ Рогань Скв2 2004	147,65	4,366	3
УГВ Рогань Скв3 2004	147,82	0,327	0,2
УГВ Рогань Скв4 2004	145,94	3,573	2
УГВ Рогань Скв5 2004	140,75	6,839	5
УГВ Рогань Скв6 2004	144,45	0,139	0,1

Изучаемые совокупности можно считать однородными, так как коэффициент вариации не превышает 5 % [9].

**Выводы.** На протяжении всего периода исследований (2004–2014гг.) уровень грунтовых вод в 3-х водопунктах г. Харькова положительно коррелировал с изменением атмосферных осадков.

При этом, влияние осадков на уровень грунтовых вод наиболее отчетливо проявляется с января по сентябрь. В эти периоды маскируется техногенное влияние на изменение уровня грунтовых вод.

Однако, техногенное влияние все же проявляется в многолетнем изменении уровней грунтовых вод при практически стабильной картине годовых сумм атмосферных осадков, а также в незакономерном подъеме

уровня в периоды уменьшения интенсивности выпадения осадков.

Отбор воды из неглубоких водоносных горизонтов существенно влияет на положение зеркала грунтовых вод, по крайней мере, в ближайшем окружении этих водозаборов.

В целом, анализ имеющихся немногочисленных данных показывает, что в последнее десятилетие в г. Харькове систематического подъема уровня грунтовых вод не происходит. При наличии значительного дополнительного питания, установленного для города другими исследователями, такое состояние подземной гидросферы можно пояснить достижением равновесия между этим дополнительным питанием с одной стороны и увеличением эвапотранспирации - с другой стороны.

## Список литературы:

1. Свіренко, Л. П. Підземні води урбанізованих територій та пов'язані з ними проблеми [Текст] / Л. П. Свіренко, О. І. Спирін, В. В. Яковлев // Архітектура і технічні науки. – 2002. – № 36. – С. 186–190.
2. Яковлев, В. В. К вопросу качества воды родников, формирующихся в городской экосистеме г. Харькова [Текст] / В. В. Яковлев, А. В. Чистикова, Ю. Ю. Выставная, С. А. Мацюк, Е. А. Горикова // Научный вестник строительства ХДУБА. – 2015. – № 2 (80). – С. 190–199.
3. Стригельчик, Г. Г. Подтопление в населенных пунктах Харьковской области [Текст] / Г. Г. Стригельчик, Ю. П. Соколов, И. А. Гольдфельд, А. Ю. Чебанов, Н. С. Николенко. – Харьков, 2003. – 160 с.
4. Чебанов, А. Ю. Поиск эффективных решений проблемы подтопления городов [Текст] / А. Ю. Чебанов // Коммунальное хозяйство городов. – 2002. – № 47. – С. 133–138.
5. Шестопалов, В. М. Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Методы изучения водообмена [Текст] / В. М. Шестопалов, Е. А. Яковлев, А. Б. Ситников, В. И. Лялько и др. – Киев: Наукова думка, 1988. – 272 с.
6. Серикова, Е. Н. Математическое моделирование повышения уровня грунтовых вод под воздействием дополнительной инфильтрации [Текст] / Е. Н. Серикова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 6/4 (60). – С. 26–33. – Режим доступа: \www/URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/5679/5109>
7. Стрельникова, Е. А. Изучение особенностей изменения уровня грунтовых вод с помощью математического моделирования [Текст] / Е. А. Стрельникова, Е. Н. Серикова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – 3(4(63)). – С. 31–35. – Режим доступа: \www/URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/14760/12561>
8. Serikova, E. The Programme of Measures to Prevent Flooding on the Built-up Areas on Example of Kharkiv City [Text] / E. Serikova, E. Strelnikova, V. Yakovlev // International Journal of Development Research. – 2015. – Vol. 5, № 12. – P. 6236–6240.
9. Чернова, Н. И. Математическая статистика [Текст]: учеб. пос. / Н. И. Чернова. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2007. – 148 с.
10. Climate Kharkiv. Climate data: 1936 – 2016 [Electronic resource] / TuTiempo. – Available at: \www/URL: <http://en.tutiempo.net/climate/ws-343000.html>
11. Двинских, С. А. Экология лесопарковой зоны города [Текст] / С. А. Двинских, Н. Г. Максимович, К. И. Малеев, О. В. Ларченко. – Санкт-Петербург: Наука, 2011. – 154 с.

## Bibliography (transliterated):

1. Svirenko, L., Spirin, O., Yakovlev, V. (2002). Pidzemni Vody urbanizovanih teritoriy ta pov'yazani z nymy problem. Arhitektura i tehnichekie nauki, 36, 186–190.
2. Iakovlev, V. V., Chistikova, A. V., Vystavnaia, Iu. Iu., Matsiuk, S. A., Gorshkova, E. A. (2015). K voprosu kachestva vody rodnikov, formiruuiushchihsia v gorodskoi ekosisteme g. Har'kova. Nauchnyi vestnik stroitel'stva HDUBA, 2 (80), 190–199.
3. Strigelchik, G., Sokolov, Y., Goldfeld, I., Chebanov, A., Nikolenko, N. (2003). Podtoplenie v naselelennih punktah Kharkovskoi oblasti. Kharkiv, 160.
4. Chebanov, A. Iu. (2002). Poisk effektivnyh reshenii problemy podtopleniia g orodov. Kommunal'noe hoziaistvo gorodov, 47, 133–138.
5. Shestopalov, V. M., Iakovlev, E. A., Sitnikov, A. B., Lial'ko, V. I. et al. (1988). Vodoobmen v gidrogeologicheskikh strukturah Ukrainy. Metody izucheniia vodoobmena. Kyiv: Naukova dumka, 272.
6. Sierikova, E. (2012). Mathematical modeling of the groundwater level rising under the influence of additional infiltration. Eastern-European Journal of Enterprise technologies, 6(4(60)), 26–33. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/5679/5109>
7. Strel'nikova, E., Serikova, E. (2013). Study of characteristics of groundwater level changing via the mathematical modeling. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 3(4(63)), 31–35. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/14760/12561>
8. Serikova, E., Strelnikova, E., Yakovlev, V. (2015). The Programme of Measures to Prevent Flooding on the Built-up Areas on Example of Kharkiv City. International Journal of Development Research, 5 (12), 6236–6240.
9. Chernova, N. I. (2007). Matematicheskaiia statistika. Novosibirsk: Novosibirsk State University, 148.
10. Climate Kharkiv. Climate data: 1936 – 2016. TuTiempo. Available at: <http://en.tutiempo.net/climate/ws-343000.html>
11. Dvinskih, S., Maksimovich, N., Maleev, K., Larchenko, O. (2011). Ecologia lesoparkovoy zony goroda. Sait Petersburg: Nauka, 154.

Поступила (received) 08.01.2016

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Изменение уровня грунтовых вод в городской экосистеме г. Харькова/ Е. Н. Серикова, Е. А. Стрельникова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.132–137. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Зміна рівня ґрунтових вод в міській екосистемі м. Харкова/ О. М. Сєрікова, О. О. Стрельникова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.132–137. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Groundwater Level Changing in the Urban Kharkov Ecosystem/ E. Serikova, E. Strelnikova//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P. 132–137. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459.**

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Серикова Елена Николаевна** – инженер по охране окружающей среды, Эксплуатационно-технический отдел, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046. e-mail: [elena.kharkov@mail.ru](mailto:elena.kharkov@mail.ru)

**Сєрікова Олена Миколаївна** – інженер з охорони навколишнього середовища, експлуатаційно-технічний відділ, [Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України](http://www.khpi.edu.ua) вул. Пожарського, 2/10, м. Харків, Україна, 61046. e-mail: : [elena.kharkov@mail.ru](mailto:elena.kharkov@mail.ru)

**Serikova Elena** – environmental engineer, technical department, A.M. Pidhorny Institute for Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine, vul. Pozharskoho, 2/10, Kharkiv, Ukraine 61046. e-mail: : [elena.kharkov@mail.ru](mailto:elena.kharkov@mail.ru)

**Стрельникова Елена Александровна** – Доктор технических наук, Ведущий научный сотрудник по специальности механика деформируемого твердого тела, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046. e-mail: [elena15@gmx.com](mailto:elena15@gmx.com).

**Стрельникова Елена Александровна** – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник зі спеціальності механіка деформованого твердого тіла, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України вул. Пожарського, 2/10, м. Харків, Україна, 61046. e-mail: [elena15@gmx.com](mailto:elena15@gmx.com).

**Strelnikova Elena** – Doctor of Technical Sciences, Leading researcher in the specialty Fracture Mechanics, A.M. Pidhorny Institute for Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine, vul. Pozharskoho, 2/10, Kharkiv, Ukraine 61046. e-mail: [elena15@gmx.com](mailto:elena15@gmx.com).

УДК 622.7

**А. А. ШКОП, М. А. ЦЕЙТЛИН, А. В. ШЕСТОПАЛОВ**

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОСЕДАНИЯ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Исследована кинетика оседания проб шлама различной концентрации и дисперсного состава. Определено, что скорость осаждения частиц твердой фазы шлама снижается при повышении ее концентрации и увеличении доли мелкодисперсной фракции. Присутствие фракции размером более 40 мкм в шламе снижает расход флокулянта в несколько раз и интенсифицирует процесс флокулообразования. Установлено, что для достижения одинаковых скоростей оседания для различных по дисперсному составу или концентрации твердой фазы суспензий требуется разное количество флокулянта. Наилучшие результаты по флокуляции с минимальным расходом полимера получены при более низких концентрациях твердой фазы.

**Ключевые слова:** флокуляция, полидисперсные шламы, дисперсный состав, экономия флокулянта, скорость осаждения, интенсификация.

Досліджено кінетику осідання проб шламу різної концентрації і дисперсного складу. Визначено, що швидкість осідання часток твердої фази шламу знижується при підвищенні їх концентрації і збільшенні вмісту дрібнодисперсної фракції. Присутність фракції розміром більше 40 мкм в шламі знижує витрату флокулянта у декілька разів і інтенсифікує процес флокулоутворення. Встановлено, що для досягнення однакових швидкостей осідання для різних за дисперсним складом або концентрацією твердої фази суспензій потрібна різна кількість флокулянта. Найкращі результати з флокуляції з мінімальною витратою полімеру отримані при нижчих концентраціях твердої фази.

**Ключові слова:** флокуляція, полідисперсні шлами, дисперсний склад, економія флокулянта, швидкість осадження, інтенсифікація.

The article deals with the problems of flocculation intensification of coal sludge polydisperse suspensions. The sedimentation kinetics of sludge samples with different concentration and composition of the fine fractions are investigated. It is determined that the deposition rate of solid phase of sludge particles is reduced by increasing its concentration and increasing the proportion of finely-divided particles in the process of sedimentation and with the use of flocculants. It is established that different amount of flocculant is necessary to achieve the same sedimentation rate for suspensions with various particulate composition or concentration of the solid phase. It is found that polymer consumption increases with increase of solid phase concentration. The presence of the fraction larger than 40 microns in the sludge reduces flocculant consumption several times and intensifies the formation of large aggregates. The best results for flocculation with minimal polymer consumption are obtained with lower concentrations of solid phase. It is shown that the promising areas for intensification of flocculation process and reducing the polymer consumption are sludge adjustment in concentration and disperse composition by dilution to the optimum concentration of solid phase or addition of the fraction larger than 40 microns.

**Keywords:** flocculation, polydisperse sludge, disperse composition, flocculant savings, deposition rate, intensification.

### Введение

В результате интенсивной промышленной деятельности на многих предприятиях химической отрасли Украины накопилось огромное количество отходов, в частности шламов. Последние на протяжении длительного времени складываются в открытых шламонакопителях. В отдельных отраслях промышленности накоплено такое огромное количество промышленных отходов, что вопросы их хранения и последующей утилизации превратились в серьезные экономические и экологические проблемы.

Твердая фаза шламов углеобогатительных фабрик часто является ценным минеральным сырьем, а жидкую фазу целесообразно использовать в замкнутой системе оборотного водоснабжения. Многими странами (включая Украину) уже разработаны и внедрены локальные системы очистки химически загрязненных сточных вод с целью создания замкнутой системы водно-шламового хозяйства [1]. Современные технологические схемы включают различные методы очистки образованных на производстве сточных вод от взвешенных частиц и использования основных объемов очищенных вод в производственных нуждах.

В результате сгущения и осветления шламов в радиальных сгустителях и отстойниках различных конструкций получают оборотную воду и сгущенный продукт, направляемый на переработку или в шламонакопитель. От качества разделения суспензии в сгустителе зависят эффективность операций обогащения и снижение потерь воды фабрики. Поэтому замкнутый цикл, применяемый в углеобогатении, представляет особые требования к качеству разделения твердой и жидкой фаз в сгустителе [2].

В сложившейся практике частицы крупностью более 50 мкм в основном улавливаются в гравитационных отстойниках без использования реагентов, а частицы 10 – 50 мкм – в аналогичных аппаратах с использованием реагентов. Для обезвоживания полидисперсных суспензий крупностью до 0,5 мм используются дисковые вакуум-фильтры, камерные и ленточные фильтр-прессы, центрифуги и другое оборудование [3]. На всех этапах сгущения и обезвоживания проводится интенсификация процессов за счет использования значительного количества полимерных флокулянтов общим расходом 350 – 500 г/т и более.

© А. А. Шкоп, М. А. Цейтлин, А. В. Шестопапов. 2016

Поэтому одним из важных аспектов улучшения экономических показателей процесса сгущения является снижение расхода дорогостоящего флокулянта, используемого для интенсификации процесса осветления воды.

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Явление агрегации твердой фазы высокодисперсных суспензий с применением полимерных флокулянтов широко используется в практике очистки сточных вод природного [4] и промышленного происхождения [5], в том числе и шламов и илов углеобогажительных фабрик [6].

Практика очистки шламов с использованием флокулянтов сводится к подбору нужного вида полимера (неионогенного или ионогенного) и его дозировки для получения требуемого эффекта.

Согласно теоретическим представлениям [7] процесс флокуляции проходит в две стадии: адсорбция флокулянта на поверхности частиц и образования флокул, которые отличаются по своей природе и требуют различных условий смешения и интенсификации процесса. Кинетика адсорбции флокулянта определяется [8] временем диффузии макромолекул к поверхности частиц (от нескольких десятков секунд до нескольких минут) и как время достижения равновесного состояния адсорбированных макромолекул флокулянта на частицах. Время диффузии флокулянта к частице зависит от концентрации твердой фазы в обрабатываемых водах, продолжительности и интенсивности перемешивания, вязкости жидкой фазы, концентрации и молекулярной массы флокулянта, температуры, pH и др. Так, например, авторами [9] установлено, что с увеличением расхода анионоактивного флокулянта от 25 до 250 г/т предельное динамическое напряжение сдвига, характеризующее прочность агрегатов, для флокуляционных структур угольных частиц возрастает от 0,5 до 3,0 Па [9].

Многообразие факторов, влияющих на процесс флокуляции, приводит к увеличению его дозировки, вместо оптимизации самого процесса, например, стадий адсорбции полимера на поверхности частиц и образования прочных агрегатов. Как отмечается в [10] до настоящего времени не решена задача оптимизации расхода флокулянтов и нет четко разработанных принципов управления процессом флокуляции.

Таким образом, проведение экспериментальных исследований процесса флокуляции полидисперсных суспензий позволит обосновать способы управления процессом флокуляции и создать предпосылки для решения задачи по оптимизации расхода флокулянтов.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является изучение кинетики оседания твердой фазы шламов полидисперсного состава.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследование кинетики оседания твердой фазы угольного шлама различного дисперсного состава и концентрации в поле гравитационных сил без применения флокулянтов.

2. Исследование кинетики оседания твердой фазы шлама различного дисперсного состава и концентрации с применением флокулянта.

3. Изучение зависимости расхода флокулянта от концентрации и состава шлама для достижения определенного значения скорости осветления суспензии.

4. Поиск путей интенсификации процесса агрегатообразования с целью снижения расхода флокулянта.

**Материалы и методы исследования кинетики твердой фазы полидисперсных суспензий.** Для лабораторных исследований кинетики осаждения твердой фазы полидисперсных суспензий на одной из углеобогажительных фабрик были отобраны образцы шламов различного дисперсного состава. Использовались два образца шламовых вод: образец № 1 – шламовые воды от обмыва лент транспортеров после транспортировки размокшей породы в бункеры сбора породы с содержанием твердого  $C = 121,86$  г/л; образец № 2 – сгущенный продукт последней батареи гидроциклонов водношламовой схемы обогащения фабрики с содержанием твердого  $C = 128,49$  г/л.

Для каждого из образцов определяли гранулометрический состав и распределение массы шлама по классам с использованием виброанализатора ВА-В01 по методике ГОСТ 27707.

Каждый из образцов был разделен на три части и каждая часть пробы методом разбавления была доведена до концентраций твердой фазы 60, 70 и 80 г/л соответственно.

Были проведены следующие исследования:

1) определение кинетики осаждения твердой фазы для образцов №1 и №2 при  $C = 60$  г/л,  $C = 70$  г/л  $C = 80$  г/л без каких либо воздействий на пробы (отстаивание);

2) определение кинетики осаждения твердого для образцов №1 и №2 при  $C=60$  г/л,  $C=70$  г/л  $C=80$  г/л с последующем введением анионоактивного флокулянта Ecolfloc A-19 различной дозировки.

Процесс осаждения в естественных условиях (без добавления флокулянта) проводили в мерных цилиндрах объемом 500 мл в течении двух часов с регистрацией уровня осветленной жидкости каждые 10 минут.

При исследовании кинетики осаждения с флокуляцией шлам взмучивали, дозировали флокулянт, плотно закрывали и перемешивали двенадцатикратным опрокидыванием мерного цилиндра. Для каждого образца шлама дозировку флокулянта пересчитывали на его массовый расход (в граммах) на единицу массы твердой фазы (в тоннах). Скорость осаждения флокул после агрегатообразования определяли в зоне свободного осаждения, которая соответствовала верхней трети высоты цилиндра.

**Результаты исследования кинетики осаждения твердой фазы полидисперсных суспензий.** Гранулометрический состав твердой фазы образцов шлама обогатительной фабрики и зольность каждого класса представлены на рис. 1. Из рисунка видно, что образец шлама №1 более чем на 90 % состоит из мелкодисперсных частиц твердой фазы (класс менее 40 мкм), отличающийся высокой зольностью (преимущественно глинистые частицы). Образец шлама №2 содержит 22 % частиц твердой фазы размером более 40 мкм.



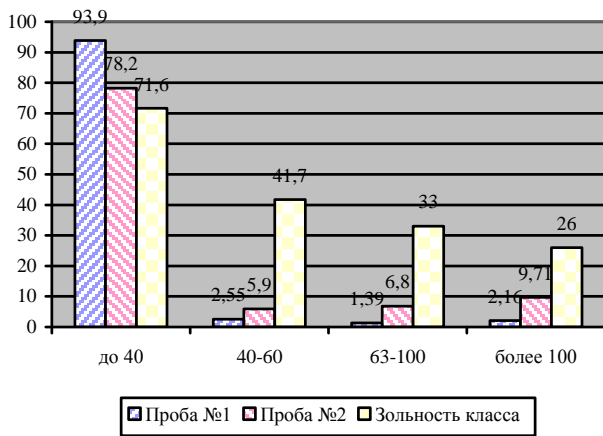


Рис. 1 – Гранулометрический состав твердой фазы образцов, %: проба №1 – смыв с лент породных конвейеров (зольность  $\approx 80\%$ , pH=7,3), проба №2 – сгущенный шлам схемы обогащения фабрики (зольность  $\approx 72\%$ , pH=6,91)

Исследование кинетики осаждения в поле гравитационных сил (рис. 2) показало, что скорость оседания твердых частиц шлама при различных исходных концентрациях обоих образцов уменьшилась с ростом концентрации твердой фазы, что соответствует классическим представлениям о стесненном осаждении.

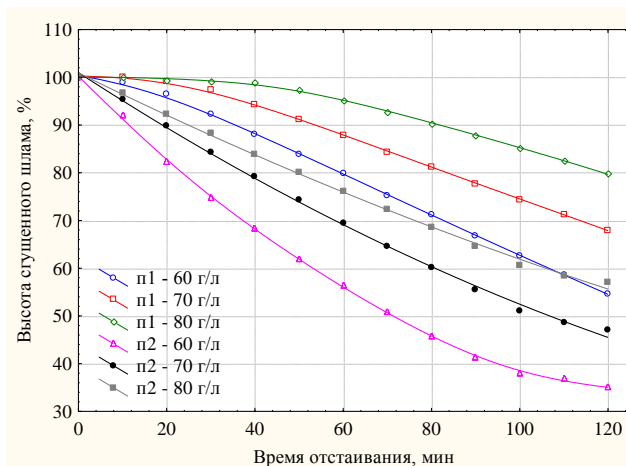


Рис. 2 – Кинетика осаждения образцов шлама: п1 – проба шлама №1; п2 – проба шлама №2.

Анализ данных для проб шлама №1 и №2 показывает также, что скорость осаждения частиц шлама зависит от дисперсного состава. Чем меньше частицы дисперсной фазы (проба №1), тем меньше их скорость осаждения, что также соответствует классическим представлениям теории осаждения и описывается уравнением

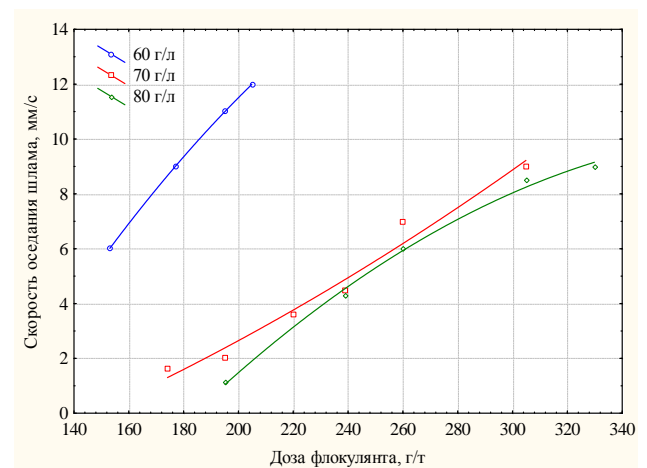
$$v = \frac{2g(\rho_T - \rho_P)}{9\mu} R^2, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость седиментации;  $\mu$  – вязкость дисперсной среды;  $g = 9,81\text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

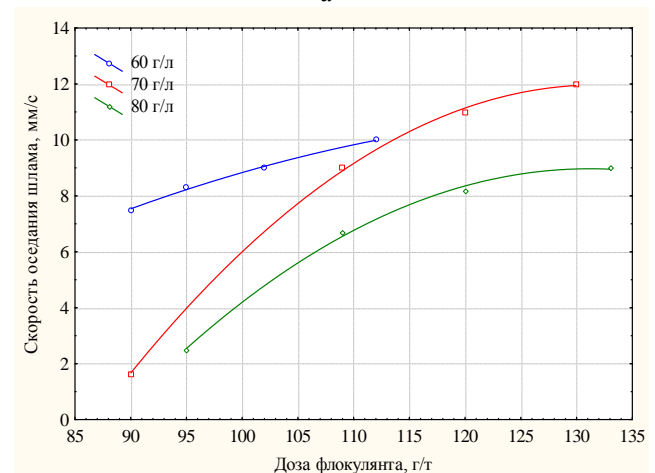
Из уравнения (1) вытекает, что с уменьшением размера частиц и приближением их к ультратонкой

фракции увеличивается влияние вязкости и плотности дисперсной фазы, а с ними и факторов устойчивости дисперсной системы. И наоборот, при увеличении размера частиц скорость седиментации приблизительно равняется  $R^2$ . Именно поэтому чаще всего интенсификация процесса осаждения полидисперсных суспензий, которые содержат тонкие фракции, осуществляется путем агрегации мелкодисперсных частиц, например, с помощью флокулянтов. В процессе образования флокул происходит усреднение размера агрегатов, так как основная их масса (около 90 %) имеет приблизительно одинаковые размеры. Это позволяет превратить полидисперсную систему в монодисперсную и путем использования флокулянтов добиться одинаковой скорости осаждения различных по составу и концентрации суспензий.

Исследование процесса осаждения полидисперсных суспензий образцов шлама №1 и №2 с применением флокулянта представлено на рис. 3а и 3б.



а



б

Рис. 3 – Зависимость скорости осаждения флокул от дозы флокулянта для образцов шлама: а – проба шлама №1; б – проба шлама №2.

На них показана зависимость скорости оседания от концентрации флокулянта. С ростом концентрации флокулянта возрастает скорость оседания флокул, что говорит об их укрупнении (образовании флокул 2-го порядка). В то же время можно видеть, что расход флокулянта на единицу массы твердой фазы зависит

как от дисперсного состава шлама, так и от его концентрации.

Возрастание доли фракции твердой фазы размером менее 40 мкм требует большего расхода флокулянта, чем для осаждения суспензии с той же скоростью такой же концентрации, содержащей большую долю фракции +40 мкм.

Очевидно, это явление объясняется большей площадью поверхности раздела фаз мелкодисперсного шлама, требующей большего количества флокулянта для адсорбции на поверхности частиц. Кроме того, образовавшиеся агрегаты флокул мелкодисперсного шлама имеют меньшие размеры и для дальнейшего укрупнения до размеров, обладающих большей скоростью оседания (образования флокул 2-го порядка), требуется дополнительная доза полимера.

**Обсуждение результатов исследования кинетики осаждения твердой фазы полидисперсных суспензий.** Сравнительная характеристика количества флокулянта, необходимого для достижения одной и той же скорости (9 мм/с), а следовательно, и одинакового размера агрегатов, наглядно представлена на рис. 4.

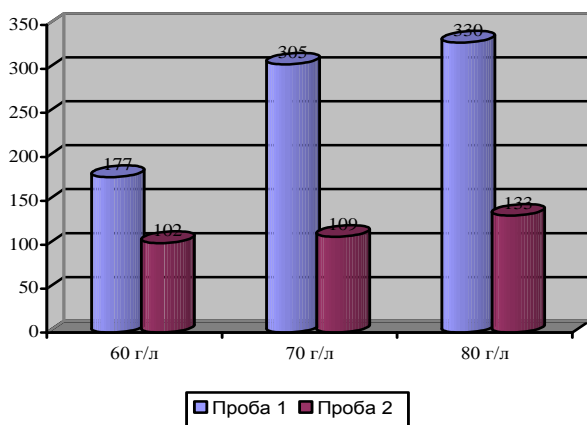


Рис. 4 – Сравнительная характеристика расхода флокулянта (г/т) для образцов шлама №1 и №2, необходимого для достижения скорости 9 мм/с

Анализ представленных на рис. 4 данных показывает, что для образования флокул с одинаковой скоростью оседания расход флокулянта для проб №1 и №2 может отличаться в 3 раза (например,  $C = 70$  г/л, средний столбец рис. 4), хотя доля фракции более 40 мкм в образцах шлама отличается всего на 15 % (согласно рис. 1). Такая непропорциональная зависимость может свидетельствовать о различии не только в размере флокул, но и структур агрегатов, образованных различными фракциями. Вероятно, более крупная фракция (более 40 мкм) активнее образует крупные агрегаты без дополнительного расхода флокулянта, выступая флокулообразователем и активно агрегируя мелкие частицы на своей поверхности.

Интерес вызывает тот факт, что с ростом концентрации твердой фазы одного и того же по дисперсному составу шлама (проба №1 или проба №2) так же увеличивается расход флокулянта в 1,5-2 раза для пробы №1 и примерно в 1,3 раза для пробы №2. Вероятно, при высокой концентрации твердой фазы процесс диффузии полимера в объеме затруднен и ад-

сорбция флокулянта на поверхности твердых частиц происходит неравномерно. В результате этого агрегаты образуются лишь из части твердой фазы.

Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о существовании оптимума для процесса флокуляции и агрегатообразования в зависимости от дисперсного состава и концентрации твердой фазы в суспензии. То есть, простым разбавлением исходного шлама до определенной концентрации можно сократить расход флокулянта в несколько раз (в пробе №1 при разбавлении твердой фазы с 80 до 60 г/л расход флокулянта для достижения скорости оседания 9 мм/с уменьшается почти в 2 раза). Другим путем интенсификации образования крупных агрегатов может быть корректировка дисперсного состава шлама, путем привнесения в него частиц более крупной дисперсной фазы вместо введения дополнительной дозы флокулянта.

Поиск путей оптимизации процесса флокуляции с целью снижения расхода дорогостоящих реагентов в зависимости от дисперсного состава и концентрации шлама является предметом наших дальнейших исследований.

**Выводы.** В ходе лабораторных исследований образцов шлама различного гранулометрического состава и концентрации было установлено:

1. Присутствие фракции размером более 40 мкм в количестве 22 % по массе в образце № 2 против 6,1 % аналогичной фракции в образце № 1 заметно увеличило скорость осаждения как твердой фазы без добавления флокулянтов, так и сфлокулированных агрегатов.

2. При одинаковой концентрации твердой фазы в отличающихся между собой лишь гранулометрическим составом образцах № 1 и № 2, доза полимера для достижения примерно одинаковой скорости осаждения отличается почти в три раза (при  $C = 80$  г/л и 70 г/л) и в 1,7 раз при  $C = 60$  г/л.

3. При одинаковом дисперсном составе шлама дозировка флокулянта существенно увеличивается с ростом концентрации твердой фазы в шламе (в 2 раза для пробы №1).

4. Перспективными направлениями интенсификации процесса флокуляции и уменьшения расхода полимера является корректировка шлама по концентрации и дисперсному составу путем разбавления до оптимальной концентрации твердой фазы или добавки фракции размером более 40 мкм.

#### Список литературы:

1. Пантелят, Г. С. Создание замкнутых систем оборотного водоснабжения на предприятиях черной металлургии [Текст] / Г. С. Пантелят, В. А. Андронов, Л. Н. Кузнецова, Д. А. Царенко // Водоснабжение и санитарная техника. – 2005. – № 9. – С. 6–8.
2. Письменский, А. В. Метод автоматического управления процессами сгущения шламовых вод и осветления отходов флотации [Текст] / А. В. Письменский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 5/6 (47). – С. 38–43. – Режим доступа: <http://www/URL: http://journals.uran.ua/eejet/article/viewFile/3196/2999>
3. Шкоп, А. А. Обезвоживание угольных полидисперсных суспензий [Текст] / А. А. Шкоп // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 2/6 (74) – С. 44–49. doi:10.15587/1729-4061.2015.40557

4. Радовенчик, Я. В. Освітлення природних вод з використанням флокулянтів [Текст] / Я. В. Радовенчик, А. О. Костриця, В. М. Радовенчик // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 4/6 (64). – С. 23–26. – Режим доступу: [www/URL:](http://www/URL:)  
<http://journals.uran.ua/eejet/article/view/16696/14219>
5. Гомеля, М. Д. Відстоювання скопу з використанням флокулянтів різного типу [Текст] / М. Д. Гомеля, Я. В. Радовенчик, В. В. Тимошенко, О. С. Коваль // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 1/6 (55). – С. 31–34. – Режим доступу: [www/URL:](http://www/URL:)  
<http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3396/3196>
6. Коновалова, Т. А. Применение флокулянтов для повышения экологической безопасности водно-шламовых схем углебогатительных фабрик [Текст] / Т. А. Коновалова, Г. Б. Векслер, А. А. Лавриненко, Г. Ю. Гольберг // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2014. – № 1, Т. 3 (19). – С. 5–10.
7. Вейцер, Ю. И. Высокомолекулярные флокулянты в процессах очистки природных и сточных вод [Текст] / Ю. И. Вейцер, Д. М. Минц. – Москва: Стройиздат, 1984. – 201 с.
8. Баран, А. А. Полимерсодержащие дисперсные системы [Текст] / А. А. Баран. – Киев: Наукова думка, 1986. – 204 с.
9. Гольберг, Г. Ю. Образование, существование и разрушение флокуляционных структур [Текст] / Г. Ю. Гольберг, А. А. Лавриненко // Горный информационный бюллетень. – 2015. – № 11. – С. 47–54.
10. Гольберг, Г. Ю. Физико-химические проблемы флокуляции тонкодисперсных продуктов обогащения углей [Текст] / Г. Ю. Гольберг // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 1. – С. 346–348.
1. Panteliat, H. S., Andronov, V. A., Kuznetsova, L. N., Tsarenko, D. A. (2005). Sozdanye zamknytykh system oborotnoho vodosnabzheniya na predpriyatiyakh chernoi metallurhyi. Vodospobzhenye y sanytarnaia tekhnika, 9, 6–8.
2. Pysmenskyi, A. V. (2010). Metod avtomatycheskoho upravleniya protsessamy shushcheniya shlamovykh vod y osvetleniya otkhodov flotatsyy. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 5(6 (47)), 38–43. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/viewFile/3196/2999>
3. Shkop, A. A. (2015). Dewatering coal polydisperse suspensions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(6(74)), 44–49. doi:[10.15587/1729-4061.2015.40557](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.40557)
4. Radovenchyk, Ya. V., Kostrytsia, A. O., Radovenchyk, V. M. (2013). Osvitlennia pryrodnykh vod z vykorystanniam flokuliantiv. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 4(6(64)), 23–26. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/16696/14219>
5. Homelia, M. D., Radovenchyk, Ya. V., Tymoshenko, V. V., Koval, O. S. (2012). Vidstoiuvannia skopu z vykorystanniam flokuliantiv riznogo typu. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 1(6(55)), 31–34. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3396/3196>
6. Konovalova, T. A., Veksler, G. B., Lavrinenko, A. A., Gol'berg, G. Iu. (2014). Primenenie flokulyantov dlya povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti vodno-shlamovyih shem ugleobogatitelynyh fabric. Izvestiia Moskovskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta MAMI, 1(3(19)), 5–10.
7. Veitser, Yu. Y., Mynts, D. M. (1984). Vysokomolekuliarnye flokulianty v protsessakh ochistki prirodnykh i stochnykh vod. Moscow: Stroizdat, 200.
8. Baran, A. A. (1986). Polymersoderzhashchye dyspersnye systemy. Kyev: Naukova dumka, 204.
9. Golberg, G. Yu., Lavrinenko, A. A. (2015). Obrazovanie, suschestvo-vanie i razrushenie flokulyatsionnykh struktur. Mining Informational and Analytical Bulletin, 11, 47–54.
10. Golberg, G. Yu. (2006). Fyzyko-khymycheskye problemy flokuliiatsyy tonkodispersnykh produktov obohashcheniya uhlei. Mining Informational and Analytical Bulletin, 1, 346–348.

**Bibliography (transliterated):**

Поступила (received) 10.01.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Дослідження кінетики осідання твердої фази полідисперсних суспензій/ А. О. Шкоп, М. А. Цейтлін, О. В. Шестопалов**// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.137–142. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Исследование кинетики оседания твердой фазы полидисперсных суспензий /А. А. Шкоп, М. А. Цейтлин, А. В. Шестопалов**// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4(1176). – С.137–142. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Researching settling of solid-phase particles kinetics in polydisperse suspensions/ A. Shkop, M. Tseitlin, O. Shestopalov**//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176) .– P. 137–142. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Шкоп Андрій Олександрович** – здобувач кафедри хімічної техніки і промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Багалія, 21, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: [shkop\\_ecomass@ukr.net](mailto:shkop_ecomass@ukr.net).

**Цейтлін Мусій Абрамович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Багалія, 21, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: [mzeit@mail.ru](mailto:mzeit@mail.ru).

**Шестопалов Олексій Валерійович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Багалія, 21, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: [shestopalov.it@khipi.edu.ua](mailto:shestopalov.it@khipi.edu.ua).

**Шкоп Андрей Александрович** – соискатель кафедры химической техники и промышленной экологии Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: [shkop\\_ecomass@ukr.net](mailto:shkop_ecomass@ukr.net).

**Цейтлин Мoiseй Абрамович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: [mzeit@mail.ru](mailto:mzeit@mail.ru).

**Шестопалов Алексей Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: [shestopalov.it@khipi.edu.ua](mailto:shestopalov.it@khipi.edu.ua).

**Shkop Andrii** – Applicant, Department of chemical technique and industrial ecology, National technical university «Kharkov polytechnic institute» 21, street of Bagalii, Kharkov, Ukraine, 61002; e-mail: [shkop\\_ecomass@ukr.net](mailto:shkop_ecomass@ukr.net).

**Tseitlin Musii** – Doctor of Technical Sciences, Professor, National technical university «Kharkov polytechnic institute», 21, street of Bagalii, Kharkov, Ukraine, 61002; e-mail: [mzeit@mail.ru](mailto:mzeit@mail.ru).

**Oleksii Shestopalov** – Candidate of engineering sciences, Associate professor, National technical university «Kharkov polytechnic institute», 21, street of Bagalii, Kharkov, Ukraine, 61002; e-mail: [shestopalov.it@khp.edu.ua](mailto:shestopalov.it@khp.edu.ua).

УДК 519.876.5::628.472.3

**В. Ю. КОЛОСКОВ**

## МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ БЕЗПЕКИ ПОЛІГОНУ ЗІ ЗБЕРІГАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Вперше створено імітаційну модель системи управління безпекою полігону зі зберігання твердих побутових відходів. Під час розроблення моделі пропонується розглядати необхідні для визначення рівня безпеки параметри полігону, які визначають фактори ризику виникнення надзвичайних ситуацій на ньому, та показники якості довкілля як відгуки на вплив зовнішніх чинників. В цьому дослідженні показані й математично описані взаємозв'язки процесів, що відбуваються на об'єкті та у довкіллі. Основним результатом дослідження є удосконалення методу прогнозування рівня безпеки полігону шляхом використання імітаційного моделювання.

**Ключові слова:** прогнозування, рівень безпеки, імітаційне моделювання, полігон, відходи, фактори ризику.

Впервые создана имитационная модель системы управления безопасностью полигона захоронения твердых бытовых отходов. При разработке моделью предлагается рассматривать необходимые для определения уровня безопасности параметры полигона, определяющие факторы риска возникновения на нем чрезвычайных ситуаций, и показатели качества окружающей среды, как отклики на воздействие внешних факторов. В данном исследовании показаны и математически описаны взаимосвязи процессов, происходящих на объекте и в окружающей среде. Основным результатом исследования является усовершенствование метода прогнозирования уровня безопасности полигона путем использования имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** прогнозирование, уровень безопасности, имитационное моделирование, полигон, отходы, факторы риска.

The purpose of the article is to develop method of forecasting of safety level of solid household wastes landfill based on simulation modeling application. The mathematical simulation of functioning process of safety control system of landfill is applied, taking into account interrelations of the processes taking place at the object and in the environment yet considering characteristics of these processes as responses of environment and object on influence of external factors. Results originality. For the first time, the mathematical model of functioning process of safety control system of landfill is developed. We have developed the improved method of forecasting of safety level of landfill is developed, allowing to account the whole complex of acting factors of negative influence of the landfill at the environment in connection with accompanying factors of risk of extreme situations occurrence and at the same time to decrease the number of meaning indexes of safety. Practical value. Application of the proposed method allows us to achieve stable and sufficiently accurate statistics of succession of events without experiments taken on real landfills, which may lead to extreme situations occurrence. It gives us an opportunity to decrease the amount of calculations needed for accurate estimation of the landfill safety level and at the same time to simplify the forecasting procedure without accuracy loss.

**Keywords:** forecasting, safety level, simulation modelling, landfill, wastes, risk factors.

**Вступ.** Аналіз надзвичайних ситуацій (НС) техногенного та природного характеру, які відбуваються у межах полігонів зі зберігання твердих побутових відходів (ТПВ) та інших видів сміття наявно демонструє присутність взаємозв'язків між джерелами екологічної небезпеки та факторами ризику НС, що можуть виникнути у їхніх межах. Наприклад, в Україні та світі на полігонах та звалищах різного призначення у достатній кількості відбуваються зсуви та обвали великих мас відходів та забруднених ґрунтів, наслідки яких у окремих випадках є катастрофічними. До подібних подій відносяться, зокрема, НС, що сталися у 2015 році у м. Шенжен, Китай (69 загиблих); у 2011 році у м. Багію, Філіппіни (5 загиблих); у 2000 році у м. Кесон-Сіті, Філіппіни (218 загиблих). Усім згаданим катастрофам передували порушення умов накопичення та зберігання відходів, а безпосередньо перед ними у більшості прикладів – серйозне погіршення метеорологічних умов у вигляді злив. Втім, іншим негативним наслідком описаних подій, окрім загибелі людей, стало суттєве збільшення площі, які займають відходи, та їх розповсюдження на територію, не призначену для їх безпечного зберігання. Отже, можна зробити висновок, що рівень екологічної небезпеки подібних об'єктів після подібних катастроф різко збільшується.

Особливо проблема забезпечення безпеки полігонів зі зберігання відходів загострюється, якщо декілька різнопланових НС співпадають у часі, оскільки сумарні величини негативного впливу на середовище при цьому суттєво зростають. Зокрема, під час пожежі на полігоні прямий контроль стану маси відходів з метою оцінювання факторів ризику виникнення зсуву або інших НС є суттєво ускладненим через високу температуру палаючих речовин.

Як можна побачити на наведених прикладах, питання зниження ризику виникнення НС та забезпечення екологічної безпеки на полігонах зі зберігання відходів необхідно розглядати з урахуванням усіх взаємозв'язків. Слід зазначити, що й у нормальних умовах функціонування полігону зі зберігання ТПВ суттєвою умовою успішної реалізації заходів й засобів із забезпечення екологічної безпеки є розміщення мас відходів у ізоляції від навколишнього середовища. Це вимагає, зокрема, утримання відходів на виділеному обмеженому майданчику без розповсюдження на прилеглу територію відходів та продуктів їхнього розкладання.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Місця розташування ТПВ є потужними джерелами розповсюдження забруднюючих речовин у

© В. Ю. Колосков. 2016



атмосфері, ґрунті, поверхневих та підземних водах [1]. Шкідливий вплив полігонів зі збереження ТПВ на довкілля є тривалим у часі, що пов'язано з великими термінами розкладення речовин, які входять до мас відходів, зокрема, полімерів та композиційних матеріалів. Побутові відходи є сумішшю твердих речовин, що містить харчові відходи, папір, скло, тканини й полімерні матеріали, метали, тощо, які використовують у побуті. Проте у реальних умовах функціонування полігонів за рахунок змішування до ТПВ потрапляє ширший спектр відходів, включаючи великогабаритні уламки будівельного сміття, що визначає багатокomпонентний склад ТПВ [2].

Основи концепції комплексного екологічного оцінювання природно-техногенних об'єктів викладено у роботах з питань екологічної безпеки [3–6]. Загальний підхід до створення моделей, що використовувалися автором у дослідженнях, викладено у роботі [7]. Що стосується застосування даного підходу для окремих випадків у вирішенні проблем забезпечення безпеки як загального плану, так і конкретних задач, ці результати викладено у роботах автора [8–11].

Реалізація динамічного управління безпекою в умовах НС потребує якісно нових підходів до оцінювання результатів негативних впливів на об'єкт та довкілля. Врахування сукупної дії різних факторів, накопичення ефекту впливу, взаємозв'язків між факторами ризику виникнення НС та показниками рівня екологічної безпеки полігону вимагає переходу від методів прямого оцінювання результатів впливів до методів прогнозування цих результатів у майбутньому, що дозволить не лише виконати завдання забезпечення необхідного рівня безпеки, а й підвищити ефективність захисних заходів, які впроваджуються для його вирішення. З урахуванням обмеженості ресурсів з ліквідації наслідків шкідливого впливу на довкілля

актуальною проблемою є визначення рівня безпеки полігонів зі зберігання ТПВ, як об'єктів техногенної діяльності людства.

**Ціль та задачі дослідження.** Метою дослідження є розроблення моделей та методів прогнозування рівня безпеки полігону зі зберігання ТПВ.

Для досягнення поставленої мети були поставлені та вирішені наступні задачі:

1. Створити імітаційну модель системи управління безпекою полігону зі зберігання ТПВ.

2. Удосконалити метод прогнозування рівня безпеки полігону зі зберігання ТПВ.

**Матеріали та методи дослідження процесу функціонування системи управління безпекою полігону зі зберігання ТПВ.** Об'єктом дослідження є процес функціонування системи управління безпекою полігону зі зберігання ТПВ.

Предметом дослідження є моделі і методи прогнозування рівня безпеки полігону зі зберігання ТПВ.

Методологічною основою представленої роботи став метод імітаційного моделювання. Оскільки експериментування на полігонах зі зберігання ТПВ з відтворенням умов перебігу надзвичайних ситуацій є неприпустимим за вимогами безпеки, цей метод дозволяє перейти до аналізу відповідних станів системи з визначенням альтернатив її поведінки і, внаслідок цього, до прогнозування рівня безпеки полігону в цілому. Цей метод дослідження дозволяє одержати стійку статистику розвитку подій, за умови заміни реальної системи моделлю, що з достатньою точністю описує її.

Імітаційна модель системи управління безпекою полігону зі зберігання ТПВ складена за блочно-модульним принципом (рис. 1), що дозволяє вільно корегувати структуру моделі в залежності від конкретного завдання моделювання, пов'язаного з конкретним об'єктом.

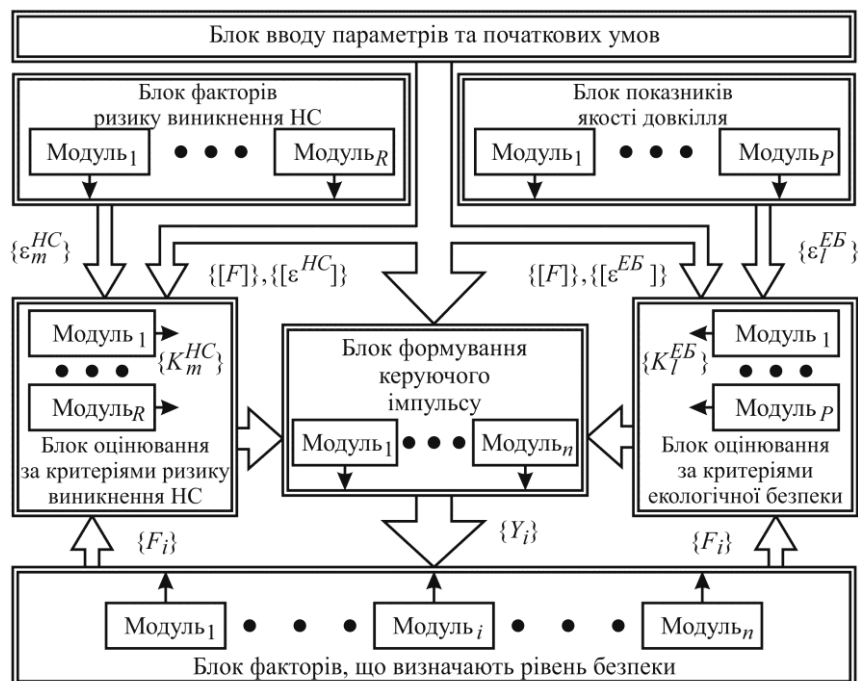


Рис. 1 – Структура імітаційної математичної моделі системи управління безпекою полігону зі зберігання ТПВ



Функціонування системи управління безпекою полігону розглядається на інтервалі часу  $(T_0, T_1)$ , що характеризується дією комплексу факторів  $F_i(t) \in \Phi$ ,  $i = 1 \dots n$ . До розгляду додаються параметри  $\varepsilon_m^{HC} \in E^{HC}$ ,  $m = 1 \dots R$ , що визначають фактори ризику виникнення НС, а також показники якості довкілля  $\varepsilon_l^{EB} \in E^{EB}$ ,  $l = 1 \dots P$ .

$$E = E^{HC} \cup E^{EB}. \quad (1)$$

Множина величин  $E$  при цьому розглядається як сукупність відгуків об'єкту та довкілля на вплив зовнішніх факторів з урахуванням взаємозв'язку процесів, що відбуваються на полігоні та у довкіллі.

Результатом моделювання є залежності від часу

$$W(t) = K(t), Y(t) \quad (2)$$

критеріїв оцінювання рівня безпеки  $K(t)$

$$K = K^{BC} \cup K^{HC} \quad (3)$$

та керуючого імпульсу  $Y(t)$  у вигляді комплексу впливів на кожен із факторів, що визначають рівень безпеки,

$$Y = \{Y_i\}; \quad (4)$$

$$Y_i = g_i(K), \quad i = 1 \dots n, \quad (5)$$

Задача їх знаходження формалізується наступним чином

$$W(t) = M(A(t), B), \quad (6)$$

де  $A$  – сукупність вхідних параметрів системи у формі

$$A = \Phi \cup E, \quad (7)$$

$B$  – множина регламентуючих обмежень

$$B = \{[F]\}, \{[\varepsilon^{HC}]\}, \{[\varepsilon^{EB}]\}, \quad (8)$$

які визначають у кількісному вираженні граничні значення для кожного з використовуваних критеріїв оцінювання рівня безпеки.

Сформований набір критеріїв

$$K = K^{HC} \cup K^{EB} = \{K_m^{HC}\} \cup \{K_l^{EB}\} \quad (9)$$

має формалізувати вимоги нормативних документів, що регламентують умови експлуатації полігонів зі зберігання ТПВ, за припустимим рівнем ризику виникнення НС

$$K_m^{HC} : \chi_m^{HC}(\Phi, E^{HC}), \quad m = 1 \dots R, \quad (10)$$

та рівнем екологічної безпеки

$$K_l^{EB} : \chi_l^{EB}(\Phi, E^{EB}), \quad l = 1 \dots P, \quad (11)$$

де  $R$  та  $P$  – кількість критеріїв, що використовується для оцінювання рівня безпеки за кожним з цих напрямів.

Отже, процес функціонування системи управління безпекою полігону зі зберігання ТПВ в загальному вигляді можна записати наступним чином:

$$\{A, B\} \rightarrow W : \{K \rightarrow Y\}. \quad (12)$$

Оскільки реальні умови функціонування природних процесів у навколишньому природному середовищі характеризуються впливом складного комплексу негативних факторів, оцінювання результату їхньої дії має базуватися на сформованих динамічних моделях виникнення відгуків навколишнього середовища під дією тих або інших факторів. З урахуванням цього метод прогнозування рівня безпеки полігону зі зберігання ТПВ полягає у покроковій перевірці дотримання умов безпечного функціонування об'єкту на основі критеріїв безпеки у  $n$ -вимірному просторі факторів  $F_i \in \Phi$ ,  $i = 1 \dots n$ , де  $n$  – кількість факторів у сукупності, які змінюються за програмою функціонування об'єкту, з наданням узагальненого висновку про рівень безпеки. Спрощену схему методу подано на рис. 2.



Рис. 2 – Спрощена схема методу прогнозування рівня безпеки полігону зі зберігання ТПВ

Комплекс вихідних даних для прогнозування формується за трьома напрямками.

1. Формування набору значень факторів, що визначають рівень безпеки, які задаються програмою функціонування полігону з урахуванням керуючих імпульсів на корегування значень факторів у випадку виходу на неприпустимий режим роботи. Для уніфікації оцінювання рівня безпеки слід отримати множину зведених факторів  $\bar{F}_i \in \Phi^{36}$

$$\phi_F^{36} : \Phi \rightarrow \Phi^{36} \quad (13)$$

у вигляді

$$\bar{F}_i = \phi_F^{36}(F_i) = \frac{F_i}{[F_i]}, \quad i = 1 \dots n, \quad (14)$$

де  $[F_i]$  – граничні припустимі значення діючих факторів. Такий підхід надає можливість перейти до розгляду  $n$ -вимірному простору зведених значень факторів, у якому граничні припустимі значення визначаються нормативним критерієм у вигляді

$$\bar{F}_i = 1, \quad i = 1 \dots n, \quad (15)$$

завдяки чому різноманітні за походженням фактори зрівнюються за значенням.

2. Формування набору критеріїв для оцінювання безпеки досліджуваного об'єкту. Побудову критеріїв оцінювання рівня безпеки проводять з урахуванням визначеного набору діючих факторів.

3. Формування набору параметрів та вихідних даних, які визначають початковий стан полігону й екосистеми прилеглої території, включаючи:

- граничні припустимі значення діючих факторів  $[F_i]$ ;
- граничні припустимі значення параметрів об'єкту  $[\mathcal{E}_m^{HC}]$ ;
- граничні припустимі значення показників якості довкілля  $[\mathcal{E}_i^{EB}]$ .

Комплекс критеріїв оцінювання рівня безпеки полігону реалізується водночас для кожного діючого фактору, а з іншого – для усіх значущих відгуків довкілля та об'єкту. Після послідовного оцінювання рівня безпеки полігону для кожного набору значень факторів за програмою його функціонування формується узагальнений висновок про прогнозований рівень безпеки системи упродовж заданого періоду часу.

**Результати дослідження процесу функціонування системи управління безпекою полігону зі зберігання ТПВ.** В результаті проведених досліджень отримані наступні результати:

1. Вперше розроблено імітаційну математичну модель системи управління безпекою полігону зі зберігання ТПВ, яка дозволяє проводити комплексний аналіз та прогнозування рівня безпеки різних комбінацій уражуючих факторів надзвичайних ситуацій з використанням методів імітаційного моделювання.

2. Запропоновано удосконалений метод прогнозування рівня безпеки полігону зі зберігання ТПВ шляхом використання імітаційного моделювання.

**Обговорення результатів дослідження процесу функціонування системи управління безпекою полігону зі зберігання ТПВ.** Прогнозування змін у стані довкілля є складним процесом, який вимагає формалізації зв'язків між всіма елементами системи. При цьому необхідно брати до уваги якнайбільше індивідуальних особливостей полігону стосовно можливостей виникнення на ньому НС – пожежі, зсуву, тощо.

Для практичної реалізації запропонованого методу необхідним є проведення системних досліджень, направлених на створення бази формалізованих критеріїв за якнайбільшою кількістю показників для оцінювання рівня безпеки полігону зі зберігання ТПВ, які б враховували зв'язок між природними процесами в ньому з параметрами функціонування об'єкту.

**Висновки.** Основним результатом поданої роботи є вдосконалення методу прогнозування рівня безпеки полігону зі зберігання ТПВ шляхом використання імітаційного моделювання. Основною перевагою запропонованого методу у порівнянні з тими, що використовуються сьогодні, є урахування усього комплексу діючих факторів негативного впливу полігону на довкілля у поєднанні з супутніми факторами ризику виникнення НС, з одночасною мінімізацією кількості значущих показників якості довкілля. Завдяки цьому з'являється можливість зниження обсягів обчислень, необхідних для точного оцінювання набором критеріїв, а також спрощується процедура прогнозування без втрати точності.

#### Список літератури:

1. Трофімов, І. Л. Оцінка впливу відходів побутового походження на екологічний стан України [Текст] / І. Л. Трофімов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 2/10 (68). – С. 25–29. doi:10.15587/1729-4061.2014.22427
2. Шаповров, В. П. Проблемы, возникающие при обращении с твердыми бытовыми отходами, и возможные пути их решения [Электронный ресурс] / В. П. Шаповров, О. А. Лопухина, М. А. Жабер и др. // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2005. – № 1. – С. 3–9. – Режим доступа: \www/URL: [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/2286/1/ITE\\_2005\\_1\\_Shapovrov\\_Problemy%2c%20voznikayushchiye.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/2286/1/ITE_2005_1_Shapovrov_Problemy%2c%20voznikayushchiye.pdf)
3. Лисиченко, Г. В. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління [Текст] / Г. В. Лисиченко, Ю. Л. Забулонов, Г. А. Хміль. – Київ: Наукова думка, 2008. – 543 с.
4. Харламова, Е. В. Теоретические основы управления экологической безопасностью техногенно нагруженного региона [Текст] / Е. В. Харламова, М. С. Малеваный, Л. Д. Пляцук // Экологична безпека. – 2012. – № 1 (13). – С. 9–12.
5. Шевчук, В. Я. Екологічне управління [Текст] / В. Я. Шевчук, Ю. М. Сатанкін, Г. А. Більявський та ін. – Київ: Лебідь, 2004. – 430 с.
6. Козуля, Т. В. Комплексна екологічна оцінка природно-техногенних комплексів на основі MIPS- і ризик-аналізу [Текст] / Т. В. Козуля, Д. І. Смельянова, М. М. Козуля // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 3/10 (69). – С. 8–13. doi:10.15587/1729-4061.2014.24624
7. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука [Текст] / Р. Шеннон. – Москва: Мир, 1978. – 418 с.
8. Колосков, В. Ю. Метод прогнозування адаптації оператора до дії шкідливих факторів машинобудівного виробництва [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / В. Ю. Колосков. – Харьков, 2007. – 178 с.
9. Колосков, В. Ю. Утилизация непригодных для дальнейшего использования авиационных боеприпасов с учетом критериев безопасности [Текст] / В. Ю. Колосков, Е. А. Полищук // Экология и промышленность. – 2011. – № 4. – С. 109–114.

10. Колосков, В. Ю. Моделирование мѣцности несущих конструкций будѣвель под час пожежі [Текст] / В. Ю. Колосков // Проблемы пожарной безопасности. – 2015. – № 38. – С. 83–90.
- Bibliography (transliterated):**
1. Trofimov, I. L. (2014). Impact assessment of municipal wastes on the ecological state of Ukraine. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(10(68)), 25–29. doi:10.15587/1729-4061.2014.22427
  2. Shaporev, V. P., Lopuhina, O. A., Zhaber, M. A., Kanso, V. A., Shaporev, P. V. (2005). Problems arising on handling of solid domestic wastes and ways of their resolution. Integrated Technologies and Energy Conservation, 1, 3–9. Available at: [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/2286/1/ITE\\_2005\\_1\\_Shaporev\\_Problemy%2c%20voznikayushchiye.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/2286/1/ITE_2005_1_Shaporev_Problemy%2c%20voznikayushchiye.pdf)
  3. Lysyuchenko, G. V. (2008). Pryrodnyj, tehnogenyj ta ekologichnyj ryzky: analiz, ocinka, upravlinnja. Kyiv: Naukova dumka, 543.
  4. Harlamova, E. V., Malevanyj, M. S., Pljacuk, L. D. (2012). Theoretical bases managements by ecological safety of the technogenic loaded region. Ecological Safety, 1 (13), 9–12.
  5. Shevchuk, V. Ja., Satankin, Ju. M., Biljavskij, G. A. et al. (2004). Ekologichne upravlinnja. Kyiv: Lebid, 430.
  6. Kozulia, T. V., Yemeljanova, D. I., Kozulia, M. M. (2014). Complex ecological estimation of natural and manmade complexes which basis on MIPS- and risk analysis. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(10(69)), 8–13. doi:10.15587/1729-4061.2014.24624
  7. Shannon, R. (1978). Systems Simulation: The Art and Science. Moscow: Mir, 418.
  8. Koloskov, V. Yu. (2007). Method of prediction of operator adaptation to influence of machine-building harmful factors. Kharkiv, 178.
  9. Koloskov, V. Yu., Polishuk, E. A. (2011). Utilization of ammunition not suitable for further usage taking into account safety criteria. Ekologiya i promyshlennost', 4 (29), 109–114.
  10. Koloskov, V. Yu. (2015). Modelling of strength of carrying constructions of buildings during the fire. Problems of Fire Safety, 38, 83–90.

Надійшла (received) 15.01.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Моделі та методи прогнозування рівня безпеки полігону зі зберігання твердих побутових відходів/ В. Ю. Колосков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.142–146. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Модели и методы прогнозирования уровня безопасности полигона захоронения твердых бытовых отходов/В. Ю. Колосков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.142–146. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Models and methods of forecasting of safety level of solid household wastes storage landfill/V. Koloskov** //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176). – P. 142–146. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Колосков Володимир Юрійович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет цивільного захисту України, доцент кафедри прикладної механіки; вул. Чернишевська, 94, м. Харків, 61023, Україна; e-mail: [koloskov@nuczu.edu.ua](mailto:koloskov@nuczu.edu.ua)

**Колосков Владимир Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет гражданской защиты Украины, доцент кафедры прикладной механики; ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, 61023, Украина; e-mail: [koloskov@nuczu.edu.ua](mailto:koloskov@nuczu.edu.ua)

**Koloskov Volodymyr** – candidate of technical sciences, associate professor, National University of Civil Protection of Ukraine, associate professor of the Applied Mechanics Department; Chernishevskaya str., 94, Kharkiv, 61023, Ukraine; e-mail: [koloskov@nuczu.edu.ua](mailto:koloskov@nuczu.edu.ua)

## ЗМІСТ

<b>Дейнеко Н. В.</b> Влияние уровня освещенности на выходные параметры солнечных элементов на основе CdS/CdTe .....	3
<b>Джафарова А. А., Иманова Р. А.</b> Влияние пористости оксидированных порошковых материалов на основе железа на их триботехнические характеристики .....	7
<b>Зозуля Э. В., Терлецкий А. С., Меньшиков А. Г., Субботина В. В., Протасенко Т. А.</b> Влияние состава и условий осаждения на структуру и свойства вакуумных композитов на основе меди, упрочненных оксидом алюминия .....	10
<b>Колоскова А. Н.</b> Моделирование полимерных слоев многослойных комбинированных упаковочных материалов .....	16
<b>Находов В. Ф., Замулко А. И., Аль Шарари М. И., Чекамова В. В.</b> Оценка потенциала снижения затрат энергосистемы в результате выравнивания суточных графиков ее электрической нагрузки .....	21
<b>Кунгурцев О. Б., Блажко О. А., Ковальчук С. В., Скрипкин М. О.</b> Автоматизація створення сховища даних електронних документів з Веб-порталів відкритих даних .....	31
<b>Бригар І. В., Золотько К. Є.</b> Використання інтерфейсу онтологій у експертних системах туроператорів .....	38
<b>Минько О. В., Золотько К. Е.</b> Разработка программно-математического обеспечения для параллельной обработки разреженных матриц с помощью технологии OpenMP .....	44
<b>Москалец Н. В.</b> Методы организации пространственно-временного множественного доступа в системе мобильной связи .....	49
<b>Надточий А. В.</b> Моделювання управління ризиками в проектах глибоководних археологічних досліджень з використанням засобів морської робототехніки .....	58
<b>Невлюдов И. Ш., Пономарева А. В., Бортникова В. О.</b> Модель принятия решения на этапе проектирования технологического процесса изготовления МЭМС акселерометров .....	63
<b>Буланый М. Ф., Хмеленко О. В., Плахтій Є. Г., Гаращенко Н. В., Фесенко С. Є.</b> Розробка та виготовлення пристрою охолодження оптичного детектора .....	67
<b>Высоцкая Е. В., Беспалов Ю. Г., Рак Л. И., Печерская А. И., Цапенко К. В.</b> Моделирование динамики согласованности параметров сердечно-сосудистой системы на разных стадиях адаптационного синдрома .....	74
<b>Терлич С. В.</b> Аналіз сучасних безкаркасних систем захисту приміщень в судно- та докобудуванні .....	79
<b>Шергин В. Л., Дереза Э. Э., Передерий В. С.</b> Оценивание показателя Хёрста для процессов Леви .....	84
<b>Тищенко Є. О., Рудешко І. В., Бас О. В.</b> Особливості напруженого стану стиснених конструкцій підземних споруд .....	89
<b>Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Івіцький І. І., Колосов О. Є., Куриленко В. М.</b> Методи та пристрої для виготовлення виробів з інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів .....	95
<b>Шумська Л. П.</b> Дослідження теплового захисту будівель при утепленні пористими теплоізоляційними матеріалами .....	102
<b>Островерхов М. Я., Реуцький М. О., Трінчук Д. Я.</b> Дослідження енергоефективності нелінійного електричного кола з автономним живленням на прикладі привода електроскутера .....	109
<b>Клімішина М. Т.</b> Дослідження методів розрахунків і інструментальний контроль викидів при піролізній переробці шин .....	116
<b>Климюк Ю. Є.</b> Прогнозування оптимальних режимів роботи багаточарових швидких фільтрів з кусково-однорідними пористими завантаженнями .....	122

<b>Серикова Е. Н., Стрельникова Е. А.</b> Изменение уровня грунтовых вод в городской экосистеме г. Харькова .....	132
<b>Шкоп А. А., Цейтлин М. А., Шестопалов А. В.</b> Исследование кинетики оседания твердой фазы полидисперсных суспензий .....	137
<b>Колосков В. Ю.</b> Моделі та методи прогнозування рівня безпеки полігону зі зберігання твердих побутових відходів .....	142

## CONTENTS

<b>Deyneko N.</b> Influence of light on the level of output parameters solar cells based on CdS / CdTe .....	3
<b>Jafarova A. A., Imanova R. A.</b> Influence of the porosity of the oxidized powder materials HB iron based on their tribological properties .....	7
<b>Zozulya E. V., Terletskiy A. S., Menshikov, A. G. Subbotina V. V., Protasenko T. A.</b> Influence of composition and deposition conditions on the structure and properties of vacuum copper-based composites strengthened by aluminum oxide .....	10
<b>Koloskova G.</b> Modelling of polymeric layers of multi-layer combined packaging materials .....	16
<b>Nakhodov V., Zamulko A., Alsharari M., Chekamova V.</b> Assessing the potential of lowering expenses of energy system as a result of smoothing of chart electrical daily load .....	21
<b>Kungurtsev A., Blazhko O., Kovalchuk S., Skripkin M.</b> Automating of creation of electronic documents warehouse on web-portals of open data .....	31
<b>Brygar I. V., Zolotko K. E.</b> Use of ontology interface in expert systems of tourism operators38	
<b>Minko O. V., Zolotko K. E.</b> The development of mathematical software for parallel processing of sparse matrices using OpenMP technology .....	44
<b>Moskalets M. V.</b> The methods of spatial-time multiple access in mobile communication system .....	49
<b>Nadtochy A.</b> Modelling of risk management in projects of deep archaeological research using marine robotics funds 58	
<b>Nevlyudov I., Ponomarova A., Bortnikova V.</b> Decision making model at the mems accelerometers production technological process design stage .....	63
<b>Bulaniy M. F., Khmelenko O. V., Plahtiy E. G., Garashenko N. V., Fesenko S. E.</b> Development and manufacturing equipment for the cooling optical detector .....	67
<b>Vysotska O., Bepalov Yu., Rak L., Pecherska A., Tsapenko K.</b> Modeling the dynamics of the cardiovascular system parameters coherence at different stages of the adaptation syndrome .....	74
<b>Terlych S. V.</b> Analysis of modern frameless systems sewing facilities in the shipbuilding and dokostructure .....	79
<b>Shergin V., Dereza E., Perederiy V.</b> Estimation the Hurst exponent of the ordinary Lévy process .....	84
<b>Tishchenko Je., Rudeshko I., Bas O.</b> Features of stress state grip design underground structures .....	89
<b>Sivetskiy V., Sokolskiy, O. Ivitskiy I., Kolosov O., Kurylenko V.</b> Methods and apparatus for the manufacture of intelligent polymer composites .....	95
<b>Shumska L.</b> Research of thermal protection of buildings by warming of porous heat-insulation materials .....	102
<b>Ostroverkhov M., Reutskiy M., Trinchuk D.</b> Research of the efficiency of a nonlinear electric circuit with independent power supply on the example of the electric scooter drive .....	109



---

<b>Klimishyna M.</b> Researching methods of calculation and instrumental control emissions during tire pyrolysis recycling .....	116
<b>Klimjuk Ju.</b> Prediction of optimal modes of operation of multi-layers rapid filters with piecewise-homogeneous porous loads .....	122
<b>Serikova E., Strelnikova E.</b> Groundwater Level Changing in the Urban Kharkov Ecosystem .....	132
<b>Shkop A., Tseitlin M., Shestopalov O.</b> Researching settling of solid-phase particles kinetics in polydisperse suspensions .....	137
<b>Koloskov V.</b> Models and methods of forecasting of safety level of solid household wastes storage landfill .....	142

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
"ХПІ"**

**Збірник наукових праць**

Серія:

Механіко-технологічні системи та комплекси

№ 4(1176) 2016

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. № 35-16

Підп. до друку 02.02.2016р. Формат 60x84/16. Надруковано на різнографі  
Gestetner 6123CP. Ум.-друк. арк. 18,75. Облік.вид.арк. 17,44.  
Наклад 100 прим. Зам. № 59-16. 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