

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ЧЕРКАСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Технічні науки

Заснований у грудні 1996 р.

4/2019

Редакційна колегія:

Фауре Е. В., д.т.н., доцент

(головний редактор)

Антонюк В. С., д.т.н., професор

Базіло К. В., к.т.н., доцент

Батраченко О. В., к.т.н., доцент

Бондаренко М. О., д.т.н., доцент

Бондаренко Ю. Ю., к.т.н., доцент

Вамболь В. В., д.т.н., професор

Вашенко В. А., д.т.н., професор

Вязовик В. М., д.т.н., доцент

Гальченко В. Я., д.т.н., професор

Заболотній С. В., д.т.н., доцент

Кажіс Р., д.т.н., професор (Литва)

Котов В. М., д.фіз.-мат.н., професор (Білорусь)

Лукашенко В. М., д.т.н., професор

Мусієнко М. П., д.т.н., професор

Нерода М. В., к.т.н., доцент (Білорусь)

Палагін В. В., д.т.н., професор

Петрищев О. М., д.т.н., професор

Півоваров О. А., д.т.н., професор

Прокопенко Т. О., д.т.н., доцент

Ситник О. О., д.т.н., професор

Столяренко Г. С., д.т.н., професор

Уткіна Т. Ю., к.т.н., доцент

Федоров Є. Є., д.т.н., доцент

ЗАСНОВНИК І ВИДАВЕЦЬ – Черкаський
державний технологічний університет

Свідectво про державну реєстрацію
друкованого засобу масової інформації
КВ № 6061 від 16.04.2002 р.

Виходить 4 рази на рік

У ВИПУСКУ:

**АВТОМАТИЗАЦІЯ
І ПРИЛАДОБУДУВАННЯ**

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

**ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ІНЖЕНЕРІЯ,
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА**

**МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО,
ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ
СУЧАСНИХ МАШИНОБУДІВНИХ
І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

Відповідальний за випуск:
д.т.н., доцент Е. В. Фауре

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:
ЧДТУ, к. 604/1, бульвар Шевченка, 460,
м. Черкаси, 18006,
тел. (0472) 51-15-89
vtn.chdtu.edu.ua (подання статей)

Сисоєнко С. В. *(технічний секретар)*
Мельник І. В. *(відповідальний секретар)*
тел. (0472) 51-36-39; e-mail: mal_04@ukr.net

4-2019

ВІСНИК

**Черкаського державного
технологічного університету**

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

VISNYK

**Cherkaskogo derzhavnogo
tehnologichnogo universitetu**

TECHNICAL SCIENCE

4 • 2019

**Видання включене до Переліку
наукових фахових видань України
як фахове видання з технічних наук
(категорія «В»)**

**Видання зареєстровано
у міжнародних наукометричних базах,
каталогах і системах пошуку:**

Index Copernicus Journals Master List,
CiteFactor,
Google Академія,
ResearchBib – Academic Resource Index,
Ulrich's Periodicals Directory,
WorldCat
Наукова періодика України

**Електронна версія:
visnyk.chdtu.edu.ua
vtn.chdtu.edu.ua
<https://chdtu.edu.ua>**

pISSN 2306-4412 / eISSN 2306-4455

Затверджено науково-технічною
радою Черкаського державного
технологічного університету,
протокол № 7 від 13.12.2019 р.

При повному або частковому
передрукуванні матеріалів
посилання на «Вісник Черкаського
державного технологічного
університету» є обов'язковим.

© Черкаський державний
технологічний університет, 2019
© Автори, 2019

ЗМІСТ

АВТОМАТИЗАЦІЯ І ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

<i>Томенко М. Г., Томенко В. І.</i> Математична модель системи раннього визначення аварійності складних технологічних виробництв на базі автономних п'єзотранспондерів	5
<i>Півень О. Б., Бойко О. В.</i> Мікроконтролерна система керування поливом земельних ділянок із обміном даних	11
<i>Федоров Е. Е., Ярош И. В., Черняк Т. А.</i> Нейросеть TDNN для диагностики состояния вентиляционной установки главного проветривания	19

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Дворецкий М. Л., Дворецка С. В., Давиденко Є. О.</i> Інформаційна технологія визначення корисних даних при оптимізації структури та мінімізації обсягів вузла розподіленої БД	26
<i>Колесніков К. В., Гарячий В. С.</i> Особливості проектування Web-орієнтованих інформаційних систем на основі гнучкої методології SCRUM	36
<i>Ступень П. В., Дікусар К. В., Рябой А. А.</i> Моделювання характеристик обладнання комп'ютерних мереж у ракурсі інформаційної безпеки	42
<i>Сисоєнко С. В., Дахненко Д. В.</i> Оптимізація функціональних можливостей інформаційної системи для розвитку туризму	49
<i>Чорний А. М., Журбинський Д. А., Євтушенко І. О.</i> Дослідження впливу завантаженості мережі на якість передавання VoIP	56
<i>Миронець І. В., Бобошко А. В.</i> Удосконалення інформаційної системи моніторингу освітнього процесу	63

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРІЯ,
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

<i>Астрелин И. М., Герасименко Ю. С., Белоусова Н. А., Косогина И. В.</i> Сравнительные характеристики коррозионной активности воды	71
<i>Знак З. О., Грабаровська А. С., Зінь О. І., Дяденчук А. В.</i> Модифікування термічно активованого природного клиноптилоліту йонами аргентуму	79
<i>Суворін О. В., Шорохов М. М., Ожередова М. А., Зубцов Є. І.</i> Високоефективна технологія знешкодження Cr (VI)-вмісних промивних вод електрохімічних виробництв	88
<i>Концевой А. Л., Концевой С. А.</i> Моделювання двопотокової регенерації розчину моноетаноламіну	96
<i>Столяренко Г. С.</i> Теоретические основы процесса озонирования жидкого топлива и изучение влияния малых доз озона на работу карбюраторного двигателя внутреннего сгорания (ДВС)	102

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ
СУЧАСНИХ МАШИНОБУДІВНИХ І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

<i>Бернацький А. В., Шелягін В. Д., Сидорець В. М., Берднікова О. М., Сіора О. В., Набок Т. М.</i> Визначення технологічних особливостей лазерного зварювання стикових з'єднань з різномірних нержавіючих аустенітних сталей у вертикальному просторовому положенні	112
<i>Осипенко В. І., Кондаков А. В., Тімченко О. В.</i> Визначення залишкових напруг в інструментальній сталі У7А після електроерозійного дротяного вирізання	126

CONTENTS

AUTOMATION AND CONSTRUCTION OF DEVICES

<i>Tomenko M. G., Tomenko V. I.</i> Mathematical model of the system for early determination of the accidents in complex technological manufactures based on autonomous piezotransponders.....	5
<i>Piven O. B., Boyko O. V.</i> Microcontroller control system of land plots irrigation with data exchange.....	11
<i>Fedorov E. E., Yarosh I. V., Cherniak T. O.</i> TDNN neural network for diagnosing the state of the fan installation of the main airing	19

INFORMATION TECHNOLOGIES

<i>Dvoretzkyi M. L., Dvoretzskaya S. V., Davydenko Ye. O.</i> Information technology for determining useful data while optimizing the structure and minimizing the volume of the distributed database node	26
<i>Kolesnikov K. V., Haryachiy V. S.</i> Special aspects of Web-oriented data system design based on Scrum flexible methodology	36
<i>Stupen P. V., Dikusar K. V., Ryaboy A. A.</i> Modeling of features of computer network equipment from the perspective of information security.....	42
<i>Sysoienko S. V., Dakhnenko D. V.</i> Optimization of functional opportunities of information system for tourism development	49
<i>Chorniy A. M., Zhurbynskyi D. A., Yevtushenko I. O.</i> Investigation of the impact of network load on VoIP transmission quality	56
<i>Myronets I. V., Boboshko A. V.</i> Improvement of the information system for educational process monitoring.....	63

CHEMICAL TECHNOLOGIES AND ENGINEERING,
ECOLOGICAL SECURITY

<i>Astrelin I. M., Gerasymenko Yu. S., Bilousova N. A., Kosogina I. V.</i> Comparative characteristics of water corrosion activity.....	71
<i>Znak Z. O., Hrabarovska A. C., Zin O. I., Dyadenchuk A. V.</i> Modification of thermally activated natural clinoptilolite with silver ions	79
<i>Suvorin A. V., Shorokhov M. N., Ozheredova M. A., Zubtsov E. I.</i> High-effective technology for the neutralization of Cr (VI)-containing washwater of electrochemical plants	88
<i>Kontsevoi A. L., Kontsevoi S. A.</i> Modeling of two-flow regeneration of monoethanolamine solution	96
<i>Stolyarenko H. S.</i> Theoretical bases of the ozoning process of liquid fuel and study of the influence of ozone small doses on the work of carburetor internal combustion engine (ICE).....	102

MATERIALS SCIENCE, TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT
OF MODERN MACHINE-BUILDING AND FOOD PLANTS

<i>Bernatskyi A. V., Sheliagin V. D., Sydorets V. M., Berdnikova O. M., Siora O. V., Nabok T. M.</i> Determination of technological features of laser welding of butt joints of different stainless austenitic steels in vertical spatial position.....	112
<i>Osypenko V. I., Kondakov A. V., Timchenko O.</i> Determination of residual stresses in U7A instrumental steel after electroerosive wire cutting	126

[0000-0002-2354-9106] **М. Г. Томенко**, к.пед.н.,

e-mail: marina_tomenko@ukr.net

[0000-0001-7139-9141] **В. І. Томенко**, к.т.н., доцент

e-mail: firech1996@gmail.com

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ РАНЬОГО ВИЗНАЧЕННЯ АВАРІЙНОСТІ СКЛАДНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ НА БАЗІ АВТОНОМНИХ П'ЄЗОТРАНСПОНДЕРІВ

В роботі запропоновано математичну модель системи попереднього визначення аварійності складних технологічних виробництв на потенційно небезпечних об'єктах або об'єктах підвищеної небезпеки, яка побудована на принципі фіксації змін вібрації обладнання, що передують будь-якій аварії. Модель враховує основні складові системи: час передачі аварійної інформації, різні типи енергоспоживання тощо. Проведені експериментальні дослідження на базі виявлення змін вібрації при обертових рухах робочих валів показали адекватність отриманої математичної моделі. Різниця між значеннями теоретичних розрахунків та експериментально отриманими даними не перевищувала 23 %. Отримана математична модель може бути використана розробниками при побудові ефективних протиаварійних систем на складних технологічних виробництвах потенційно небезпечних об'єктів або об'єктів підвищеної небезпеки.

Ключові слова: математична модель, аварійні ситуації, п'єзотранспондер, вібрація, енергія.

Вступ. Для раннього визначення аварійних ситуацій та аварій на потенційно небезпечних об'єктах або об'єктах підвищеної небезпеки в складних технологічних процесах важливим фактором є постійний контроль над станом технологічного обладнання, оскільки будь-якій аварії передують незначна або суттєва зміна в параметрах і характеристиках обладнання: зміна струмів, механічних коливань тощо.

Для виявлення відхилень механічних (вібраційних) коливань, що притаманні майже будь-якому складному технологічному обладнанню, широко застосовують п'єзокерамічні перетворювачі [1, 2]. Величезною їх перевагою є те, що вони є активними, тобто під дією механічного впливу п'єзодатчики генерують електричну напругу, що буде слугувати джерелом живлення передавача [3].

В роботі [1] здійснено розробку п'єзокерамічних автономних датчиків з можливістю ідентифікації, що дозволило використовувати їх у системах раннього визначення аварійності складних технологічних виробництв. Загальний принцип роботи

п'єзотранспондера як датчика зображено на рисунку 1.

Під впливом вібрації від технологічного обладнання відбувається живлення датчика (1) за рахунок прямого п'єзоефекту, коли вібрація механічно впливає на п'єзоелемент. При зміні вібраційної картини, що говорить про наявність аварійного стану на об'єкті, п'єзоперетворювач фіксує відхилення технологічного процесу від заданого і дистанційно по безпроводному каналу передає ідентифікаційний сигнал тривоги (2). Причому при необхідності за допомогою приймально-передавального пристрою можна в будь-який час провести перевірку роботоздатності датчика (3).

За цією схемою датчик будується за принципом п'єзотранспондера, коли конструктивні елементи датчика слугують ідентифікаторами елемента. Як такий ідентифікатор у п'єзоперетворювачах авторами запропоновано використовувати форми та розміри електродів [1, 2, 4]. Принцип роботи п'єзотранспондера зображено на рисунку 2.

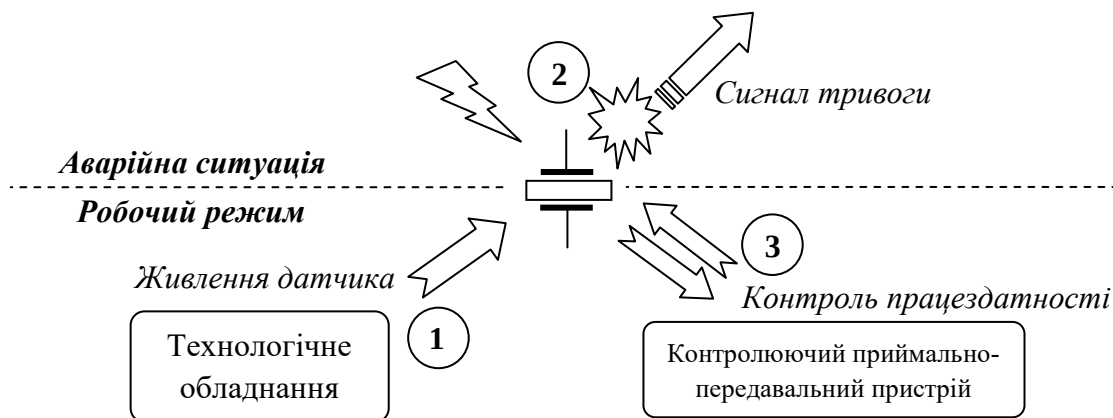


Рисунок 1 – Принцип роботи п'єзотранспондера як датчика

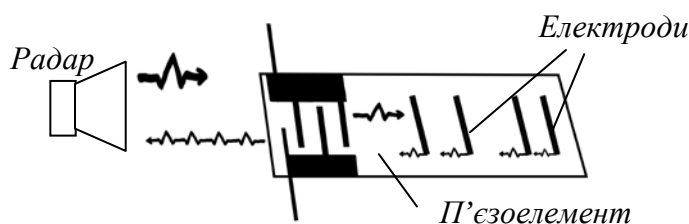


Рисунок 2 – П'єзоперетворювач як транспондер

Для ідентифікації датчика використовується принцип RFID-міток (Radio Frequency Identification), проте використовуються не мікроконтролери, а поверхнево акустичні хвилі на поверхні п'єзокерамічних елементів. Принцип роботи пристрою детально описаний в [4].

Проте для побудови розширеної системи складного технологічного процесу необхідно застосовувати велику кількість подібних датчиків, які повинні працювати в єдиній ідентифікаційній системі, в якій контролюються як живлення системи від стаціонарних джерел напруги (батареї/акумуляторне, від мережі, регенераційне), так і можливість спрацювання при відсутності стаціонарного живлення від енергії, що накопичується від п'єзоперетворювачів.

Для побудови ефективної системи попереднього визначення аварійності складних технологічних виробництв необхідно розробити математичну модель, яка буде враховувати усі необхідні показники, що й було **метою роботи**.

Виклад основного матеріалу. При побудові математичної моделі, в першу чергу, необхідно визначити вхідні, вихідні, а також

змінні складові, які необхідно враховувати при побудові математичної моделі системи раннього визначення аварійності складних технологічних процесів. Всі перераховані складові відображено на рисунку 3.

В системі до вхідних складових відносять:

T – кількість контрольних точок, в яких визначаються параметри вібрації, тобто точки можливого розміщення п'єзотранспондерів. У простому випадку це може відповідати кількості технологічного обладнання, проте в більшості випадків на обладнанні може бути розміщено декілька контрольних точок, $i = \overline{1, t}$;

P – кількість п'єзотранспондерів, $j = \overline{1, p}$;

$A_{пор}^j$ – порогове значення спрацювання п'єзотранспондера (визначення аварійності) для кожного j -го транспондера;

$E_{вх}^j$ – енергія, яка попередньо накопичена в системі (для кожного j -го транспондера).

До вихідних величин належать:

S – матриця значень можливих розміщень п'єзотранспондерів у контрольних точках;

t_j – час передачі аварійного сигналу j -м п'єзотранспондером;

$\mathbf{A}$ – вектор-стрічка фіксації передачі ідентифікаційного аварійного сигналу.

До змінних величин належать:

$t_{\text{нор}}$ – нормований (необхідний) час передачі аварійного сигналу;

V_i – параметри вібрації в i -й контрольній точці.

Вхідні складові:

T – кількість контрольних точок;
 P – кількість п'єзотранспондерів;
 $A_{\text{ПОР}}^j$ – порогове значення спрацювання п'єзотранспондера;
 $E_{\text{ВХ}}^j$ – енергія, яка попередньо накопичена в системі.

Модель системи раннього визначення аварійності складних технологічних процесів

Вихідні складові:

$\mathbf{S}$ – матриця значень можливих розміщень п'єзотранспондерів;
 t_j – час передачі аварійного сигналу;
 $\mathbf{A}$ – вектор-стрічка фіксації аварій

Змінні величини:

$t_{\text{нор}}$ – нормований час передачі аварійного сигналу; V_i – параметри вібрації

Рисунок 3 – Модель складу основних компонентів при побудові математичної моделі

У векторі-стрічці фіксації передачі ідентифікаційного аварійного сигналу $\mathbf{A}$ елементи мають значення:

- $a_j = 1$, якщо j -й п'єзотранспондер передає сигнал тривоги;

- $a_j = 0$, якщо j -й п'єзотранспондер не визначає аварійну ситуацію.

Для успішної передачі інформації про наявність аварії, тобто за умови набуття будь-яким із j транспондерів у точці i значення, більшого за $A_{\text{ПОР}}^j$, необхідно виконання умови

$$t_j \geq t_{\text{нор}}$$

для кожного j -го п'єзотранспондера.

Матриця значень можливих розміщень п'єзотранспондерів у контрольних точках

$$\mathbf{S} = [s_{ij}]_{i=1\dots t, j=1\dots p}$$

визначається за такою умовою:

- $s_{ij} = 1$, якщо j -й п'єзотранспондер знаходиться в i -й точці;

- $s_{ij} = 0$, якщо j -й п'єзотранспондер не знаходиться в i -й точці.

Головною метою побудови математичної моделі є визначення найефективнішого способу побудови системи раннього визначення аварійності складних технологічних процесів. Для цього необхідно розмістити P транспондерів у T контрольних точках таким чином, щоб спрацювання при аварії однозначно було виявлено і щоб аварійна інформація

була гарантовано передана віддаленому вузлу обробки інформації. Це досягається виконанням умови

$$\sum_{j=1}^p E_{\text{ВХ}}^j + \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^p E_j^i s_{ij} \rightarrow \min,$$

де E_j^i – енергія, яка генерується на j -му п'єзотранспондері під впливом вібрації в i -й контрольній точці та визначається виразом

$$E = d_{kl} F^2,$$

де F – сила, що діє на п'єзоелемент під впливом вібрації; d_{kl} – п'єзомодуль, де значення k та l визначаються напрямком вектора поляризації п'єзоелемента та сили, що діє на п'єзоелемент [3].

Враховуючи той факт, що енергія, яка генерується на п'єзоелементі, може бути меншою за енергію споживання елементами електронної схеми, для гарантованої передачі аварійного сигналу необхідно виконання умови для кожного j -го п'єзотранспондера:

$$E_{\text{ВХ}}^j + E_j^i \geq E_{\text{СПОЖ}}^j,$$

де $E_{\text{СПОЖ}}^j$ – енергія споживання електронними компонентами транспондера: мікропроцесорів, підсилювачів тощо.

Таким чином, математична модель системи попереднього визначення аварійності складних технологічних виробництв набуде вигляду

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{BX}^j + E_j^i \geq E_{СПОЖ}^j, \\ t_j \geq t_{нор}, \\ \sum_{j=1}^p E_{BX}^j + \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^p E_j^i s_{ij} \rightarrow \min, \end{array} \right.$$

Отримана математична модель системи попереднього визначення аварійності складних технологічних виробництв враховує основні складові системи: час передачі аварійної інформації, різні типи енергоспоживання тощо, що дає розробнику можливість будувати ефективні протиаварійні системи на базі визначення змін вібрації в роботі технологічних пристроїв.

Для перевірки адекватності отриманої математичної моделі було проведено кілька експериментів, де як джерело вібрації використано обертальний рух трьох робочих валів на базі двигунів ДПМ-20-НЗ-01, на валах яких були закріплені ексцентрики для збільшення вібрації двигунів [2]. Як п'єзотранспондери використано консольні п'єзоперетворювачі на основі біморфних п'єзоелементів 7BV-12-9 фірми muRata [5], що склалися з п'єзоелементів $\varnothing 9$ мм товщиною 0,12 мм та пластин з латуні $\varnothing 12$ мм товщиною 0,1 мм. На трьох п'єзотранспондерах було виконано електроди різних розмірів.

При проведенні експериментів для змін вібраційних впливів змінювалися частоти обертів робочих валів (змінюючи напруження, що подається на двигун) та маси закріплених ексцентриків. Для проведення розрахунків згідно з отриманою математичною моделлю було використано значення з [3, 6-8]. Електронну схему обробки даних з п'єзотранспондерів описано в [9, 10]. Проведені експерименти та порівняння теоретичних результатів з практичними виявило, що:

- при зміні вібраційної картини роботи кожного з трьох двигунів відбувалася однозначна фіксація цієї події відповідним п'єзотранспондером;

- накопиченої в п'єзотранспондері енергії вистачало на передачу аварійної інформації

протягом 1,5-5 с, що цілком достатньо для фіксації цієї події у віддаленому центрі обробки аварійної інформації;

- різниця між значеннями теоретичних розрахунків та експериментально отриманими даними була не більша, ніж на 23 %, що можна вважати цілком прийнятним, враховуючи складність розрахунків п'єзоперетворювачів [3].

Висновки. В роботі запропоновано математичну модель системи попереднього визначення аварійності складних технологічних виробництв, яка враховує основні складові системи: час передачі аварійної інформації, різні типи енергоспоживання тощо. Проведені експериментальні дослідження на базі виявлення змін вібрації при обертальних рухах трьох робочих валів показали адекватність отриманої математичної моделі, причому різниця між значеннями теоретичних розрахунків та експериментально отриманими даними була не більша, ніж на 23 %. Отримана математична модель може бути використана розробниками при побудові ефективних протиаварійних систем складних технологічних виробництв на базі визначення змін вібрації в роботі обладнання.

Список літератури

- [1] М. Г. Томенко, та О. О. Корецька, "Використання консольних п'єзокерамічних ідентифікаторів у вібродіагностиці при визначенні аварійних ситуацій потенційно небезпечних виробництв", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 4, с. 68-72, 2018.
- [2] М. Г. Томенко, та О. О. Корецька, "Підвищення надійності систем раннього визначення аварійності складних технологічних виробництв за допомогою безпровідних автономних п'єзотранспондерів", *Наукові праці Чорномор. нац. ун-ту ім. Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія». Серія: Комп'ютерні технології: наук.-метод. журн.* Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. П. Могили, вип. 305, т. 317, с. 122-126, 2018.
- [3] В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, и Е. В. Шарапова, *Пьезоэлектрические*

- датчики: монографія / под ред. В. М. Шарапова. Москва: Техносфера, 2006.
- [4] Система радиочастотной идентификации на поверхностных акустических волнах. Компоненты и технологии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://kite.ru/articles/rfid/2005_6_188.php
- [5] Murata. Innovator in electronics. 7bb-12-9. [Online]. Available: <https://www.murata.com/products/productdetail?partno=7BB-12-9>
- [6] М. П. Мусиенко, "Теоретические основы, методы и средства структурно-энергосилового преобразования на основе полиэлектродных пьезокерамических элементов для систем управления", дис. д-ра техн. наук: 05.13.05, Одесса, 2006.
- [7] М. П. Мусієнко, та О. О. Корецька, "Підвищення чутливості датчиків п'єзомагнітних тахометрів", на VII Між-нар. наук.-практ. конф. Датчики, прилади та системи – 2018, 17-21 верес. 2018 р. Черкаси: ЧДТУ, 2018, с. 9-12.
- [8] М. П. Мусієнко, та О. О. Корецька, "Консольні п'єзоелектричні накопичувачі вібрації для IoT пристроїв", Наукові праці Чорномор. нац. ун-ту ім. Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія». Серія: Комп'ютерні технології: наук.-метод. журн. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. П. Могили, вип. 296, т. 308, с. 139-145, 2017.
- [9] О. О. Корецька, "Моделі та засоби побудови енергоефективних IoT пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів", дис. канд. техн. наук: 05.13.05. Черкаси, 2019.
- [10] В. И. Бугаев, В. А. Дидук, и М. П. Мусиенко, "Сборщики энергии вибраций от Mide Technology приходят на смену батарейкам", *Новости электроники* (Москва), № 7 (141), с. 23-27, 2015.
- References**
- [1] M. G. Tomenko, and O. O. Koretska, "The use of console piezoceramic identifiers in vibration diagnostics at the identification of potentially hazardous industries", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu. Seria: Tekhnichni nauky*, no. 4, pp. 68-72, 2018 [in Ukrainian].
- [2] M. G. Tomenko, and O. O. Koretska, "Improving the reliability of early warning systems for complex technological industries with the help of non-wire stand-alone piezotransponders", *Naukovi pratsi Chornomor. nats. un-tu im. Petra Mohyly kompleksu «Kyievo-Mohylianska akade-miia»*. Seria: Kompiuterni tekhnolohii: sci.-method. journ. Mykolaiv: Vyd-vo ChNU im. P. Mohyly, iss. 305, vol. 317, pp. 122-126, 2018 [in Ukrainian].
- [3] V. M. Sharapov, M. P. Musienko, and V. V. Sharapova, *Piezoelectric sensors: monograph*, V. M. Sharapov, Ed. Moscow: Tehnosfera, 2006 [in Russian].
- [4] The radio frequency identification system on surface acoustic waves. Components and technologies. [Online]. Available: http://kite.ru/articles/rfid/2005_6_188.php
- [5] Murata. Innovator in electronics. 7bb-12-9. [Online]. Available: <https://www.murata.com/products/productdetail?partno=7BB-12-9>
- [6] M. P. Musiyenko, "Theoretical foundations, methods and means of structural-energy-power conversion based on polyelectrod piezoceramic elements for control systems": D. Sc. dis.: 05.13.05, Odesa, 2006 [in Russian].
- [7] M. P. Musienko, and O. O. Koretska, "The increase of sensitivity of piezomagnetic tachometers sensors". in *VII Int. Sci.-Pract. Conf. Datchyky, prylady ta systemy – 2018*, Cherkasy: ChDTU, 2018, Sept., 17-21, pp. 9-12 [in Ukrainian].
- [8] M. P. Musienko, and O. O. Koretska, "Console piezoelectric vibration drives for IoT devices", *Naukovi pratsi Chornomor. nats. un-tu im. Petra Mohyly kompleksu «Kyievo-Mohylianska akademiia»*. Seria: Kompiuterni tekhnolohii: sci.-method. journ. Mykolaiv: Vyd-vo ChNU im. P. Mohyly, iss. 296, vol. 308, pp. 139-145, 2017 [in Ukrainian].
- [9] O. O. Koretska, "Models and tools for constructing energy efficient IoT devices based on piezoceramic transducers", Ph. D. dis. in Engineering: 05.13.05, Cherkasy, 2019 [in Ukrainian].

- [10] V. I. Bugaev, V. A. Diduk, and M. P. Musienko, "Vibration energy collectors from Mide Technology replace batteries", *Novosti elektroniki* (Moscow), no. 7 (141), pp. 23-27, 2015 [in Russian].

M. G. Tomenko, Ph. D.,

e-mail: marina_tomenko@ukr.net

V. I. Tomenko, Ph D., associate professor

e-mail: firech1996@gmail.com

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes
of National University of Civil Defense of Ukraine
Onoprienko str., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF THE SYSTEM FOR EARLY DETERMINATION OF THE ACCIDENTS IN COMPLEX TECHNOLOGICAL MANUFACTURES BASED ON AUTONOMOUS PIEZOTRASPONDERS

For the early detection of emergencies and accidents on potentially hazardous or high-risk objects in complex technological processes, the changes in technical parameters of the equipment, such as vibration changes, can be used. To do this, we propose to use piezoceramic transducers. However, to build a complete system of complex technological process, it is necessary to use a large number of such sensors, which should work in a single identification system. To do this, the paper proposes a mathematical model of the system of preliminary determination of the accidents in complex technological industries, which is built on the principle of fixing the vibration changes of the equipment that precedes any accident. The model obtained takes into account: the number of control points at which vibration parameters are determined, the number of piezotransponders, the triggering threshold for each transponder, the energy previously accumulated in the system, the matrix of values of the possible placement of piezotransponders at control points, the time of transmission of the alarm, vector-tape of fixation of transmission of an alarm signal identification, the time of transmission of an alarm signal, parameters of vibration at control points.

In order to check the adequacy of the mathematical model obtained, several experiments have been performed where the rotational motion of the working shafts is used as the source of vibration. Console piezoelectric transducers based on bymorph piezoelectric elements are used as piezotransponders. When performing experiments to change the vibrational effects, the speed of rotation of the working shafts and the mass of the fixed eccentrics varies. The results of the experiments have shown that the energy accumulated due to vibration in the piezotransponder is sufficient for the transmission of emergency information, with the difference between the values of theoretical calculations and the experimentally obtained data not exceeding 23 %.

The resulting mathematical model can be used by developers to build effective anti-crash systems on complex technological productions of potentially hazardous or high-risk objects.

Keywords: mathematical model, emergency situations, piezotransponder, vibration, energy.

[0000-0002-0426-7891] **О. Б. Півень**, к.ф.-м.н., професор,
e-mail: pivolegbor@gmail.com

О. В. Бойко, магістрант
e-mail: boyko7894@gmail.com

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПОЛИВОМ ЗЕМЕЛЬНИХ ДІЛЯНОК ІЗ ОБМІНОМ ДАНИХ

Запропоновано мікроконтролерну систему під керуванням мобільного додатка для операційної системи Android, яка дає змогу здійснювати моніторинг та керування системою поливу земельних ділянок. Розроблено автономну систему поливу багатьох ділянок землі під керуванням багатьох мікроконтролерних систем на базі NodeMCU. Розроблена система автоматизованого поливу не потребує значних капіталовкладень і має оптимальне співвідношення ціна/якість, зручна в користуванні і має технічні можливості для збільшення кількості земельних ділянок для автоматизованого поливу. До складу автоматизованої системи поливу входять: сонячні панелі, частотний перетворювач, насос, ємність для води, електронний клапан для води, мікроконтролерна система і агрегати для поливу. Мікроконтролерна система складається з таких компонентів: плата з мікроконтролером, датчики температури повітря та вологості ґрунту, годинник реального часу, датчики верхнього та нижнього рівня води, реле керування роботою водяного насоса та електромагнітним клапаном для води. Для зв'язку між мікроконтролерною системою та користувачем використовується спеціальний протокол MQTT. Для управління поливною системою та її моніторингу використовується мобільний додаток MQTT Dashboard, розроблений для операційної системи Android. З розробленого мобільного додатка можна керувати чотирма мікроконтролерними системами. Під керуванням однієї мікроконтролерної системи може знаходитися п'ять ділянок поливу. Керування з мобільного додатка п'ятьма і більше мікроконтролерними системами потребує додаткової оплати за обслуговування сервером.

Ключові слова: полив, ґрунт, сонячна енергетика, мікроконтролерна система, мобільний додаток.

Вступ. Площа зрошуваних земель в Україні становить 2,45 млн. га, з яких у зоні Степу знаходиться 80 % земель. Більшість закритих зрошувальних систем виконана зі сталевих і азбестоцементних трубопроводів, загальна довжина яких відповідно становить 20 і 18 тис. км. Зрошення здійснюється найбільш поширеним способом поливу – дощуванням за допомогою широкозахватних дощувальних машин [1].

Зрошення або іригація – це комплекс господарських, інженерних, організаційних заходів, спрямованих на штучне зволоження ґрунту з метою створення сприятливих умов для росту п розвитку рослин.

Зрошення має забезпечувати оптимальний водний, поживний, повітряний, тепловий, сольовий і мікробіологічний режими ґрунтів. На території України зрошення використовується в Лісостепу тільки для найбільш вимог-

ливих і економічно вигідних культур, у Степу – зрошення масштабне, а в Сухому Степу – суцільне [2-3].

Режим зрошення – це правильно визначена й розподілена в часі (вегетаційному періоді) кількість зрошуваної води (число, норми й строки поливів), що забезпечує оптимальний для даної культури водний режим кореневмісного шару ґрунту для певних конкретних природних і агротехнічних умов.

Установлюється розрахунком відповідно до біологічних особливостей рослин, кліматичних, ґрунтових і гідрогеологічних умов зрошуваної ділянки, способу і техніки поливу, технології вирощування рослин тощо [3].

Режим зрошення буває двох типів:

- проектний (розрахунковий) – його розробляють при проектуванні зрошувальних систем. Від його показників залежать: розміри каналів, трубопроводів, параметри зрошуваль-

ної мережі, затрати на її будівництво та експлуатацію:

- експлуатаційний – його розробляють для існуючих меліоративних систем, для конкретних динамічних умов вегетаційного періоду, виходячи з погодних показників.

Для здійснення поливу сільськогосподарських земель, які знаходяться відносно далеко від ліній електропередач, доцільніше використовувати альтернативні джерела енергії.

Зазвичай устаткування для поливу сільськогосподарських полів знаходиться безпосередньо на полі. Для живлення насосних систем та управління поливом потрібна електроенергія, яку зазвичай потрібно передавати за допомогою лінії електропередач. Інколи прокладання ліній є дуже затратним і неефективним, оскільки полив здійснюється лише в певний період року.

В остання десятиліття сонячна енергетика активно розвивається в світовій промисловості і побуті. Завдяки розвитку нових технологій і запровадженню субсидованих тарифів («зелених» тарифів) сонячні енергетичні системи і пристрої дають змогу здійснювати ефективний виробіток і економію електричної енергії через природні, практично невичерпні можливості світлового випромінювання Сонця із практично відсутнім впливом на екологічний стан довкілля [4-5]. Розробки і промислова продукція в цій галузі на сьогодні дуже активно розвиваються в таких країнах, як Німеччина, США, Великобританія, Японія, Корея, Китай, а також Україна [6].

В Україні найбільш ефективним періодом для експлуатації сонячних модулів є термін від п'яти до семи місяців, що залежить від регіону з півночі на південь. Середньорічна кількість електроенергії, котру отримують регіони нашої країни від використання енергії сонця, становить приблизно 1200 кВт год. на квадратний метр [7].

Географічні умови розташування України дають можливість отримувати потрібну кількість сонячної енергії протягом усього року. Головним завданням при створенні систем автономного електроживлення на основі використання сонячної енергії є конфігурація системи залежно від потрібного режиму автономного електропостачання об'єкта.

Використання такого альтернативного джерела енергії, як Сонце дозволить зекономити велику кількість як традиційних джерел енергії, так і фінансових коштів [8].

Для налаштування роботи і моніторингу поливної системи необхідно створити відповідну систему та забезпечити зв'язок між користувачем та системою поливу. Тому створення ефективної і низьковитратної автономної системи поливу є актуальною задачею.

Узагальнений вигляд системи поливу зображено на рисунку 1 [9].

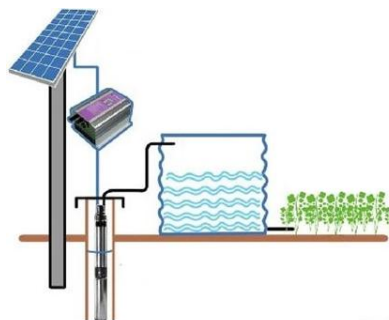


Рисунок 1 – Узагальнений вигляд системи поливу

Мета роботи. Розробити автоматизовану поливну систему, яка дасть змогу проводити моніторинг та управління поливною системою за допомогою мобільного телефону.

Задачі роботи. Пріоритетними задачами роботи є: пошук та порівняння з аналогічними системами, підбір комплектуючих системи, побудова схеми системи, написання програми для мікроконтролера, створення та налаштування зв'язку між поливною системою та мобільним телефоном, налаштування мобільного додатка.

Розв'язання поставленої задачі. Запропоновано автоматизовану систему поливу, яка має такі основні компоненти: сонячні панелі, частотний перетворювач, насос, водонапірна башта, електронний клапан для води, мікроконтролерна система і безпосередньо агрегати для поливу.

Всі компоненти цієї системи можуть бути варіативними і вибираються залежно від потрібних потужностей. Сама ж мікроконтролерна система буде універсальною для будь-якого набору компонентів.

Мікроконтролерна система складається з таких компонентів: плата з мікроконтролером, датчики температури повітря та вологості ґрунту, годинник реального часу, датчики верхнього та нижнього рівня води, реле керування роботою водяного насоса та електромагнітним клапаном для води.

Загальну схему мікроконтролерної системи зображено на рисунку 2.

Для реалізації цього проекту було вибрано мікроконтролерну систему на базі NodeMCU. Вибір цієї мікроконтролерної плати здійснений з урахуванням усіх необхідних потреб для проекту та гарним співвідношенням ціна-якість даного продукту. Головною перевагою цієї плати є вбудований WiFi-модуль, який не потрібно з'єднувати і налаштовувати для спільної роботи з іншими платами. Крім цього, плата поставляється з прошивкою NodeMCU, що дозволяє програмувати її за допомогою програмного середовища Arduino IDE [10].



Рисунок 2 – Загальна схема мікроконтролерної системи

Система поливу використовує такі датчики: 1) датчики верхнього та нижнього рівнів води будуть передавати дані про стан наповнення ємності для води; 2) датчик модуля реального часу DS3231, оскільки він доволі простий та зручний у використанні [11]; 3) датчик температури DS18B20; 4) ємнісний датчик вологості ґрунту від DFRobot. Цей датчик підключається своїм інформаційним виходом до аналогового входу A0 на платі. В результаті отримуємо значення, яке потрібно перевести у відсотки. Для цього необхідно провести калібрування цього датчика. Спочатку потрібно заміряти показники датчика без контакту з водою, потім заміряти показники датчика, який знаходиться у воді [12]. Далі

виконується розрахунок вологості у відсотках за формулою

$$w = \frac{w_{\text{зн}} - w_{\text{сух}}}{w_{\text{вод}} - w_{\text{сух}}} * 100, \quad (1)$$

де $w_{\text{зн}}$ – вимірюване значення датчика;

$w_{\text{сух}}$ – значення датчика без контакту з водою;

$w_{\text{вод}}$ – значення датчика, який знаходиться у воді.

Також використовуються реле для ввімкнення насоса, розраховане на 380 В, та реле для ввімкнення клапана поливної системи, розраховане на 12 В.

Для забезпечення зв'язку між користувачем і системою управління та моніторингу поливу використовується мережа Інтернет. В цьому проекті використовується плата NodeMCU на базі чіпа ESP8266 (версія ESP12E), який є UART-WiFi модулем, що забезпечує зв'язок з мережею Інтернет за допомогою WiFi-роутера [13]. WiFi-роутер встановлюється на відстані 50-100 м від мікроконтролерної системи. Для зв'язку між мікроконтролерною системою та користувачем використовується спеціальний протокол MQTT. MQTT, або Message Queue Telemetry Transport – це легкий, компактний і відкритий протокол обміну даними, створений для передачі даних на віддалених локаціях, де потрібний невеликий розмір коду і є обмеження по пропускній здатності каналу. Перераховані вище переваги дають можливість застосовувати MQTT у системах M2M (Машинно-Машинна взаємодія) і IoT (Промисловий Інтернет речей) [14].

Обмін повідомленнями в протоколі MQTT здійснюється між клієнтом (client), який може бути відправником або отримувачем (publisher / subscriber) повідомлень, і брокером (broker) повідомлень.

Відправник передає дані на MQTT брокер, вказуючи в повідомленні певну тему, топік (topic). Отримувачі можуть отримувати різні дані від багатьох відправників залежно від підписки на відповідні топіки.

Нами використано зручний сервіс www.cloudmqtt.com з безкоштовним тарифним планом (Cute Cat), який повністю покриває потреби для реалізації цього проекту [14-15].

Для отримання власного сервера потрібно пройти реєстрацію на сайті і отримати необхідні дані для доступу до сервера, а саме

назву сервера, ім'я користувача, пароль користувача, номер порту та кількість клієнтів. Для налаштування клієнтів потрібно використати ці дані в коді програми (для мікроконтролерної системи).

Для можливості управління поливною системою та її моніторингу використовується мобільний додаток MQTT Dashboard, розроблений для операційної системи Android. При створенні нового клієнта в цьому додатку потрібно ввести необхідні дані для доступу до сервера та налаштувати відповідні топіки отримувача та відправника для цього клієнта. На рисунку 3 зображено загальний вигляд мобільного додатка MQTT Dashboard.

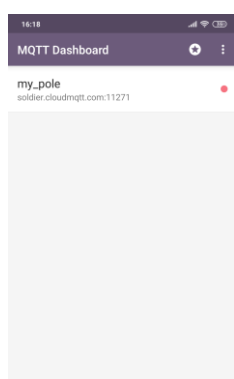


Рисунок 3 – Загальний вигляд мобільного додатка MQTT Dashboard

Для налаштування мікроконтролерної системи на роботу з відповідним MQTT сервером потрібно використати спеціальну бібліотеку «pubsubclient.h» і вказати необхідні дані для доступу до сервера та за допомогою команд з цієї бібліотеки налаштувати відповідні топіки отримувача та відправника для цього клієнта [15].

Алгоритм керування та моніторингу системи поливу. Спочатку відбувається підключення мікроконтролерної системи до бездротової мережі Wifi, параметри якої (назва і пароль) попередньо записані в коді програми. Потім здійснюється підключення мікроконтролерної системи до MQTT сервера, параметри якого (назва сервера і номер порту), а також логін і пароль користувача отримано на сервісі MQTT серверів після реєстрації.

Після вдалого підключення до MQTT сервера відбувається отримання показників датчиків.

Зчитування значення температури та виведення в градусах Цельсія відбувається за допомогою спеціальних бібліотек

«OneWire.h» та «DallasTemperature.h», які призначені для роботи з датчиком температури DS18B20. Це значення температури відправляється до MQTT сервера з відповідним тегом.

Зчитування значення вологості ґрунту та виведення у відсотках відбувається за допомогою спеціальної функції, яка перетворює значення на аналоговому вході на значення вологості у відсотках. Ця функція використовує значення, які потрібно вказати після проведення калібрування цього датчика, зокрема значення вологості ґрунту до MQTT сервера з відповідним тегом.

Далі відбувається зчитування стану датчиків верхнього та нижнього рівнів води, які встановлені в ємності для води зверху і знизу відповідно. В результаті ми отримуємо значення, на основі яких буде здійснюватися регуляція наповнення ємності для води та управління поливом. Якщо датчик рівня контактує з водою, то значення, яке отримає мікроконтролерна система, буде «0», в іншому разі значення буде протилежне. В результаті отриманих даних відправляється звіт про наповнення ємності для води до MQTT сервера з відповідним тегом.

Залежно від наповнення ємності для води, а також встановлених користувачем норми поливу та часу початку поливу відбувається початок поливу та розраховується час закінчення поливу.

Поточний час зчитується з модуля реального часу DS3231 за допомогою спеціальних бібліотек «Wire.h» та «RtcDS3231.h». За допомогою спеціальних функцій цих бібліотек здійснюється зчитування конкретних значень часу (години, хвилини, секунди) окремо.

Зчитування даних з MQTT сервера відбувається при надходженні відповідних даних від мобільного телефону до MQTT сервера з топіками, на які підписана мікроконтролерна система.

Залежно від назви топіка інформація, що надходить разом з назвою топіка, обробляється по-різному. Для топіка, який несе інформацію про норму поливу, відбувається запис у пам'ять системи значення норми поливу і за допомогою заздалегідь вказаного значення пропускну здатності електронного клапана для води здійснюється розрахунок тривалості поливу в хвилинах. Це значення використовується для розрахунку часу закінчення поливу.

Для топіка, який несе інформацію про час початку поливу, відбувається запис у пам'ять системи значення годин та хвилин початку поливу, які використовуються для розрахунку часу кінця поливу.

Блок-схема алгоритму керування та моніторингу системи поливу зображена на рисунку 4.

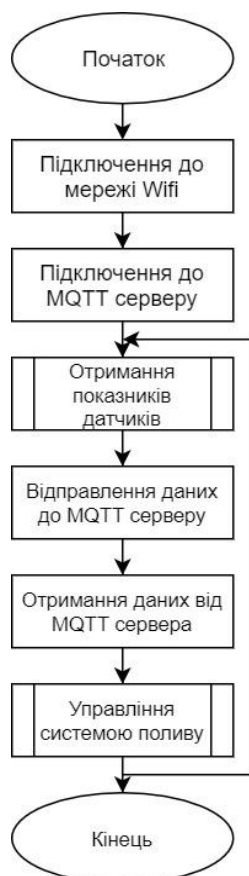


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритму керування та моніторингу системи поливу

Інструкція користувача. Після встановлення безкоштовного додатка MQTT Dashboard на власний телефон користувача з системою Android та його запуску потрібно додати нове з'єднання, вказавши дані сервера, порту, логін та пароль, які вказані на MQTT сервісі www.cloudmqtt.com. Заповнення необхідних даних зображено на рисунку 5.

Після цього можна додавати значення, які клієнт буде отримувати. При створенні нового значення потрібно вказати його назву, топик, розмірність тощо. Створення нового значення для отримання повідомлень зображено на рисунку 6.

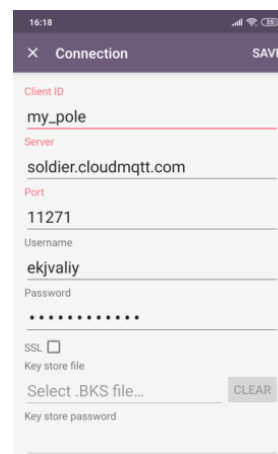


Рисунок 5 – Створення нового з'єднання в додатку MQTT Dashboard

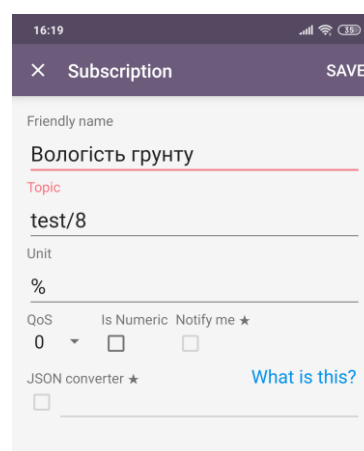


Рисунок 6 – Створення нового значення для отримання повідомлень

Також можна додавати значення, які клієнт має відправляти до сервера. При створенні нового значення потрібно обрати його тип. Доступні типи значень: текст (Text), кнопка (Button), перемикач (Switch), слайдер (SeekBar), комбінований список (ComboBox), палітра кольорів (ColorPicker), кнопкова панель (MultiButtons), годинник (TimePicker). Для кожного типу існують відповідні параметри. Створення нового значення для відправлення повідомлень до сервера на прикладі слайдера (SeekBar) зображено на рисунку 7.

Встановлення часу в значення годинника (TimePicker) зображено на рисунку 8.

Після додавання всіх необхідних значень для відправлення та прийому повідомлень від сервера формуються дві вкладки в додатку MQTT Dashboard: SUBSCRIBE (значення для прийому повідомлень від сервера) та PUBLISH (значення для відправлення пові-

домлень до сервера). Приклад вигляду вкладки SUBSCRIBE зображено на рисунку 9.

Приклад вигляду вкладки PUBLISH зображено на рисунку 10.

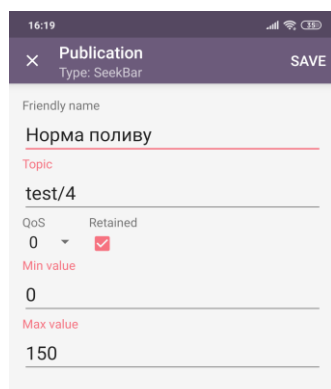


Рисунок 7 – Створення нового значення для відправлення повідомлень до сервера типу слайдер

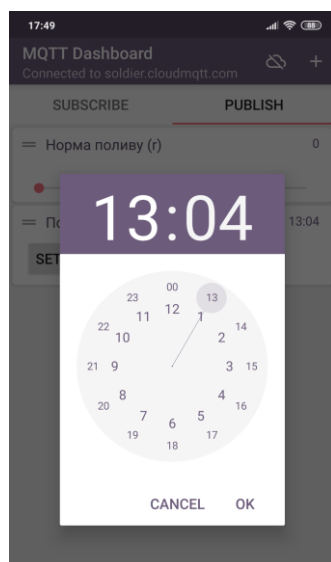


Рисунок 8 – Встановлення часу в значення годинника

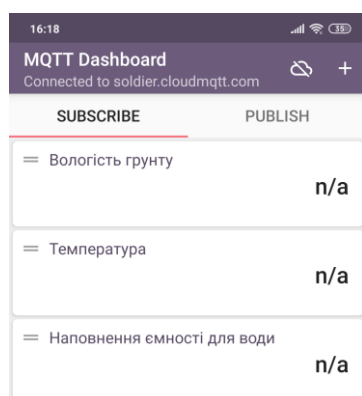


Рисунок 9 – Вигляд вкладки SUBSCRIBE

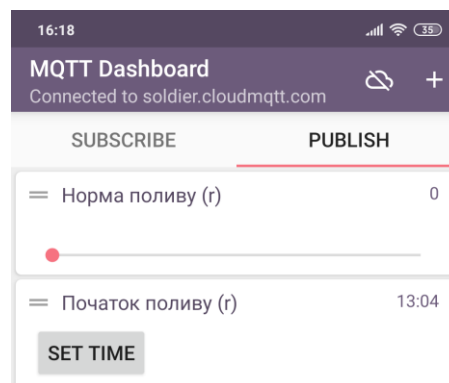


Рисунок 10 – Вигляд вкладки PUBLISH

З мобільного додатка можна керувати чотирма мікроконтролерними системами. Одна мікроконтролерна система може керувати п'ятьма ділянками поливу. Керування п'ятьма і більше мікроконтролерними системами потребує додаткової оплати за обслуговування сервером.

В Україні існують аналогічні системи від компаній Аванте та Terplodom. В результаті оцінювання та порівняння цих двох систем було зроблено висновок, що вони в цілому досить схожі за своєю структурою та принципом роботи. Основні відмінності системи, яку було розроблено, від цих систем є такими:

- відносно дешева мікроконтролерна система;
- відносно низька ціна на компоненти систем управління та моніторингу;
- можливість розділити основне поле на кілька частин та здійснювати полив цих частин окремо одна від одної;
- керування та моніторинг поливу здійснюються користувачем за допомогою додатка на мобільній операційній системі Android, який є доступним, безкоштовним і простим у використанні.

Висновки. Розроблено автономну систему поливу багатьох ділянок землі під керуванням багатьох мікроконтролерних систем на базі NodeMCU. Керування автономною системою поливу здійснюється з мобільного додатка MQTT Dashboard для операційної системи Android. Запровадження автономної системи поливу дасть змогу збільшити врожайність сільськогосподарських культур на полях, які знаходяться на значній відстані від ліній електропередач, а також управляти поливом у режимі реального часу і здійснювати моніторинг та контроль за поливом. Також перевагою системи є зниження її вартості.

Список літератури

- [1] В. А. Гурін, М. П. Степаненко, та М. Г. Степаненко, *Технологія зрошування: навч. посіб.* Рівне, Україна: НУВГП, 2013.
- [2] Г. А. Мисик, та Б. Б. Куліковський, *Основи меліорації і ландшафтознавства: посібник для студ. і викл. аграрних закл. вищ. освіти І–ІІ рівня акредит.* Київ, Україна: ІНКІОС, 2005.
- [3] Ю. В. Задорожний, *Сільськогосподарська меліорація: курс лекцій.* Миколаїв, Україна: МНАУ, 2014.
- [4] Г. Г. Півняк, та Ф. П. Шкрабець, *Альтернативна енергетика в Україні: монографія / М-во освіти і науки України, Держ. вищий навч. закл. «Нац. гірн. ун-т».* Дніпропетровськ, Україна: НГУ, 2013. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/3498>
- [5] В. И. Виссарионов, *Солнечная энергетика: учеб. пособие для вузов / под ред. В. И. Виссарионова.* Москва, Россия: Изд. дом МЭИ, 2008.
- [6] В. П. Кожем'яко, О. Г. Домбровський, та В. І. Маліновський, "Оптимізація проектів будівництва сонячних електростанцій із врахуванням базових техніко-економічних показників", *ОЕІЕТ*, vol. 30, № 2, с. 66-81, 2016.
- [7] П. П. Гаврилко, Р. С. Чорний, та Я. В. Шевчук, "Розвиток та впровадження сонячної енергетики в домогосподарствах України", *Міжнародний науковий журнал*, № 10 (20), 2 т., с. 66-71, 2016.
- [8] О. О. Казіміров, К. В. Власов, А. І. Куртов, та А. І. Потіхенський, "Дослідження можливостей використання сонячної енергії для автономного живлення об'єкту", *Системи обробки інформації*, № 1 (147), с. 58-61, 2017.
- [9] Солнечные батареи для орошения и капельного полива автономных и удаленных полей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://avante.com.ua/solnechnye-batarei-dlya-orozeniya-i-kapelnogo-poliva-autonomnykh-i-udalennykh-poley/>
- [10] В. А. Петин, *Создание умного дома на базе Ардуино.* Москва, Россия: ДМК Пресс, 2018.
- [11] В. А. Петин, и А. А. Биняковский, *Практическая энциклопедия Arduino.* Москва, Россия: ДМК Пресс, 2016.
- [12] Capacitive Soil Moisture Sensor SKU SEN0193 [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193
- [13] Marco Schwartz. *Internet of Things with ESP8266.* Packt Publishing Ltd, 2016.
- [14] Азы программирования ESP8266 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://wikihandbk.com/wiki/ESP8266:Модули/Азы_программирования_ESP8266
- [15] Проекты умного дома и интернета вещей на основе Arduino и NodeMCU [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arduino-kit.ru/blogs/blog/smart_home_projects

References

- [1] V. A. Gurin, M. P. Stepanenko, and M. G. Stepanenko, *Irrigation technology: textbook.* Rivne, Ukraine: NUVGP, 2013 [in Ukrainian].
- [2] G. A. Misik, and B. B. Kulikovsky, *Fundamentals of land reclamation and landscape science: a guide for students and teachers of agricultural institutions of higher education of the I-II level of accreditation.* Kyiv, Ukraine: INCOS, 2005 [in Ukrainian].
- [3] Yu. V. Zadorozhny, *Agricultural land reclamation: a lecture course.* Mykolaiv, Ukraine: MNAU, 2014 [in Ukrainian].
- [4] G. G. Pivnyak, and F. P. Shkrabets, *Alternative energy in Ukraine: monograph / Ministry of Education and Science of Ukraine, State Higher Educational Institution "National Mining University".* Dnipropetrovsk, Ukraine: NHU, 2013. [Online]. Available: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/3498>
- [5] V. I. Vissarionov, *Solar energy: textbook for Universities,* V. I. Vissarionov, Ed. Moscow, Russia: MEI Publ. House, 2008 [in Russian].
- [6] V. P. Kozhemyako, O. G. Dombrovsky, and V. I. Malinovsky, "Optimization of solar power plant construction projects taking into account basic technical and economic indicators", *OEIET*, vol 30, no. 2, pp. 66-81, 2016 [in Ukrainian].
- [7] P. P. Gavrillo, R. S. Chorny, and Ya. V. Shevchuk, "Development and implementation of solar energy in Ukrainian households", *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal*, no. 10 (20), 2 vol., pp. 66-71, 2016 [in Ukrainian].
- [8] O. O. Kazimirov, K. V. Vlasov, A. I. Kurtov, and A. I. Potikhenskyi, "Investigation of

- the possibilities of solar energy use for autonomous power supply of the object", *Systemy obrobky informatsii*, no. 1 (147), pp. 58-61, 2017 [in Ukrainian].
- [9] Solar batteries for irrigation and drip irrigation of autonomous and remote fields. [Online]. Available: <http://avante.com.ua/solnechnye-batarei-dlya-orosheniya-i-kapel'nogo-poliva-avtonomnykh-i-udalennykh-poley/>
- [10] V. A. Petin, *Creating a smart home based on Arduino*. Moscow, Russia: DMK Press, 2018 [in Russian].
- [11] V. A. Petin, and A. A. Binyakovsky, *Arduino practical encyclopedia*. Moscow, Russia: DMK Press, 2016 [in Russian].
- [12] Capacitive Soil Moisture Sensor SKU SEN0193 [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193
- [13] Marco Schwartz. *Internet of Things with ESP8266*. Packt Publishing Ltd, 2016.
- [14] The basics of ESP8266 programming. [Online]. Available: http://wikihandbk.com/wiki/ESP8266:Модули/Азы_программирования_ESP8266
- [15] Smart home and internet of things projects based on Arduino and NodeMCU. [Online]. Available: https://arduino-kit.ru/blogs/blog/smart_home_projects

O. B. Piven, Ph. D., professor,
e-mail: pivolegbor@gmail.com

O. V. Boyko, undergraduate
e-mail: boyko7894@gmail.com

Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

MICROCONTROLLER CONTROL SYSTEM OF LAND PLOTS IRRIGATION WITH DATA EXCHANGE

A microcontroller system running the mobile application for the Android operating system, which allows monitoring and control of the land plots irrigation system, is offered. An autonomous irrigation system for many plots of land under the control of many microcontroller systems based on NodeMCU has been developed. In the context of global warming, the development of efficient and relatively inexpensive systems of automated irrigation of land for the full cultivation of different crops is becoming relevant. Automatic irrigation of crops allows to increase their productivity considerably at rather small expenses. The developed system of automated irrigation does not require significant investments and has the optimum price / quality ratio, is easy to use and has technical capabilities to increase the number of land plots for automated irrigation. The automated irrigation system includes: solar panels, frequency converter, pump, water tank, electronic water valve, microcontroller system and irrigation units. The microcontroller system consists of the following components: microcontroller board, air temperature and humidity sensors, real time clock, upper and lower water level sensors, control relay for water pump and solenoid valve for water. Special MQTT protocol is used to communicate with the microcontroller system and the user. This protocol is commonly used in M2M (Machine-Machine Interaction) and IIoT (Industrial Internet of Things) systems. The MQTT Dashboard mobile application developed for the Android operating system is used to control and monitor the irrigation system. With the developed mobile application, it is possible to control four microcontroller systems. Up to five irrigation sections can be controlled by one microcontroller system. The control of five or more microcontroller systems from a mobile application requires an additional fee for server maintenance.

Keywords: irrigation, soil, solar power, microcontroller system, mobile application.

УДК 004.925

[0000-0003-3841-7373] **Е. Е. Федоров¹**, д.т.н., доцент, профессор,
e-mail: fedorovee75@ukr.net
[0000-0001-6904-1845] **И. В. Ярош²**, старший преподаватель,
e-mail: iryna.yarosh@donntu.edu.ua
[0000-0001-6243-0805] **Т. А. Черняк²**, ассистент,
e-mail: tetiana.cherniak@donntu.edu.ua

¹Черкасский государственный технологический университет

б-р Шевченко, 460, г. Черкассы, 18006, Украина

²Донецкий национальный технический университет

пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, 85300, Украина

НЕЙРОСЕТЬ TDNN ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКИ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

В статье рассмотрены и проанализированы существующие методы диагностики шахтного вентилятора. Исходя из выделенных основных преимуществ и недостатков указанных методов, разработан и реализован нейросетевой метод диагностики состояния вентиляторной установки главного проветривания. В основу данного метода заложена предложенная нейронная сеть TDNN, архитектура которой определена на основе проведенных экспериментальных исследований. Для ускорения процесса обучения авторской нейронной сети предложен пакетный режим обучения. Для оценки эффективности предложенного метода диагностики состояния вентиляторной установки главного проветривания была проведена серия численных исследований, результаты которых доказывают эффективность предложенной авторами нейронной сети и ее архитектуры.

Ключевые слова: диагностика, вентиляторная установка главного проветривания, нейронная сеть, TDNN, производственная безопасность, пакетный режим обучения.

У статті розглянуто та проаналізовано існуючі методи діагностики шахтного вентилятора. Виходячи з виділених основних переваг і недоліків зазначених методів, розроблено та реалізовано нейромережевий метод діагностики стану вентиляторної установки головного провітрювання. В основу цього методу закладено запропоновану нейронну мережу TDNN, що пов'язано з забезпеченням нею найліпшої точності діагностики. В роботі була визначена структура моделі нейромережі, обрана та обґрунтована ознака для здійснення оцінки її ефективності, виконане навчання з використанням редукції при додаванні за навчальною множиною. Для прискорення процесу навчання авторської нейронної мережі запропоновано пакетний режим навчання; необхідно відмітити збільшення швидкості прямого і зворотного ходу при його використанні. Архітектура вказаної діагностичної моделі визначена на основі проведених експериментальних досліджень. Було виявлено, що збільшення кількості модулів вхідного шару нейромережі супроводжується зменшенням значення середньоквадратичної помилки діагностики. Отримані результати свідчать про недоцільність використання понад шістнадцяти модулів у вхідному шарі мережі. При наявності більшої кількості модулів буде спостерігатися досить незначна зміна значення отриманої помилки. Адекватність наведеної моделі характеризується вибором значень параметрів, що забезпечують мінімізацію показника середньоквадратичної помилки – мінімізацію різниці між виходом моделі і бажаним виходом. Обрана авторами нейромережа з часовою затримкою дозволяє досягти діагностичний результат з найменшим відхиленням і забезпечити підвищення якості результатів процесу діагностики вентилятора. Запропонований підхід може бути застосований в різних інтелектуальних системах, що забезпечують діагностичні процеси різного характеру.

Ключові слова: діагностика, вентиляторна установка головного провітрювання, нейронна мережа, TDNN, виробнича безпека, пакетний режим навчання.

Постановка проблемы. Одной из важнейших проблем, которые существуют сегодня в горнодобывающей промышленности, является повышение безопасности отрасли. Проблема аварийного оснащения горной техники вызвана стремительным увеличением доли истощения ее физических ресурсов. На сегодняшний день

новейшие компьютерные диагностические системы [1-6] не обеспечивают своевременную и комплексную диагностику с одновременным учетом нескольких параметров. Это приводит к тому, что меры, направленные на предотвращение или уменьшение последствий аварий, могут быть приняты слишком поздно или без учета всех необходимых аспектов и факторов. Среди имеющегося оборудования шахты одну из важнейших ролей играют вентиляторные установки главного проветривания (ВУГП) [7-8], обеспечивающие нормальную жизнедеятельность персонала шахты. Именно поэтому немаловажной и актуальной является деятельность, посвященная разработке и всецелому исследованию интеллектуальных методов диагностики ВУГП.

Цель исследования заключается в разработке методики углубленного изучения процесса изменения состояния ВУГП.

Задачи исследования, поставленные и решенные для достижения цели:

- проанализировать существующие методы диагностики;
- разработать искусственную нейронную сеть для диагностики; определить структуры ее модели;
- выбрать критерий оценки эффективности нейросетевой диагностической модели;
- выполнить обучение модели искусственной нейронной сети;
- провести численные исследования.

Изложение основного материала. До нынешних дней предложено достаточное число способов и подходов как средств для вибродиагностики. Следует выделить методы вычисления: пикового коэффициента; эксцесса; среднеквадратичного значения; огибающего спектра. Работа [1] содержит результаты сравнения характеристик приведенных методов, основываясь на которых огибающий спектральный метод признан как наиболее точный.

Использование нейронных сетей во время выполнения диагностики дает ощутимые преимущества:

- с использованием готовых моделей анализируются и изучаются взаимосвязи между факторами;
- отсутствует потребность в предположениях относительно распределения имеющихся факторов;
- предварительная информация о факторах может отсутствовать;

– исходные данные могут быть в сильной степени коррелированными, неполными или зашумленными;

– возможно прослеживание высокой степени нелинейности во время анализа;

– прослеживается быстрое построение модели; наблюдается высокая адаптивность;

– возможна ситуация проведения многофакторного анализа системы;

– отсутствует необходимость в полном переборе всех возможных моделей;

– возможен процесс анализа систем с неоднородными факторами.

Учитывая вышеуказанные моменты и преимущества, в статье будет использоваться метод диагностики, базирующийся на использовании нейронной сети.

Традиционно используемыми для исследования изменений во времени спектра огибающей являются динамические искусственные нейронные сети (с задержкой во времени):

– динамическая, рекуррентная двухслойная сеть, построенная на базе MLP, – нейросеть Джордона (JNN) [9, 10];

– динамическая, рекуррентная двухслойная сеть, построенная на базе MLP, – нейросеть Элмана (ENN) / простая рекуррентная сеть (SRN) [11, 12];

– динамическая, рекуррентная многослойная сеть, построенная на базе MLP, – рекуррентный многослойный персептрон (RMLP) [13, 14];

– динамическая, нереккуррентная многослойная сеть, построенная на базе MLP, – нейронная сеть с временной задержкой (TDNN) [15, 16].

В таблице 1 показаны характеристики динамических сетей.

Таблица 1 – Результаты экспериментального исследования нейронных сетей

Сеть \ Критерий	RMLP	JNN	ENN (SRN)	TDNN
Точность диагностики	90	80	85	95

Для решения задач квалификации выбирается сеть TDNN, так как она обеспечивает наилучшую и наибольшую диагностическую точность. Пример структуры TDNN представлен на рисунке 1.

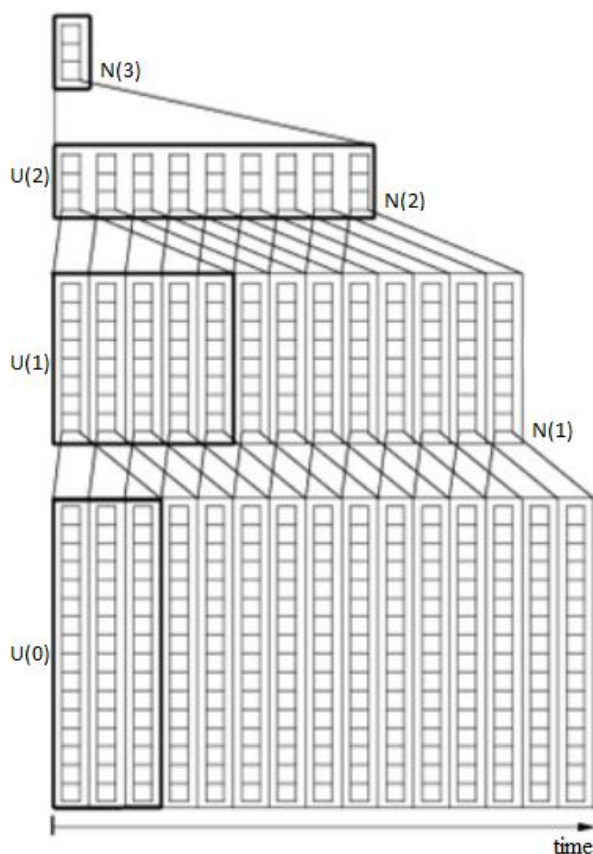


Рисунок 1 – Нейронная сеть с временной задержкой (TDNN)

Входной слой представляет собой набор модулей, каждый из которых содержит спектр огибающей в определенный момент времени.

Два скрытых слоя также представляют собой наборы модулей.

Выходной слой содержит нейроны, соответствующие классу состояния ВУГП.

Представление модели TDNN:

$$y^{(0)} = x,$$

$$y_{ml}^{(1)} = f^{(1)}(b_{iml}^{(1)} + \sum_{i=1}^{l+M^{(0)}} \sum_{j=1}^{N^{(0)}} w_{ijml}^{(1)} y_{ij}^{(0)}), \quad (1)$$

где $m \in \overline{1, U^{(1)}}$, $l \in \overline{1, N^{(1)}}$.

$$y_{ml}^{(2)} = f^{(2)}(b_{jml}^{(2)} + \sum_{j=1}^{l+M^{(1)}} \sum_{i=1}^{U^{(1)}} w_{ijml}^{(2)} y_{ij}^{(1)}), \quad (2)$$

где $m \in \overline{1, U^{(2)}}$, $l \in \overline{1, N^{(2)}}$.

$$y_{li}^{(3)} = f^{(3)}(b_{ili}^{(3)} + \sum_{j=1}^{N^{(2)}} w_{ijli}^{(3)} y_{ij}^{(2)}), \quad (3)$$

где $i \in \overline{1, N^{(3)}}$,

$N^{(k)}$ – количество нейронов в k -м слое,

$w_{ijml}^{(k)}$ – вес связи от j -го нейрона i -го модуля к l -му нейрону m -го модуля на k -м слое,

$y_{ml}^{(k)}$ – выход j -го нейрона m -го модуля на k -м слое,

$f^{(k)}$ – активационная функция нейронов k -го слоя,

$M^{(k)}$ – задержка в k -м слое,

$U^{(k)}$ – число модулей в k -м слое.

При этом выполняются равенства:

$$N^{(1)} = U^{(0)} - M^{(0)}, \quad (4)$$

$$N^{(2)} = U^{(0)} - (M^{(0)} + M^{(1)}), \quad (5)$$

$$U^{(2)} = N^{(3)}. \quad (6)$$

На основе численных результатов работ [15, 16] авторами данной статьи установлено следующее соотношение, характеризующее некую зависимость:

$$U^{(0)} = 2 \cdot U^{(1)}. \quad (7)$$

Для определения структуры модели TDNN, т. е. определения числа модулей во входном слое (число модулей в скрытых слоях вычисляется из равенств (6)-(7)), был проведен ряд экспериментов.

Результаты обозначенных экспериментов представлены на рисунке 2. По гистограмме, которая изображена на рисунке 2, можно отследить зависимость полученных значений среднеквадратичной ошибки от количества модулей во входном слое.

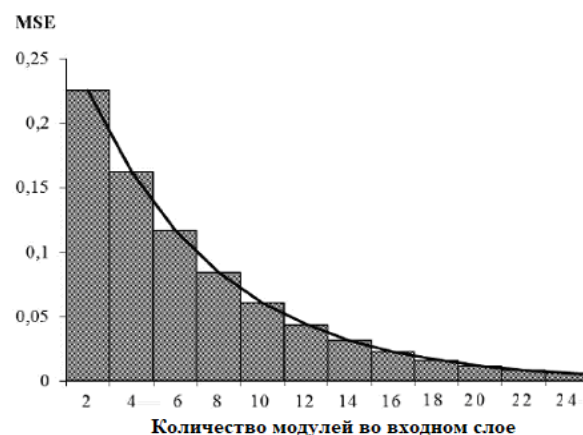


Рисунок 2 – Гистограмма, показывающая зависимость среднеквадратичной ошибки от числа модулей во входном слое

Спектр огибающей в определенные моменты времени был использован в качестве входных данных для обучения TDNN.

Минимальный показатель (значение) среднеквадратической ошибки диагностики стал критерием выбора структуры модели сети.

Как видно из приведенного выше рисунка 2, прослеживается определенная закономерность: увеличение количества модулей входного слоя сопровождается уменьшением значения ошибки.

Для диагностики состояния ВУГП достаточно использовать 16 модулей на входном слое. Размер заявленного числа модулей обоснован тем, что по мере дальнейшего увеличения количества модулей входного слоя будет выявляться незначительное изменение значения полученной ошибки.

В работе, связанной с обучением модели TDNN, был выбран критерий, характеризующий адекватность модели. Он предусматривает выбор таких значений параметров $W = \{w_{ijml}^{(1)}, w_{ijml}^{(2)}, w_{ijml}^{(3)}\}$, которые обеспечивают минимизацию показателя среднеквадратичной ошибки (разницу между выходом модели и желаемым выходом):

$$F = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P (y_p - d_p)^2 \rightarrow \min_W \quad (8)$$

Обучение модели TDNN подчиняется критерию (8), для чего в статье приведена пакетная версия алгоритма обратного распространения (BP).

Обучение искусственной нейронной сети (ИНС), алгоритм обратного распространения:

1. Номер итерации обучения $n=1$, инициализация посредством равномерного распределения на интервале (0,1) или [-0.5, 0.5] порогов $b_{iml}^{(1)}(n)$, $b_{jml}^{(2)}(n)$, $b_{ili}^{(3)}(n)$ и весов $w_{ijml}^{(k)}(n)$, $i \in \overline{1, U^{(k)}}$, $j \in \overline{1, N^{(k)}}$, $m \in \overline{1, U^{(k+1)}}$, $l \in \overline{1, N^{(k+1)}}$, $k \in \overline{1, 3}$, где $N^{(k)}$ – число нейронов в одном модуле k -го слоя, $U^{(k)}$ – число модулей k -го слоя.

2. Задается множество для обучения $\{(x_\mu, d_\mu) | x_\mu \in R^{U^{(0)} \times N^{(0)}}, d_\mu \in \{0,1\}^{N^{(3)}}\}$, $\mu \in \overline{1, P}$, где x_μ – μ -я входная обучающая матрица;

d_μ – μ -й выходной обучающий вектор;

$N^{(0)}$ – число нейронов в одном модуле входного слоя;

$U^{(0)}$ – число модулей (входных обучающих векторов);

$N^{(3)}$ – число нейронов выходного слоя;

P – мощность обучающего множества.

3. Определение выходного сигнала k -го слоя (прямой ход):

$$\begin{aligned} y_\mu^{(0)}(n) &= x_\mu, \mu \in \overline{1, P}, \\ y_{\mu ml}^{(1)}(n) &= f^{(1)}(s_{\mu ml}^{(1)}(n)), \\ s_{\mu ml}^{(1)}(n) &= \sum_{i=1}^{1+M^{(0)}} \sum_{j=0}^{N^{(0)}} w_{ijml}^{(1)}(n) y_{\mu ij}^{(0)}(n), \\ m &\in \overline{1, U^{(1)}}, l \in \overline{1, N^{(1)}}, \\ \mu &\in \overline{1, P}, \\ y_{\mu ml}^{(2)}(n) &= f^{(2)}(s_{\mu ml}^{(2)}(n)), \\ s_{\mu ml}^{(2)}(n) &= \sum_{j=1}^{1+M^{(1)}} \sum_{i=0}^{U^{(1)}} w_{ijml}^{(2)}(n) y_{\mu ij}^{(1)}(n), \\ m &\in \overline{1, U^{(2)}}, l \in \overline{1, N^{(2)}}, \\ \mu &\in \overline{1, P}, \\ y_{\mu li}^{(3)}(n) &= f^{(3)}(s_{\mu li}^{(3)}(n)), \\ s_{\mu li}^{(3)}(n) &= \sum_{j=0}^{N^{(2)}} w_{ijli}^{(3)}(n) y_{\mu ij}^{(2)}(n), \\ i &\in \overline{1, N^{(3)}}, \mu \in \overline{1, P}, \end{aligned}$$

где $N^{(k)}$ – количество нейронов в k -м слое; k – номер слоя; $w_{ijml}^{(k)}(n)$ – вес связи от j -го нейрона i -го модуля к l -му нейрону m -го модуля на k -м слое в момент времени n ; $y_{\mu ml}^{(k)}(n)$ – выход j -го нейрона m -го модуля на k -м слое в момент времени n ; $f^{(k)}$ – активационная функция нейронов k -го слоя, $M^{(k)}$ – задержка в k -м слое.

Считается, что:

$$\begin{aligned} w_{i0ml}^{(1)}(n) &= b_{iml}^{(1)}(n), \\ y_{i0}^{(1)}(n) &= 1, \\ w_{0jml}^{(2)}(n) &= b_{jml}^{(2)}(n), \\ y_{0j}^{(2)}(n) &= 1, \end{aligned}$$

$$w_{i0i}^{(3)}(n) = b_{i1i}^{(3)}(n),$$

$$y_{i0}^{(1)}(n) = 1.$$

4. Расчет величины показателя энергии ошибки ИНС:

$$E(n) = \frac{1}{2P} \sum_{\mu=1}^P \sum_{j=1}^{N^{(3)}} e_{\mu j}^2(n),$$

$$e_{\mu j}(n) = y_{\mu j}^{(3)}(n) - d_{\mu j}.$$

5. Настройка на основе обобщенного дельта-правила синаптических весов (обратный ход):

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ijli}^{(3)}(n)} = \frac{1}{P} \sum_{\mu=1}^P y_{\mu j}^{(2)}(n) g_{\mu li}^{(3)}(n),$$

$$i \in \overline{1, N^{(3)}},$$

$$j \in \overline{0, N^{(2)}},$$

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ijml}^{(2)}(n)} = \frac{1}{P} \sum_{\mu=1}^P y_{\mu j}^{(1)}(n) g_{\mu ml}^{(2)}(n),$$

$$i \in \overline{0, U^{(1)}},$$

$$j \in \overline{1, l + M^{(1)}},$$

$$m \in \overline{1, U^{(2)}}, l \in \overline{1, N^{(2)}},$$

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ijml}^{(1)}(n)} = \frac{1}{P} \sum_{\mu=1}^P y_{\mu j}^{(0)}(n) g_{\mu ml}^{(1)}(n),$$

$$i \in \overline{1, l + M^{(1)}}, j \in \overline{0, N^{(0)}},$$

$$m \in \overline{1, U^{(1)}}, l \in \overline{1, N^{(1)}},$$

$$g_{\mu li}^{(3)}(n) = f^{(3)}(s_{\mu li}^{(3)}(n))(y_{\mu li}^{(3)}(n) - d_{\mu i}),$$

$$g_{\mu ml}^{(2)}(n) = f^{(2)}(s_{\mu ml}^{(2)}(n)) \sum_{i=1}^{N^{(3)}} w_{mli}^{(3)}(n) g_{\mu li}^{(3)}(n),$$

$$g_{\mu ml}^{(1)}(n) = f^{(1)}(s_{\mu ml}^{(1)}(n)) \sum_{i=1}^{U^{(2)}} \sum_{j=\max\{1, l-M^{(1)}\}}^{\min\{N^{(2)}, l\}} w_{mlj}^{(2)}(n) \times$$

$$\times g_{\mu ij}^{(2)}(n).$$

6. Проверка условия завершения.

Если $E(n) < \varepsilon$, то работа алгоритма завершится, иначе $n = n + 1$ и переход к 2.

Использование пакетного режима обучения для нейросети TDNN на видеокарте GeForce 920M позволило произвести ускорение прямого хода примерно в $P(U^{(1)} \times N^{(1)} + U^{(2)} \times N^{(2)} + N^{(3)})$ раз, а обратного хода – в количество раз, рассчитываемое как $\frac{P}{\log_2 P} (U^{(0)} \times N^{(0)} \times U^{(1)} \times N^{(1)} + U^{(2)} \times N^{(2)} \times U^{(1)} \times N^{(1)} + N^{(2)} \times N^{(3)})$,

при этом использовалась редукция для осуществления обратного хода при сложении по обучающему множеству.

Выводы. Для решения проблемной ситуации, связанной с повышением показателя необходимости осуществления диагностики состояния ВУГП, были исследованы соответствующие методы. Результаты выполненных исследований показывают, что наиболее эффективным для диагностики является использование искусственных нейронных сетей.

Для повышения показателей качества результатов диагностики была выбрана нейронная сеть TDNN, а также была определена структура ее модели.

Численные исследования и выполненные эксперименты показали, что при наличии 16 и более модулей во входном слое значение стандартной ошибки существенно не изменяется, а выбранная нейронная сеть дает диагностический результат с наименьшим (минимальным) отклонением.

Использование предложенного в данной работе пакетного режима нейросетевого обучения позволило произвести ускорение прямого хода примерно в $P(U^{(1)} \times N^{(1)} + U^{(2)} \times N^{(2)} + N^{(3)})$ раз, а ускорение обратного хода – примерно в $\frac{P}{\log_2 P} (U^{(0)} \times N^{(0)} \times U^{(1)} \times N^{(1)} + U^{(2)} \times N^{(2)} \times U^{(1)} \times N^{(1)} + N^{(2)} \times N^{(3)})$ раз.

Практическая значимость выражена в возможности увеличения скорости прямого и обратного хода при использовании представленного пакетного режима обучения нейронной сети. Предложенный подход может быть использован и применен в различных интеллектуальных системах, обеспечивающих диагностические процессы.

Перспективы дальнейших исследований связаны с осуществлением последующей работы, направленной на разработку иных методик углубленного изучения процесса изменения состояния ВУГП и на исследование возможных интеллектуальных методов диагностики ВУГП.

Список литературы

- [1] А. Р. Ширман, и А. Б. Соловьев, *Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования*. Москва, 1996.

- [2] А. В. Барков, Н. А. Баркова, и А. Ю. Азовцев, *Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации*. Санкт-Петербург: Изд. центр СПбГМТУ, 2000.
- [3] В. А. Барков, *Современное состояние виброакустической диагностики машин*. Санкт-Петербург: Ассоциация ВАСТ, 2002.
- [4] А. С. Гольдин, *Вибрация роторных машин*. Москва: Машиностроение, 1999.
- [5] В. В. Ключева, *Неразрушающий контроль и диагностика*. Москва: Машиностроение, 2003.
- [6] Е. Е. Федоров, *Методики интеллектуальной диагностики*. Донецк: Ноулидж, 2010.
- [7] Г. А. Бабак, К. П. Бочаров, и А. Т. Волохов, *Шахтные вентиляторные установки главного проветривания*. Москва: Недра, 1982.
- [8] Б. А. Носырев, и С. В. Белов, *Вентиляторные установки шахт и метрополитенов*. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. горно-геолог. акад., 2000.
- [9] M. I. Jordan, "Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine", in *Proc. Ninth Annu. Conf. Cognitive Science Society*, Hillsdale, NJ, 1986, pp. 531-546.
- [10] M. Jordan, and D. Rumelhart, "Forward models: supervised learning with a distal teacher", *Cognitive Science*, vol. 16, pp. 307-354, 1992.
- [11] Z. Zhang, Z. Tang, and C. Vairappan, "A novel learning method for Elman neural network using local search", *Neural Information Processing – Letters and Reviews*, vol. 11, no. 8, pp. 181-188, 2007.
- [12] J. Wiles, and J. Elman, "Learning to count without a counter: a case study of dynamics and activation landscapes in recurrent networks", in *Proc. Seventeenth Annu. Conf. Cognitive Science Society*, Cambridge, MA, 1995, pp. 1200-1205.
- [13] S. Haykin, *Neural networks*. NY: Pearson Education, 1999.
- [14] Е. Е. Федоров, *Искусственные нейронные сети*. Красноармейск: ДонНТУ, 2016.
- [15] K. J. Lang, and G. E. Hinton, "The development of the time-delay neural network architecture for speech recognition", Pittsburgh, PA, Carnegie-Mellon University, Tech. Rep. CMU-CS-88-152-1988.
- [16] A. Waibel, T. Hanazawa, G. Hinton, K. Shikano, and K. J. Lang, "Phoneme recognition using time-delay neural networks", *IEEE transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 37, pp. 328-329, 1988.

References

- [1] A. R. Shirman, and A. B. Solov'ev, *Practical vibration diagnostics and monitoring of mechanical equipment condition*. Moscow, 1996 [in Russian].
- [2] A. V. Barkov, N. A. Barkova, and A. Yu. Azovtzev, *Monitoring and diagnostics of rotary machines by vibration*, St. Petersburg: Izd. czentr SPbGMTU, 2000 [in Russian].
- [3] V. A. Barkov, *Current state of vibroacoustic diagnostics of machines*. St. Petersburg: Assotsiatsiya VAST, 2002 [in Russian].
- [4] A. S. Gol'din, *Vibration of rotary machines*. Moscow: Mashinostroenie, 1999 [in Russian].
- [5] V. V. Klyueva, *Non-destructive testing and diagnostics*. Moscow: Mashinostroenie, 2003 [in Russian].
- [6] E. E. Fedorov, *Methods of intellectual diagnostics*. Donetsk: Noulidzh, 2010 [in Russian].
- [7] G. A. Babak, K. P. Bocharov, and A. T. Volokhov, *Mine fan installations of main ventilation*. Moscow: Nedra, 1982 [in Russian].
- [8] B. A. Nosyrev, and S. V. Belov, *Fan installations of mines and undergrounds*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. gos. gorno-geolog. akademii, 2000 [in Russian].
- [9] M. I. Jordan, "Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine", in *Proc. Ninth Annu. Conf. Cognitive Science Society*, Hillsdale, NJ, 1986, pp. 531-546.
- [10] M. Jordan, and D. Rumelhart, "Forward models: supervised learning with a distal teacher", *Cognitive Science*, vol. 16, pp. 307-354, 1992.
- [11] Z. Zhang, Z. Tang, and C. Vairappan, "A novel learning method for Elman neural network using local search", *Neural Information Processing – Letters and Reviews*, vol. 11, no. 8, pp. 181-188, 2007.
- [12] J. Wiles, and J. Elman, "Learning to count without a counter: a case study of dynamics and activation landscapes in recurrent networks", in *Proc. Seventeenth Annu. Conf. Cognitive Science Society*, Cambridge, MA, 1995, pp. 1200-1205.
- [13] S. Haykin, *Neural networks*. NY: Pearson Education, 1999.

- [14] E. E. Fedorov, *Artificial Neural Networks*. Krasnoarmejsk: DonNTU, 2016 [in Russian].
- [15] K. J. Lang, and G. E. Hinton, "The development of the time-delay neural network architecture for speech recognition", Pittsburgh, PA, Carnegie-Mellon University, Tech. Rep. CMU-CS-88-152-1988.
- [16] A. Waibel, T. Hanazawa, G. Hinton, K. Shikano, and K. J. Lang, "Phoneme recognition using time-delay neural networks", *IEEE transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 37, pp. 328-329, 1988.

E. E. Fedorov¹, I. V. Yarosh², T. O. Cherniak²,

¹Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine,

²Donetsk National Technical University
Shybankova Square, 2, Pokrovsk, 85300, Ukraine

TDNN NEURAL NETWORK FOR DIAGNOSING THE STATE OF THE FAN INSTALLATION OF THE MAIN AIRING

Currently, the increasing of operational safety is one of the major problems that exist in the mining industry. The problem of emergency equipment for mining industry is caused by the rapid increase in the share of depletion of its physical resources. Among the existing mine equipment, one of the most important roles is played by fan installations of the main airing, which ensure normal vital activity of the mine personnel. Therefore, an important task is to develop a software component, designed to diagnose the state of it and to be used in computer systems. At the heart of this objective lies the problem of building effective methods, providing high speed of diagnostics model training, as well as a high probability, adequacy and speed of signals recognition, which contain the vibrational information. At present, as a tool for vibration diagnostics, the following calculation methods are most commonly used: kurtosis, crest factor, RMS value, envelope spectrum. However, when using these markers separately for diagnosis of fan installations of the main airing condition, the probability of error is no less than 0.05. On the other hand, the processing speed of vibrational information is poor. Therefore, the development of methods for intelligent integrated diagnostics of fan installations of the main airing is relevant.

As the use of artificial neural networks in the diagnosis gives tangible advantages, which are the following: the interaction between the factors is studied on finished models; it does not require any assumptions regarding the distribution of factors; a priori information about the factors can be omitted; the initial data can be highly correlated, incomplete or noisy; it is possible to conduct the analysis of systems with a high degree of nonlinearity; fast model development; high adaptability; the analysis of systems with a large number of factors; it does not require a complete enumeration of all possible models; the analysis of systems with non-uniform factors, neural network method of diagnosis is used in the article. The aim of the study consists in the development of a method for analysis of the process of changing the condition of fan installations of the main airing. The article defines the structure of the artificial neural network model, which is a TDNN neural network, that allows to explore the spectrum envelope at certain points of time. The minimum root-mean-square error has been chosen as a criterion for evaluating the effectiveness of the neural network diagnostic model. As a result of a numerical study, it is found that in the presence of 16 modules in the input layer, the value of RMS error does not change significantly, the proposed network provides diagnostic results with a minimum deviation. The use of the proposed batch training mode has made it possible to accelerate the forward stroke for about $P(U^{(1)} \times N^{(1)} + U^{(2)} \times N^{(2)} + N^{(3)})$ times, and the reverse stroke – for about $\frac{P}{\log_2 P} (U^{(0)} \times N^{(0)} \times U^{(1)} \times N^{(1)} + U^{(2)} \times N^{(2)} \times U^{(1)} \times N^{(1)} + N^{(2)} \times N^{(3)})$ times, where P is the power of the training set, $N^{(k)}$ is the number of neurons in k -layer, $U^{(k)}$ is the number of modules in the k -layer. The created algorithms can be used for solving problems related to the diagnostics of electromechanical objects.

Keywords: diagnostics, fan installation of the main airing, neural network, TDNN, operational safety, batch training mode.

[0000-0001-5913-6859] **М. Л. Дворецький**, *ст. викладач*,

e-mail: m.dvoretskiy@gmail.com

С. В. Дворецька, *ст. викладач*,

e-mail: svetag603@gmail.com

[0000-0002-0547-3689] **Є. О. Давиденко**, *к.т.н.*

e-mail: davydenko@chmnu.edu.ua

Чорноморський національний університет імені Петра Могили
вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, 54003, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОРИСНИХ ДАНИХ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ ТА МІНІМІЗАЦІЇ ОБСЯГІВ ВУЗЛА РОЗПОДІЛЕНОЇ БД

Дослідження ставить на меті підвищення рівня загальної доступності даних в окремому вузлі розподіленої бази даних та ефективності використання програмних систем по роботі з даними за рахунок зменшення кількості розподілених запитів. Мета досягається шляхом оптимізації структури вузла розподіленої бази даних та мінімізації обсягів даних, що зберігаються у ньому.

Для досягнення мети було створено підсистему обліку користувацьких запитів, граматику мови T-SQL та виконано парсинг коду SQL-запитів. В результаті запити класифікуються за списком таблиць бази даних, які трапляються у запиті, а також, після виконання більш детального аналізу, за списком атрибутів та кортежів відношення. Останнє досягається за рахунок виконання набору запитів зі зверненням до первинного ключа кожного відношення, що входить до складу запиту.

Виконання повного аналізу оцінки корисності атрибутів та кортежів таблиць бази даних є досить ресурсоємною операцією, тому не може виконуватися при кожній зміні даних. У рамках дослідження запропоновано реалізувати вирішення задачі класифікації нових даних із використанням нейронної мережі прямого поширення, що навчається на базі оцінених попередньо даних на базі парсингу SQL-запитів. Враховуючи необхідність виконання аналізу накопичених даних з точки зору множинності вимірів, а також, ймовірно, великі їх обсяги, було виконано представлення даних, необхідних для аналізу, у вигляді багатовимірної моделі.

Ключові слова: розподілена транзакція, система керування базами даних, розподілена база даних, розподілений SQL-запит, реплікація даних, парсинг тексту, дерево парсингу, профайлінг, ANTLR, OLAP, задача класифікації, нейронна мережа, інтелектуальний аналіз даних.

Вступ. Створюючи базу даних, користувач прагне впорядкувати інформацію за різними ознаками для швидкого отримання потрібних відомостей з довільним сполученням критеріїв пошуку. Необхідність автоматизації різних типів обліку (складський, бухгалтерський, облік кадрів тощо) у межах підприємства в деяких випадках веде до використання «універсальних» облікових систем. Цей підхід має ряд недоліків, серед яких переважаність центральної бази даних (БД), низька відмовостійкість, вразливість системи та недостатньо розвинені механізми обліку більшості напрямів автоматизації [1-2].

Аналіз публікацій та останніх досягнень. Використання окремих спеціалізованих рішень може вирішити наведені недоліки [3-

4], але веде до появи різних платформ систем керування базами даних (СКБД), що потребують подальшої синхронізації. Тому, у розвитку сучасних інформаційних систем простежується тенденція переходу від локальних БД до розподілених. Основною задачею розподіленої СКБД є забезпечення управління доступом до даних багатьох споживачів, цілісності й узгодженості даних в умовах використання мережі. Тобто основна функція таких СКБД – це координування спільної роботи багатьох користувачів з розподіленою інформацією [5-7].

Розв'язання проблеми автономності роботи користувачів розподіленої системи створює багато специфічних проблем в організації даних. Комбінована стратегія розподілу даних

поєднує два підходи, пов'язані з розподілом без дублювання та з дублюванням даних, з метою використання їх переваг [8]. Але при її використанні, окрім задачі синхронізації дубльованої інформації, актуальною постає задача оптимального проектування структури БД з точки зору належності даних до категорії того чи іншого вузла розподіленої БД. Крім того, продуктивність системи напряду буде залежати від прийняття рішення щодо необхідності часткового або повного дублювання даних.

Огляд інформаційних систем при вирішенні задач автоматизації різних типів обліку у межах однієї організації та недоліків використання універсальних облікових систем [1-4] дав можливість обґрунтувати необхідність оптимізації структури віддалених вузлів розподіленої бази даних (РБД) шляхом визначення корисних даних та мінімізації обсягів її вузла [8].

Метою роботи є підвищення рівня загальної доступності даних в окремому вузлі РБД та ефективності використання програмних систем по роботі з даними БД за рахунок зменшення кількості розподілених запитів. Мета досягається шляхом оптимізації структури вузла РБД та мінімізації обсягів даних, що зберігаються у ньому.

Під час виконання дослідження для досягнення сформульованої мети було вирішено наступні задачі: виконано дослідження методів створення та використання формальних граматик та розроблено підсистему парсингу коду SQL-запитів до центральної БД; розроблено модель та реалізовано підсистему обліку користувацької активності на основі профайлінгу SQL-запитів за різними аналітичними характеристиками; виконано деталізацію звернень користувацьких запитів до відношень БД на рівні множин атрибутів та кортежів; розроблено інформаційну технологію підтримки прийняття рішень при проектуванні структури вузла розподіленої БД та визначенні кількості необхідних даних.

Виклад основного матеріалу. При використанні комбінованого підходу представлення даних в РБД вибір типу реплікації залежить від декількох факторів, зокрема від того, чи є тип запиту віддаленим або розподіленим. У випадку віддаленого запиту, коли взаємодія з іншими вузлами необхідна лише для забезпечення реплікації даних, вважається за доцільне використання асинхронної реплікації [9-10]. Подібне рішення обґрунтовано можливістю виключити із транзакції всі «зайві» вузли, залишивши лише один, на якому, фактично, знаходяться дані (рисунк 1).

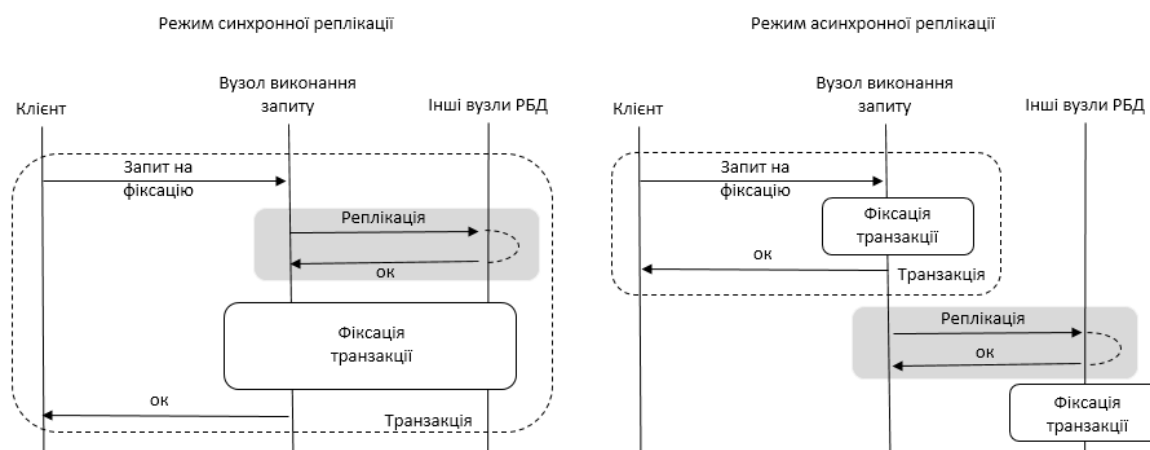
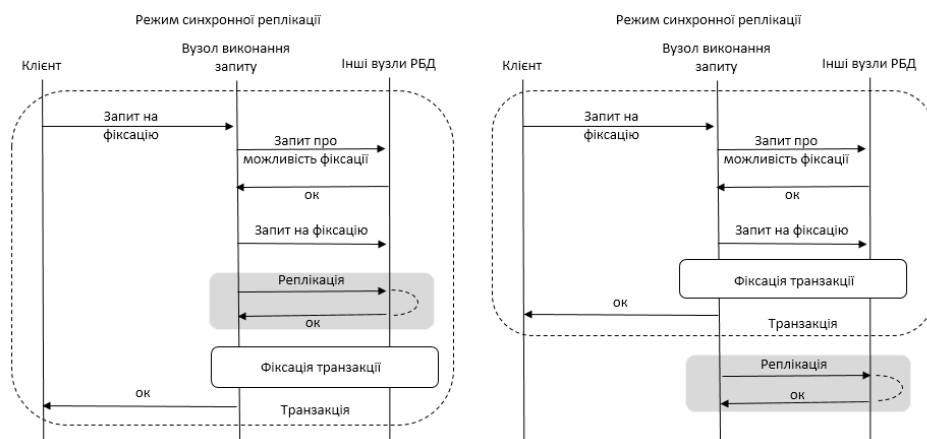


Рисунок 1 – Порівняння режимів реплікації у випадку віддаленого запиту

При синхронізації даних у випадку розподіленого запиту взаємодія із віддаленими вузлами не може бути винесена за межі транзакції. Це обумовлено тим фактом, що до розподіленої транзакції у будь-якому випадку входять фрагменти даних, що зберігаються на інших вузлах та не представлені на вузлі ви-

конання запиту. Зважаючи на цей факт, не вбачається за доцільне винесення процесу реплікації за межі транзакції [9, 11], оскільки зменшення часу виконання транзакції є незначним порівняно з можливими суперечностями в даних, пов'язаними із несинхронністю оновлення (рисунк 2).

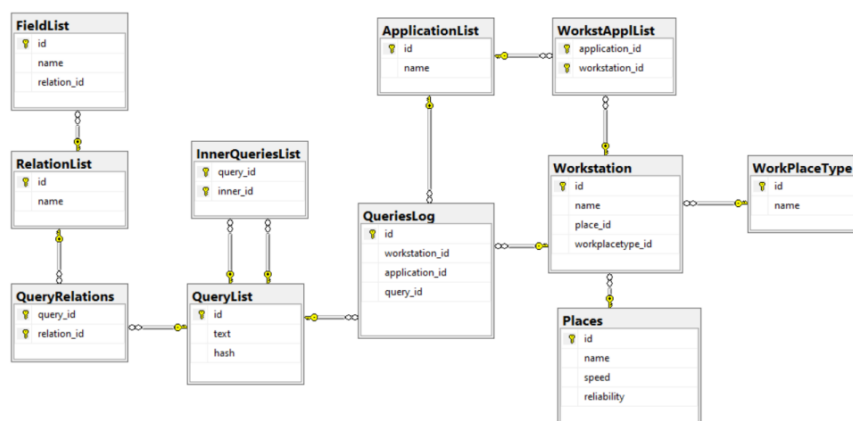


Рисунки 2 – Порівняння режимів реплікації у випадку розподіленого запиту

Виходячи з наведеного, при проектуванні віддаленого вузла розподіленої БД головним завданням на шляху до підвищення рівня загальної доступності та ефективності використання програмних систем по роботі з даними БД є зменшення кількості розподілених запитів, у яких задіяні дані декількох вузлів БД, та заміна їх локальними [12-13].

Для мінімізації кількості розподілених транзакцій [14] у межах віддаленого вузла

РБД було створено підсистему обліку користувачських запитів із класифікацією відповідно до належності до того чи іншого автоматизованого робочого місця, географічного розташування, ролі користувача та інших критеріїв, що можливо додати до системи динамічно під час її використання згідно з особливостями тієї чи іншої предметної області. Даталогічну архітектуру розробленої моделі наведено на рисунку 3.



Рисунки 3 – Даталогічна модель підсистеми профайлінгу користувачських SQL-запитів

Центральне місце займають журнал та довідник користувачських запитів (таблиці QueriesLog та QueryList). Якщо запит є вкладеним або має декілька рівнів, його деревоподібна структура описується за допомогою таблиці InnerQueriesList. Запити класифікуються за типом програмного забезпечення, робочої станції, користувача та місця розташування (прив'язка до майбутніх вузлів РБД), з якого вони надходять (таблиці Workstation, Places, ApplicationList, WorkstApplList та WorkPlaceType). Виходячи із наведеної структури, також бачимо, що введення до системи

додаткових аналітичних характеристик, що можуть знадобитися залежно від тієї чи іншої предметної області, не потребуватиме великих змін у БД. Після виконання парсингу коду SQL-запитів (парсинг – процес перетворення вихідного коду в структурований вигляд), вони також розбиваються за списком таблиць БД, які трапляються у запиті, а також, після виконання більш глибокого аналізу, за списком атрибутів та кортежів відношення (таблиці QueryRelations, RelationList та FieldList).

Наповнення розробленої моделі вхідними даними реалізовано за допомогою меха-

нізмів профайлінгу СКБД. В рамках дослідження було обрано програмний продукт SQL Profiler, що входить до стандартного інсталяційного пакета SQL Server. Цей вибір обумовлено достатнім переліком аналітичних властивостей, що надає функціонал програмного забезпечення (ПЗ), і сумісністю із версією СКБД, що використовується на підприємстві – базі автоматизації. При зміні вхідних умов вибір може бути змінено на користь іншого ПЗ.

Підсистема має користувацький інтерфейс, що складається з форм вводу та редагування даних для основних сутностей. Передбачено механізми імпорту даних із текстових та .csv файлів для можливості взаємодії зі сторонніми програмними продуктами (наприклад при вирішенні задач отримання списків користувачів, програмного забезпечення чи робочих станцій). Деякі сутності також можуть бути наповнені даними на основі результатів статистичної вибірки користувацьких SQL-запитів.

Для виконання подальшого аналітичного аналізу накопичених статистичних даних необхідне виділення конкретних відношень (а також посилань на їх атрибути та кортежі) із тексту користувацьких запитів. Для вирішен-

ня цієї задачі використано засоби розбору та лінгвістичного аналізу тексту. SQL, як кожна мова програмування, має правила, які визначають синтаксичну структуру коректних програм. Синтаксис конструкцій мови програмування може бути описаний за допомогою контекстно-вільних граматик або нотації БНФ (Backus-Naur Form, форм Бекуса-Наура).

Використаний у рамках дослідження генератор парсерів ANTLR є LL(*), він існує вже більше 20 років, а в 2013 р. вийшла його 4-а версія. Нині його розробка ведеться на GitHub. В даний момент він дає змогу генерувати парсери мовами Java, C#, Python2, Python3, JavaScript. Початковим етапом реалізації підсистеми парсингу T-SQL запитів є створення граматики. Далі, згенеровані класи лексера та парсера дають можливість представити код запиту у вигляді деревоподібної моделі, на базі якої відбувається визначення списку відношень та атрибутів, які були використані у запиті. На рисунку 4 зображено дерево ієрархії елементів для запиту «select (select number from groups where id=students.id), name, age from students», що звертається до декількох атрибутів і має у своєму складі один вкладений запит.

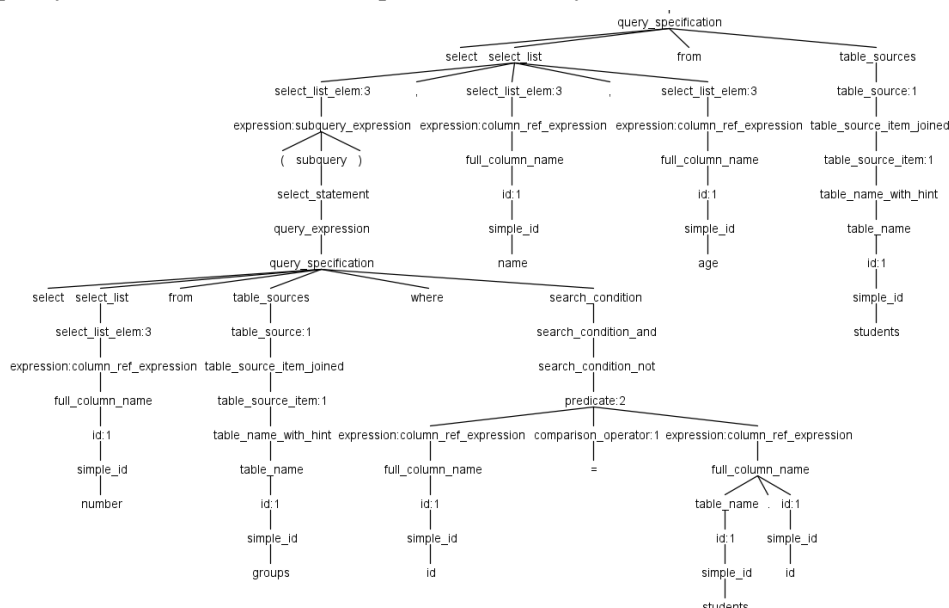


Рисунок 4 – Дерево парсингу запиту T-SQL

Далі кожний запит представляється у вигляді об'єкта, що має такі атрибути: робоча станція, користувач та ПЗ, від яких надійшов запит; сам текст запиту; колекція таблиць, до яких звертається запит; та колекція вкладених запитів, якщо такі мають місце. Сутність «таблиця» (TsqlRelation) у цьому випадку є під-

множиною таблиці БД і містить назву таблиці, колекцію атрибутів, які задіяні у запиті, та колекцію значень первинного ключа таблиці згідно з множиною кортежів, що повертаються як результат роботи запиту [15, 16]. Фрагмент діаграми класів інформаційної технології парсеру SQL-запитів зображено на рисунку 5.

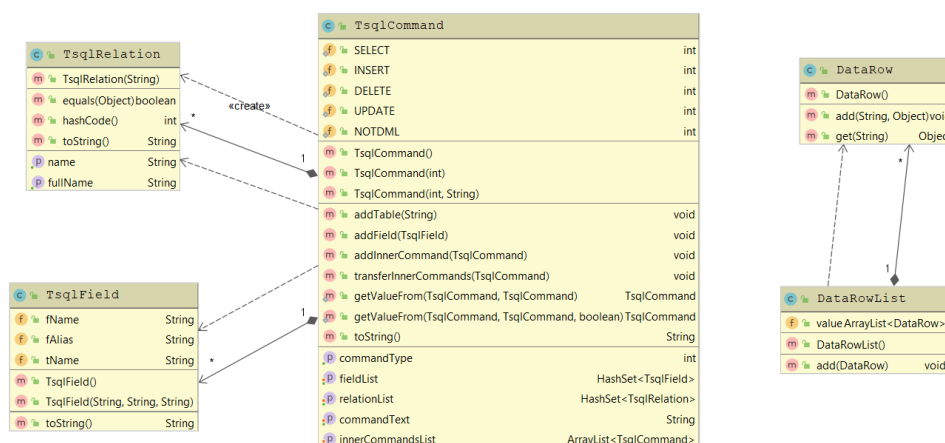


Рисунок 5 – Класи, що відповідають за представлення запитів у моделі

Отже, на цьому етапі ми маємо множинну відношень із атрибутами, що використовуються у запиті. Цього достатньо для визначення списку таблиць, представлених у вузлі РБД, та для обмеження загальної кількості даних через виконання операції проєкції до них. Однак цього може бути замало, оскільки зазвичай у БД облікових систем існують таблиці з великою кількістю кортежів, що займають багато місця на диску та створюють додаткове навантаження при виконанні запитів до них. При цьому, у тому чи іншому вузлі РБД реально використовується досить невеликий відсоток від загального обсягу даних, що входять до них.

Наступний крок – визначення множини кортежів, що використовуються у тому чи іншому запиті. Для цього доповнюємо клас TsqlRelation колекцією типу TsqlField, що визначатиме первинний ключ відношення. У випадку, якщо первинний ключ у відношенні

відсутній або він складається з великої кількості атрибутів нечислового типу даних, і, як наслідок, має великий об'єм, на рівні БД може бути створене унікальне автоінкрементне поле *not null*, що буде використовуватися надалі для ідентифікації кортежу.

Далі, якщо запит має у своєму складі вкладені запити, кожен із них оброблюється окремо. Для кожної таблиці з колекції відношень запиту виконується додатковий запит до БД, список атрибутів у якому замінюється на первинний ключ відношення. Результат запиту запам'ятовується як множина атрибутів таблиці, що використовується поточним запитом. Так, наприклад, у випадку надходження запиту, що вибирає прізвища студентів із номерами студентських груп із двох таблиць із використанням вложеного запиту для фільтрації за спеціальністю (рисунок 6), він буде розбитий на наступну множину запитів (рисунок 7).

```
|select s.name, g.number
|from students s inner join groups g on s.gr_code = g.code
|where g.special_code in(
|select code from specialties where name = 'computer science'
|)
|)
```

Рисунок 6 – Приклад вхідного запиту

```
select code from specialties where name = 'computer science';

|select distinct s.code from students s inner join groups g on s.gr_code = g.code
|where g.special_code in(
|select code from specialties where name = 'computer science'
|);

|select distinct g.code from students s inner join groups g on s.gr_code = g.code
|where g.special_code in(
|select code from specialties where name = 'computer science'
|);
```

Рисунок 7 – Список запитів для отримання множин атрибутів відношень, що використовуються вхідним запитом

Після виявлення множин атрибутів з'являється можливість визначення корисної для вузла РБД підмножини даних із використанням фільтрації таблиць за значенням первинного ключа, що дає можливість розмістити переважну більшість необхідних вузлу даних локально та, відповідно, знизити кількість розподілених запитів. При цьому об'єм даних локального вузла також є мінімальним, що, у свою чергу, мінімізує потребу у синхронізації різних версій одних і тих же даних.

Однак у процесі експлуатації описаної технології виникає проблема, пов'язана із модифікацією даних БД: коли до таблиць додаються нові дані, існуючі модифікуються або видаляються. У цьому випадку найпростішим варіантом рішення проблеми є реплікація до віддаленого вузла БД усіх нових або змінених даних (оскільки ми не знаємо про ступінь їх корисності для вузла). Коли ж обсяг цих даних досягає якоїсь критичної точки, виходячи, наприклад, із міркувань навантаження при вибірці даних або їх синхронізації, необхідно заново провести аналіз SQL-запитів та виконати оновлення бази використання атрибутів та кортежів таблиць БД віддаленим вузлом.

Слід зауважити, що виконання повного аналізу використання атрибутів та кортежів таблиць БД є досить ресурсоємною опе-

рацією та не може виконуватись часто, тому вищенаведений підхід є неприйнятним для великих та часто змінюваних БД. Тому було запропоновано представити проблему із вирішенням корисності нових або змінених даних у вигляді задачі класифікації інтелектуального аналізу даних. На вході у нас є назва таблиці та перелік значень її атрибутів (новий або змінений рядок), а на виході – рішення про його корисність для віддаленого вузла БД. Для вирішення цієї задачі запропоновано використати нейронну мережу прямого поширення [17] із одним прихованим шаром. Навчання мережі відбувається на базі даних, що були отримані в результаті аналізу результатів парсингу SQL-запитів. Далі, після навчання, мережа виконує класифікацію нових та змінених даних.

Враховуючи необхідність виконання аналізу накопичених даних з точки зору множинності вимірів, а також, ймовірно, великі їх обсяги, було виконано представлення даних, необхідних для аналізу, у вигляді багатовимірної моделі [18]. Для цього на рівні РБД інформаційної системи обліку користувацьких запитів вводиться ряд представлень, що реалізує таблицю фактів і таблиці вимірів у вигляді схеми «зірка». Структуру отриманого багатовимірного кубу зображено на рисунку 8.

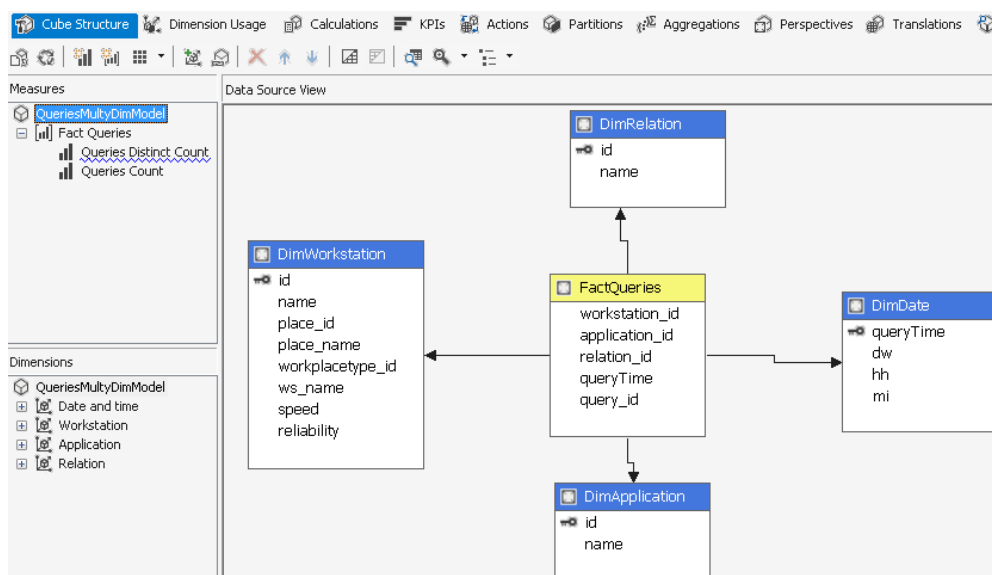


Рисунок 8 – Структура багатовимірного кубу підсистеми оперативно-аналітичного аналізу запитів

Висновки. У ході дослідження вперше запропоновано використання багаторівневих довідників аналітичних характеристик користувацьких SQL-запитів із оцінкою ступеня

актуальності даних; розроблено підсистему парсингу SQL-запитів, що дає можливість представити користувацький запит у вигляді множин відношень із деталізацією до викорис-

таних атрибутів та кортежів. Також вперше при аналізі користувацьких SQL-запитів використано багатовимірну модель даних і на її базі реалізовано систему підтримки прийняття рішень при проектуванні структури віддаленого автоматизованого робочого місця, що дає змогу проводити оперативно-аналітичний аналіз SQL-запитів по вимірах, швидко та ефективно виконувати операції консолідації, деталізації, обертання та зрізу. При модифікації даних центральної БД запропоновано ви-

користати нейронну мережу для вирішення задачі класифікації нових або змінених даних відповідно до ступеня їх корисності для віддаленого вузла РБД.

Результати дослідження були виробувані при розробці структури БД автоматизованого робочого місця касира супермаркету та при реалізації подальшої синхронізації із центральною БД. Результат виконаного порівняльного аналізу при використанні централізованої та РБД наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз використання централізованого та розподіленого підходів до реалізації структури БД

	Централізована БД	БД незалежного АРМ	Різниця
Об'єм БД, мб	29 025,63	174,88	165 разів
Кількість таблиць	460	34	14 разів
Час резервного копіювання БД, хв	7:58	0:13	37 разів
Середня кількість підключень до БД	59,75	1,02	58 разів
Середня кількість запитів у хв	817	44	19 разів
Середній час обробки, мс	5665	99	57 разів
Час синхронізації, сек	0	18	необхідність синхронізації даних
Незалежність від центрального сервера БД	ні	так	незалежність від центральної БД
Незалежність від комунікаційного обладнання	ні	так	

Отже, результатом є підвищення швидкості роботи інформаційної системи віддаленого автоматизованого робочого місця та розвантаження центральної БД за рахунок оптимізації структури РБД та мінімізації розподілених транзакцій і використання синхронного режиму реплікації даних.

Список літератури

- [1] Н. Козлюк, и С. Угрімова, *Складской учет на предприятиях торговли*. Феникс, 2005.
- [2] Торговля, склад и CRM в облаке. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.moysklad.ru>
- [3] М. Л. Дворецкий, С. В. Дворецька та С. Ю. Боровльова, "Web-застосунок складського обліку в неавтоматизованих торгових точках", *Наукові праці Чорномор. нац. ун-ту ім. Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія». Серія: Комп'ютерні технології: наук.-метод. журн. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. П. Могили, вип. 308, т. 320, с. 45-52, 2018.*
- [4] 1С: Предприятие 8. Управление торговым предприятием для Украины. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://rus.com.ua/torgovy-i-skladskoy-uchet/1S_Predpriyatye_8_Upravlenie_torgovym_predpriyatiem_dlya_Ukrainy/
- [5] М. Кузнецов, и И. Симдянов, *MySQL 5*. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2010.
- [6] Д. Петкович, *Microsoft SQL Server 2008: руководство для начинающих* / пер. с англ. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2009.
- [7] Т. Коннолли, и К. Бегг, *Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика*, 3-е изд. / пер. с англ. Москва: Вильямс, 2003.
- [8] М. Tamer Özsu, and P. Valduriez, *Principles of distributed database systems*. 3rd ed. Springer, 2011.

- [9] Автоматическая синхронизация распределенных баз данных в разделенном режиме. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://stimul.kiev.ua/materialy.htm?a=avtomaticheskaya_sinkhronizatsiya_raspredelennykh_baz_dannykh_v_razdelennom_rezh
- [10] Д. Д. Ульман, Д. Уидом и Г. Гарсиа-Молина, *Системы баз данных: полный курс*. Москва: Вильямс, 2004.
- [11] Управление транзакциями (компонент Database Engine). [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://technet.microsoft.com/ru-ru/library/ms175523\(v=sql.105\).aspx](https://technet.microsoft.com/ru-ru/library/ms175523(v=sql.105).aspx)
- [12] Ребекка М. Райордан, *Основы реляционных баз данных*. Москва: Русская Редакция, 2001.
- [13] М. Л. Дворецкий, "Проектування та оцінка оптимальності структури сховища даних та багатовимірної БД", *Наукові праці Чорномор. нац. ун-ту ім. Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія»*. Серія: Комп'ютерні технології: наук.-метод. журн. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. П. Могили, вип. 77, т. 90, с. 52-60, 2008.
- [14] Использование синхронных и асинхронных операций базы данных. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://help.adobe.com/ru_RU/as3/dev/WS5b3ccc516d4fbf351e63e3d118666ade46-7d39.html
- [15] М. Л. Дворецкий, Є. О. Давиденко, та С. Ю. Боровльова, "Проектування структури розподіленої БД на базі парсингу SQL-запитів". *Наукові праці Чорномор. нац. ун-ту ім. Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія»*. Серія: Комп'ютерні технології: наук.-метод. журн. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. П. Могили, вип. 275, т. 287, с. 53-61, 2016.
- [16] M. Fisun, M. Dvoretzkyi, A. Shved, and Y. Davydenko, "Query parsing in order to optimize distributed DB structure," in *9th IEEE Int. Conf. Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Bucharest, 2017, pp. 172-178. doi: 10.1109/IDAACS.2017.8095071
- [17] What is an artificial neural network? Here's everything you need to know. [Online]. Available: <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/what-is-an-artificial-neural-network/>
- [18] М. Т. Фісун, М. Л. Дворецкий, та А. В. Юхатов, "Порівняльний аналіз методів побудови olap-систем із використанням засобів MS SQL SERVER та ORACLE", *Наукові праці Чорномор. нац. ун-ту ім. Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія»*. Серія: Комп'ютерні технології: наук.-метод. журн. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. П. Могили, вип. 271, т. 283, с. 36-42, 2016.

References

- [1] N. Kozliuk, and S. Ugrimova, *Warehouse accounting in trade enterprises*. Feniks, 2005 [in Russian].
- [2] Trading, warehouse and CRM in the cloud. [Online]. Available: <https://www.moysklad.ru>
- [3] M. L. Dvoretzkyi, S. V. Dvoretzka, and S. Yu. Borovlova, " Web-based warehouse accounting application in non-automated outlets", *Naukovi pratsi Chornomor. nats. un-tu im. Petra Mohyly kompleksu «Kyievo-Mohylianska akademiiia»*. Seriiia: Komp'uterni tekhnolohii: sci.-method. journ. Mykolaiv: Vyd-vo ChNU im. P. Mohyly, iss. 308, vol. 320, pp. 45-52, 2018 [in Ukrainian].
- [4] 1C: Enterprise 8. Management of a trade enterprise for Ukraine. [Online]. Available: http://rarus.com.ua/torgovyy-i-skladskoy-uchet/1S_Predpriyatie_8_Upravlenie_torgovym_predpriyatiem_dlya_Ukrainy_
- [5] M. Kuznetsov, and I. Symdianov, *MySQL 5*. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2010 [in Russian].
- [6] D. Petkovych, *Microsoft SQL Server 2008: beginner's guide*, transl. from Engl. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2009 [in Russian].
- [7] T. Konnolli, and K. Begg, *Databases. Design, implementation and maintenance. Theory and practice*, 3rd ed., transl. from Engl. Moscow: Wiliams, 2003 [in Russian]
- [8] M. Tamer Özsu, and Patrick Valduriez. *Principles of distributed database systems*, 3rd ed. Springer, 2011.
- [9] Automatic synchronization of distributed databases in split mode. [Online]. Available: <http://stimul.kiev.ua/materialy.htm?a=avtom>

- ati-
cheskaya_sinkhronizatsiya_raspredelennykh
_baz_dannykh_v_razdelenom_rezh
- [10] D. D. Ulman, D. Uidom, and G. Garsya-Molina. *Database systems: full course*. Moscow: Wiliams, 2004 [in Russian].
- [11] Transaction Management (Database Engine component) [Online]. Available: [https://technet.microsoft.com/ru-ru/library/ms175523\(v=sql.105\).aspx](https://technet.microsoft.com/ru-ru/library/ms175523(v=sql.105).aspx)
- [12] Rebekka M. Raiordan, *Relational database fundamentals*. Moscow: Russkaia Redaktsiya, 2001 [in Russian].
- [13] M. L. Dvoretzkyi, "Design and evaluation of data warehouse structure and multidimensional database structure", *Naukovi pratsi Chornomor. nats. un-tu im. Petra Mohyly kompleksu «Kyievo-Mohylianska akademiia»*. Serii: *Kompiuterni tekhnologii*: sci.-method. journ. Mykolaiv: Vyd-vo MDHU im. P. Mohyly, iss. 77, vol. 90, pp. 52-60, 2008 [in Ukrainian].
- [14] The use of synchronous and asynchronous database operations. [Online]. Available: http://help.adobe.com/ru_RU/as3/dev/WS5b3cc516d4fbf351e63e3d118666ade46-7d39.html
- [15] M. L. Dvoretzkyi, Ye. O. Davydenko, and S. Yu. Borovlova, "Design of the structure of a distributed database based on SQL query parsing". *Naukovi pratsi Chornomor. nats. un-tu im. Petra Mohyly kompleksu «Kyievo-Mohylianska akademiia»*. Serii: *Kompiuterni tekhnologii*: sci.-method. journ. Mykolaiv: Vyd-vo MDHU im. P. Mohyly, iss. 275, vol. 287, pp. 53-61, 2016 [in Ukrainian].
- [16] M. Fisun, M. Dvoretzkyi, A. Shved, and Y. Davydenko, "Query parsing in order to optimize distributed DB structure," in *9th IEEE Int. Conf. Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Bucharest, 2017, pp. 172-178.
doi: 10.1109/IDAACS.2017.8095071
- [17] What is an artificial neural network? Here's everything you need to know. [Online]. Available: <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/what-is-an-artificial-neural-network/>
- [18] M. T. Fisun, M. L. Dvoretzkyi, and A. V. Yukhatov, "Comparative analysis of methods for building olap systems using MS SQL SERVER and ORACLE", *Naukovi pratsi Chornomor. nats. un-tu im. Petra Mohyly kompleksu «Kyievo-Mohylianska akademiia»*. Serii: *Kompiuterni tekhnologii*: sci.-method. journ. Mykolaiv: Vyd-vo MDHU im. P. Mohyly, iss. 271, vol. 283, pp. 36-42, 2016 [in Ukrainian].

M. L. Dvoretzkyi, senior lecturer,
e-mail: m.dvoretzkyi@gmail.com

S. V. Dvoretzka, senior lecturer,
e-mail: svetag603@gmail.com

Ye. O. Davydenko, Ph. D. (Eng.)
e-mail: davydenko@chmnu.edu.ua

Petro Mohyla Black Sea National University
68 Desantnykiv str., 10, Mykolaiv, 54003, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGY FOR DETERMINING USEFUL DATA WHILE OPTIMIZING THE STRUCTURE AND MINIMIZING THE VOLUME OF THE DISTRIBUTED DATABASE NODE

The paper deals with the tendency to move from "universal" accounting systems to specialized solutions usage. This requires the synchronization of distributed database data. It is noted that among the strategies of data distribution between distributed database nodes, the combined one is the most justified, but the main disadvantage consists in the existence of distributed transactions when handling data.

The research aims to improve the general availability of data in the separate node of the distributed database and the efficiency of using software systems to work with database data by reducing

the number of distributed requests. The goal is achieved by optimizing the structure of the distributed database node and minimizing the amount of data stored in it.

To achieve the goal, users' query accounting subsystem and T-SQL grammar have been created, and SQL query code has been parsed. As a result, the queries are classified by the list of database tables that are found in the query, and, after performing more detailed analysis, by the list of attributes and relation tuples. The last one is achieved by executing a set of queries with getting the primary key of each relation included in the query.

Performing the complete analysis of the database tables attributes and tuples estimation is a very resource-intensive operation, so it cannot be performed every time the database data is changed. The research proposes to solve the problem of classification of new data by using the perceptron, which learns on the basis of pre-evaluated data based on SQL query parsing. Also, according to the need of performing the analysis of received data from the point of view of multiple dimensions, as well as probably their large amount, the data required for the analysis has been presented in the form of a multidimensional model.

Keywords: distributed transaction, database management system, distributed database, distributed SQL-query, data replication, text parsing, parse tree, profiling, ANTLR, multidimensional analysis, classification task, neural network, data mining.

[0000-0002-2722-7964] **К. В. Колесніков**, к.т.н., доцент,
e-mail: k.kolesnikov@chdtu.edu.ua

В. С. Гарячий, студент
Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ WEB-ОРІЄНТОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ГНУЧКОЇ МЕТОДОЛОГІЇ SCRUM

Стаття присвячена дослідженню можливостей застосування гнучкої методології Scrum при проектуванні Web-орієнтованих інформаційних систем. Визначено основні поняття Scrum-системи та наведено сутність цієї методології. Проаналізовано основні ролі та процеси при проектуванні Web-орієнтованих інформаційних систем на основі застосування SCRUM. Наведено особливості проектування Web-орієнтованих інформаційних систем в умовах застосування SCRUM.

Ключові слова: Web-орієнтовані інформаційні системи, проектування, гнучка методологія Scrum, багаторівнева ієрархія завдань, декомпозиція завдань, матриця відповідальності.

Вступ. Проектування є визначальним етапом у розробці будь-яких інформаційних систем, адже саме на цьому етапі закладаються основи та способи реалізації ідеї, що визначають функціонування системи в подальшому. Тому в процесі проектування Web-орієнтованих інформаційних систем важливим є дотримання основних принципів проектування, а також схеми реалізації цього процесу. Однак для того щоб досягти стабільності в роботі продукту, безпеки і стійкості функціональних особливостей, необхідно застосовувати таку методологію в ході розробки, яка дасть можливість постійного контролю та комунікації між членами проектною командою, що забезпечують виконання саме процесу проектування. Тому створення Web-орієнтованих інформаційних систем доцільно реалізовувати із застосуванням проектного підходу на основі методології Scrum, що є гнучкою методологією управління проектами з нестандартним розподілом ролей у команді та унікальною організацією ітерацій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблемам та задачам проектування Web-орієнтованих інформаційних систем у різних сферах присвячено багато робіт як вітчизняних, так і закордонних авторів. Зокрема, в роботі [1] автор розглядає процеси проектування Web-орієнтованих інформаційних систем у галузі медицини. В роботах [2, 3] авторами досліджується питання розробки Web-орієнтованих геоінформаційних систем та Web-орієнтованих інформаційних систем у

галузі сільського господарства з урахуванням специфіки даних. Автори роботи [4] звернули увагу на розробку Web-орієнтованих інформаційних систем шляхом інтеграції різних методів розробки, що забезпечило зв'язок між методами проектування та стратегічними аспектами розвитку системи. Підхід до проектування Web-орієнтованих інформаційних систем, що описаний у роботі [5], забезпечив можливість використання інструментів Web 2.0 і Big Data для швидкого та спрощеного виявлення, збирання, керування і застосування знань у системах управління знаннями. Роботи [6-8] присвячені дослідженню застосування гнучкої методології Scrum в управлінні проектами розробки програмних засобів, де описується термінологія, особливості організації Scrum, його переваги та недоліки.

Метою статті є дослідження можливостей використання гнучкої методології Scrum у процесі проектування Web-орієнтованих інформаційних систем та особливостей проектування в умовах Scrum.

Виклад основного матеріалу. Проектування є важливим етапом життєвого циклу Web-орієнтованих інформаційних систем, що забезпечує подальшу успішну розробку. Тому необхідно, в першу чергу, приділити значну увагу адекватності побудованих моделей об'єкта проектування, розробці функціональних та інформаційних моделей, а також чітко реалізувати процеси проектування. Накопичений нині досвід проектування Web-

орієнтованих інформаційних систем показує, що це логічно складна, трудомістка і тривала за часом робота, що вимагає високої кваліфікації фахівців, які є членами проектною команди та залучені до цього етапу. При цьому важливим є підвищення продуктивності, постійний контроль та змінювані адаптери. Застосування гнучкої методології Scrum на етапі проектування Web-орієнтованих інформаційних систем забезпечить можливості ефективної роботи проектною командою, отримання кінцевого програмного продукту високої якості, а також отримання переваги в конкурентній боротьбі.

Згідно з [9] основні процеси проектування Web-орієнтованих інформаційних систем схематично можна зобразити наступним чином (рисуюнок 1):



Рисуюнок 1 – Схема процесів проектування Web-орієнтованих інформаційних систем

SCRUM є гнучкою методологією сучасного проектного менеджменту (smart methodology), в основу якої покладено принцип адаптивності та самокорегування. Як система управління проектами, зокрема проектами розробки Web-орієнтованих інформацій-

них систем, SCRUM має ряд суттєвих переваг. Методологія SCRUM успішно поєднує концепцію постійної модернізації з мінімальним функціоналом і дає змогу радикально удосконалювати діяльність проектною команди на різних етапах життєвого циклу проекту.

Для методології Scrum характерною є практика, коли на кожному етапі вносяться корективи до проекту, що робить в підсумку продукт вищої якості. Тому проектування має враховувати зміну інформаційних потреб користувачів та забезпечити можливості корегування та уточнення деталей.

Згідно зі SCRUM формується такий склад членів проектною команди:

- проектний менеджер, або Scrum Master;
- архітектор, або Architect;
- технічний керівник, або Tech Lead;
- розробник, або Developer;
- UI / UX дизайнер, або UI / UX designer).

Відповідно до схеми процесів (див. рисуюнок 1) з урахуванням методології SCRUM побудуємо матрицю відповідальності для етапу проектування Web-орієнтованих інформаційних систем (таблиця 1).

Таблиця 1 – Матриця відповідальності для етапу проектування Web-орієнтованих інформаційних систем

	1	2	3	4	5
Scrum Master	-/+	+/-	+/-	+	+
Architect	-/+	+/-	+/-	+	+
Tech Lead	-/+	-/+	-/+	+/-	-/+
Developer		+/-	+	+	+/-
UI / UX designer	-/+	-/+	+/-	+/-	+/-

На етапі проектування Web-орієнтованих інформаційних систем на основі гнучкої методології SCRUM функції Scrum Master не передбачають необхідності постійного контролю виконання завдань, а зводяться лише до постановки завдань конкретному виконавцеві. Проектна команда (Team Scrum)

на основі принципів SCRUM є крос-функціональною та самокерованою. Виконання всіх процесів координується між членами проектною командою на основі самоорганізації, тому для шостого процесу не передбачається окремого виконавця, оскільки всі члени команди відповідають за цей процес. Незважаючи на різноманітність фахівців всередині команди, команда діє як єдине ціле, і результати її діяльності теж оцінюються як результат спільної роботи.

Існує ряд артефактів які використовуються в Scrum:

- Product Backlog – це список усіх вимог, які потрібно зробити за проектом. Всі вимоги описані за єдиним шаблоном, який називають User Story (призначена для користувача історія);

- Sprint Backlog – це список усіх вимог, які потрібно зробити в найближчий спринт. Всі вимоги повинні бути розділені на завдання і оцінені;

- Sprint Goal – це короткий опис того, заради чого виконується цей спринт;

- Sprint Burndown Chart – дослівно «діаграма згорання»; як елементи, що «згорають», виступають людино-години або ідеальні одиниці; діаграма оновлюється кожного разу, коли завершується якась задача.

Що ж до процесів, у Scrum існують такі процеси:

- Sprint Planning Meeting – зустріч з планування спринту, виконується перед початком спринту, команда вибирає вимоги з Product Backlog і формує Sprint Backlog;

- Daily Meeting – щоденна зустріч команди;

- Sprint Review – задача спринту PO, демонстрація отриманого результату;

- Retrospective – ритуал, спрямований на обмін досвідом всередині команди.

Для аналізу ефективності етапу проектування Web-орієнтованих інформаційних систем на основі гнучкої методології SCRUM використовується принцип зворотного зв'язку. Це дозволяє побачити безпосередню реакцію користувача. Тому доцільним є організації можливостей покрокових релізів, що забезпечує внесення змін у готовий продукт. До моменту офіційного випуску продукту або складної програми командою будуть усунені всі недоліки і вдосконалені функції.

Методологія SCRUM дає можливість знизити ризики на етапі проектування Web-

орієнтованих інформаційних систем. До найбільш поширених ризиків відносять: ринковий, технічний і фінансовий. SCRUM допомагає мінімізувати ринковий ризик за рахунок покрокової реалізації процесів. Для усунення технічного ризику доцільне створення кількох різних прототипів, щоб оцінити кращий до повної реалізації розробки програмного продукту. Фінансові ризики найбільш небезпечні для компаній. Багато компаній створюють інноваційні продукти, але не в змозі продати їх за ціною, яка принесе прибуток. Можливий шлях мінімізації ризиків – пропонувати користувачам покрокові релізи, щоб дізнатися про інформаційні потреби користувачів.

Проектування Web-орієнтованих інформаційних систем на основі гнучкої методології SCRUM має наступні особливості:

1. Методологія Scrum є чутливою до організації робочого процесу, тому необхідно максимально точно здійснювати планування задач при виконанні кожного процесу проектування, щоб уникнути можливих збоїв та помилок.

2. Scrum може бути застосовано в управлінні проектуванням Web-орієнтованих інформаційних систем, якщо вимоги не суперечать принципам та ідеології методології Scrum. Тому не рекомендується використання Scrum у fixed-cost або fixed-time проектах. Так, суть цієї методології має на увазі можливість внесення змін у проект на будь-якому етапі його розробки, в тому числі на етапі проектування.

3. Методологія Scrum орієнтована на інформаційні потреби користувача, і її можна адаптувати до різних типів роботи.

4. Важливою особливістю і перевагою є можливість створення потенційно робочого і функціонального продукту після завершення кожного спринту на етапі проектування.

5. Оскільки Scrum є похідною від методології Agile, то в її функціоналі не передбачено можливість планування комунікацій і реакції на ризики, що ускладнює управління проектуванням Web-орієнтованих інформаційних систем.

6. Продуктивна робота в Scrum повинна проводитися професійною та функціональною командою проекту, створення якої пов'язане з чималими витратами на відбір і навчання персоналу.

Виходячи з перелічених вище особливостей проектування Web-орієнтованих інформа-

ційних систем на основі гнучкої методології Scrum, можемо виділити такі способи підвищення ефективності й усунення недоліків у ході реалізації процесів проектування:

1. Надання оцінки складності завдань у процесах проектування Web-орієнтованих інформаційних систем. Зазвичай, чим швидше реалізується проектування, тим скоріше завершується проект в цілому. Якщо надати оцінку складності завданням, то з'являється можливість розподіляти завдання залежно від рівня кваліфікації фахівців. Також, знаючи рівень складності завдання, з двох завдань з однаковим пріоритетом можна прийняти управлінське рішення про вибір з цих завдань більш вигідного, спираючись на вартість реалізації цього завдання.

2. Використання багаторівневої ієрархії завдань. При цьому кожна задача може розбиватися на підзадачі, а кожна з підзадач може бути розділена ще на завдання і т. д. Цей метод називається декомпозицією [10]. Декомпозиція завдань – метод, який використовує структуру завдання і дає можливість замінити рішення однієї великої задачі рішенням серії менших задач, нехай і взаємопов'язаних, але простіших, що забезпечує можливість формування спринту.

3. Декомпозиція як процес розбиття дає змогу розглядати будь-яку досліджувану систему як складну, що складається з окремих взаємопов'язаних підсистем, які, в свою чергу, також можуть бути розбиті на частини. Цей метод дає можливість ефективного розподілу і рішення завдань між виконавцями в ході спринту. Також метод розширює межі використання методології SCRUM на інших етапах проекту розробки Web-орієнтованих інформаційних систем.

4. Тестування завдань на кожному з рівнів ієрархії. Мета тестування – продемонструвати розробникам і замовникам, що програма відповідає вимогам, виявити ситуації, в яких поведінка програми є неправильною, небажаною або не відповідає специфікації. Це забезпечить можливість уникнення накопичення помилок, адже іноді на пошук і усунення на пізній стадії проектування витрачається більше часу і ресурсів, ніж, якби цю помилку виправили відразу. Якщо розробка та тестування пройшли вдало, завдання позначається виконаним.

5. Переоцінка пріоритетів на кожній ітерації спринту. Спринт у контексті методології

SCRUM – ітерація, в ході якої створюється функціональне зростання програмного забезпечення. Переоцінка пріоритетів завдань на кожній ітерації спринту дає можливість більш ефективного розподілу ресурсів проекту. Протягом періоду чергової ітерації вирішуються завдання, обговорюються нові ідеї, а деякі завдання можуть перейти на другий план.

Проектування Web-орієнтованих інформаційних систем на основі застосування гнучкої методології розробки програмних продуктів Scrum забезпечує можливості усунення основних проблем у процесах проектування та підвищує ефективність проектування, а також забезпечує можливості отримання якісного продукту, що задовольняє інформаційні потреби користувачів

Висновки. Таким чином, в роботі розглянуто можливості використання гнучкої методології Scrum на етапі проектування Web-орієнтованих інформаційних систем та особливості проектування в умовах Scrum. Досліджено основні процеси проектування Web-орієнтованих інформаційних систем на основі застосування методології Scrum, розглянуто переваги та недоліки, а також розглянуто та обґрунтовано ролі, артефакти та процеси. Представлено способи підвищення ефективності і усунення недоліків у ході реалізації процесів проектування. Необхідно відзначити, що застосування гнучкої методології Scrum як при проектуванні, так і в управлінні проектом розробки Web-орієнтованих інформаційних систем забезпечить можливості отримання якісного кінцевого продукту, а також оптимального використання ресурсів та часу.

Список літератури

- [1] С. В. Боцман, "Проектування веб-орієнтованої інформаційної системи обліку хворих лікаря невропатолога", на *XI регіональній студ. наук.-техн. конф. Наука – перші кроки: тези доп.* (м. Маріуполь, 24-28 квіт. 2017 р.): в 4 т. / ДВНЗ «ПДТУ». Маріуполь, 2017, т. 4, с. 23-24.
- [2] О. В. Мацібора, "Веб-орієнтовані геоінформаційні системи та їх використання для обробки палеогеографічних даних", *Український географічний журнал*, (1), с. 51-58, 2019. [Електронний ресурс]. Ре-

- жим доступу: <https://doi.org/10.15407/ugz2019.01.051>
- [3] K. Golhani, A. S. Rao, and J. C. Dagar, "Utilization of open-source Web GIS to strengthen climate change informatics for agriculture", in *Climate Change Modelling, Planning and Policy for Agriculture*, Springer India, 2015, pp. 87-91. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-81-322-2157-9_10
- [4] K. D. Schewe, and B. Thalheim, "Design and development of Web information systems", in *Systematic Development of Web Information Systems*. Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature, 2019, p. 2. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-662-58824-6_13
- [5] S. Orenga-Roglá, and R. Chalmeta, "Methodology for the implementation of knowledge management systems 2.0", *Business & Information Systems*, Springer, vol. 61, iss. 2, pp 195-213, April 2019.
- [6] Х. Книберг, и М. Скарин, *Scrum и Kanban: выжимаем максимум*. C4 Media Inc, Изд. InfoQ.com., 2010.
- [7] М. Кон, *Scrum: Гибкая разработка ПО. Описание процесса успешной гибкой разработки программного обеспечения. Диалектика*. Вильямс, 2015.
- [8] S. Jeff, *SCRUM. The art of doing twice the work in half the time*. New York, USA: Crown Business, 2016.
- [9] И. Ю. Коцюба, А. В. Чунаев, и А. Н. Шиков, *Основы проектирования информационных систем: учеб. пособ.* Санкт-Петербург, Россия: Ун-т ИТМО, 2015.
- [10] Т. О. Прокопенко, та А. П. Ладанюк, *Інформаційні технології управління організаційно-технологічними системами: монографія*. Черкаси, Україна: Вертикаль, видавець Кандич С.Г., 2015.
- [1] S. V. Botsman, "Designing a web-based information system for the accounting of patients by a neurologist", in *XI Regional Student Sci.-Tech. Conf. Science – the First Steps: theses of reports* (Mariupol, April 24-28, 2017): in 4 vol., Mariupol, 2017, vol. 4, pp. 23-24 [in Ukrainian].
- [2] O. V. Matsybora, "Web-oriented geoinformation systems and their use for processing paleogeographic data", *Ukrainskyi geographichnyi zhurnal*, (1), pp. 51-58, 2019 [in Ukrainian].
- [3] K. Golhani, A. S. Rao, and J. C. Dagar, "Utilization of open-source Web GIS to strengthen climate change informatics for agriculture", in *Climate Change Modelling, Planning and Policy for Agriculture*, Springer India, 2015, pp. 87-91. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-81-322-2157-9_10
- [4] K. D. Schewe, and B. Thalheim, "Design and development of Web information systems", in *Systematic Development of Web Information Systems*. Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature, 2019, p. 2. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-662-58824-6_13
- [5] S. Orenga-Roglá, and R. Chalmeta, "Methodology for the implementation of knowledge management systems 2.0", *Business & Information Systems*, Springer, vol. 61, iss. 2, pp 195-213, April 2019.
- [6] H. Kniberg, and M. Skarin, *Scrum and Kanban: squeeze the maximum*. C4 Media Inc, Ed. InfoQ.com., 2010 [in Russian].
- [7] M. Cohn, *Scrum: Flexible software development. Description of the process of successful agile software development. Dialectics*. Williams, 2015 [in Russian].
- [8] S. Jeff, *SCRUM. The art of doing twice the work in half the time*. New York, USA: Crown Business, 2016.
- [9] I. Yu. Kotsyuba, A. V. Chunaev, and A. N. Shikov, *Fundamentals of information systems designing: textbook*. St. Petersburg, Russia: ITMO Un-ty, 2015 [in Russian].
- [10] Т. О. Prokopenko, and А. P. Ladanyuk, *Information technologies of management by organizational and technological systems: monograph*. Cherkasy, Ukraine: Vertical, publisher Kandych S.G., 2015 [in Ukrainian].

References

K. V. Kolesnikov, *Ph. D., associate professor,*
e-mail: k.kolesnikov@chdtu.edu.ua

V. S. Haryachiy, *student*
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

SPECIAL ASPECTS OF WEB-ORIENTED DATA SYSTEM DESIGN BASED ON SCRUM FLEXIBLE METHODOLOGY

The article deals with the possibility of using flexible Scrum methodology at the stage of designing Web-oriented information systems and the features of designing under Scrum conditions. Designing is a decisive step in the development of any information systems, because it is this stage that lays the foundations and ways to implement ideas which determine the functioning of the system in the future. Therefore, in the process of designing Web-oriented information systems, it is important to observe the basic principles of design, as well as the schemes of implementation of this process. However, in order to achieve product stability, security and functionality sustainability, it is necessary to apply such methodology in the course of development, which will allow the constant monitoring and communication between project team members, ensuring the design process itself.

The experience of designing Web-oriented information systems now shows that it is logically complex, requiring the expenditure of much labour and time work which requires highly qualified specialists who are members of the project team and are involved in this stage. Productivity, constant monitoring and interchangeable adapters are important.

The basic processes of designing Web-oriented information systems based on the application of Scrum methodology are explored, the advantages and disadvantages are considered, as well as the roles, artifacts and processes are analyzed and substantiated. The ways of the efficiency increase and shortcomings elimination during the implementation of designing processes are presented.

In conclusion it is necessary to mention that the use of flexible Scrum methodology both in designing and project management of Web-oriented information systems will ensure the possibilities of obtaining the qualitative final product and optimal resources and time use.

Keywords: *Web-oriented information systems, design, flexible Scrum methodology, multilevel task hierarchy, task decomposition, responsibility matrix.*

[0000-0003-1952-6144] **П. В. Ступень**, к.т.н, доцент,

e-mail: stek2000@gmail.com

[0000-0001-5947-2924] **К. В. Дікусар**, старший викладач,

e-mail: semuella@gmail.com

А. А. Рябой, магістр,

e-mail: atasyll@gmail.com

Одеський національний політехнічний університет
пр. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАДНАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ У РАКУРСІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

Дослідження присвячене розвитку моделей аналізу та оцінюванню ризиків інформаційної безпеки в комп'ютерних мережах, які використовуються при розробці систем захисту інформаційних ресурсів підприємств та при аудиті рівня захисту інформаційних систем, які вже функціонують, розробленню сімейства моделей безпеки комунікаційного обладнання комп'ютерних мереж.

Розроблені алгоритми та моделі були реалізовані в системі аналізу та виправлення порушень інформаційної безпеки, використання якої дало можливість скоротити час виправлення наслідків таких порушень.

Виявлено основні елементи порушень, які описуються інформаційною структурою та роблять вплив на діяльність інформаційних систем. Визначено, що більшість подій інформаційної безпеки пов'язані з комунікаційним обладнанням комп'ютерних мереж, на основі яких функціонують інформаційні системи.

Подальші дослідження були спрямовані на пошук та розробку моделей безпеки комунікаційних рівнів функціонування комп'ютерних мереж та системи виправлення порушень інформаційної безпеки. Для реалізації запропонованих алгоритмів розроблено ряд моделей, які описують характеристики мережного обладнання з позиції безпеки.

Ключові слова: інформаційна безпека, комп'ютерна мережа, комунікаційне обладнання, модель безпеки, порушення безпеки, комутація, тунелювання.

Вступ. За останні роки зловмисна активність у глобальній мережі постійно підвищується, складність атак на інформаційні системи зростає з дуже великою швидкістю, зростають складність та різноманіття вірусних програм, які використовуються для отримання фінансової вигоди або нищення інформації [1, 2]. В процесі функціонування інформаційних систем та комп'ютерних мереж адміністраторам необхідно впроваджувати багато моделей інформаційної безпеки, таких як: аналіз ризиків, аналіз та розслідування фактів порушення безпеки. Проте ці заходи часто ігноруються ІТ-спеціалістами. Набагато частіше спеціалісти з інформаційної безпеки стикаються з необхідністю обробляти факти порушень, які вже сталися.

Однією з причин існуючого стану речей є відсутність надійних комплексних методів, які дають змогу в автоматичному режимі протидіяти порушенням безпеки [3-6]. Велика кількість процесів та протоколів інформацій-

ного захисту виконуються інженерами з інформаційної безпеки в ручному режимі, з використанням окремих утиліт, або сценаріїв захисту власної розробки, що потребує багато часу і перешкоджає оперативному вирішенню виникаючих проблем, що в багатьох випадках призводить до фінансових втрат підприємств і організацій. Також більшість процесів виправлення наслідків фактів порушення мережевої безпеки ґрунтується на власному досвіді адміністраторів, що обмежує коло можливих сценаріїв їх виправлення. Таким чином, розробка методів аналізу інформаційних систем та моделей виправлення порушень у контексті автоматичної обробки рутинних операцій з виявлення проблем у системі та їх вирішення є дуже необхідною.

Аналіз останніх досліджень. У сучасних інформаційних системах та мережах для опису процедури управління подіями порушення безпеки використовується класична

модель безперервного поліпшення процесів, що отримала назву від циклу Шухарта–Демінга, – модель PDCA (Плануй, Plan – Виконуй, Do – Перевірйай, Check – Дій, Act). Стандарт ISO 27001 описує модель PDCA як основу функціонування всіх процесів системи управління інформаційною безпекою. У багатьох великих компаніях впроваджена служба підтримки Service Desk, в обов'язки якої входить управління інцидентами в галузі інформаційних технологій. Процедура управління IT-інцидентами регулюється стандартом ISO IEC 20000: 2005.

Аналіз сучасного стану систем управління інформаційною безпекою показав, що існуюча безліч і різноманіття способів інформаційних атак не дають можливості пов'язати їх єдиними критеріями та показниками оцінювання, що значно ускладнює аналіз фактів подій порушення, їх класифікацію, реєстрацію, розслідування та адекватну і швидку реакцію на них [7, 8].

Метою роботи є скорочення часу реакції на виникнення порушення інформаційної безпеки та автоматизація даних операцій за рахунок розробки моделей безпеки основних рівнів функціонування комп'ютерних мереж.

Виклад основного матеріалу. Виходячи зі структури порушення, а саме впливу вразливостей та пов'язаних з ним сценаріїв загроз, зроблено висновок, що для реалізації сценаріїв виправлення причин виникнення порушень інформаційної безпеки необхідно врахувати такі фактори [9, 10]:

- кількість та типи мережного обладнання, яке функціонує в інфраструктурі системи;
- особливості програмного забезпечення, яке функціонує у складі системи;
- наявність механізмів інформаційного захисту інформації в системі;
- можливість централізованого керування відмовами у системі.

З урахуванням цих факторів, представлено основні класи сценаріїв, які необхідні для виправлення фактів порушення безпеки інформаційної системи або мережі. При цьому за певними ознаками можна виділити два класи сценаріїв – сценарії виправлення в мережі (рис. 1) та сценарії виправлення додатків. Сценарії, пов'язані з порушеннями безпеки у мережі, можна розділити на такі типи:

- вирішення проблем комутації;
- вирішення проблем маршрутизації;

- вирішення проблем тунелювання;
- вирішення проблем фільтрації;
- вирішення проблем виявлення.

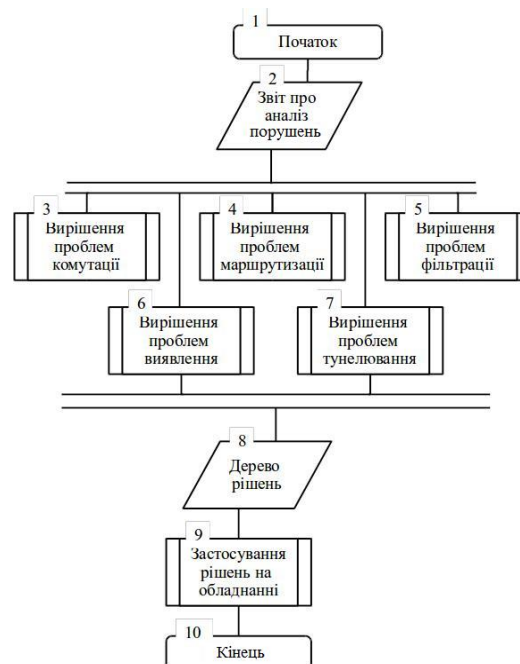


Рисунок 1 – Алгоритм виправлення порушень мережевої безпеки на рівні мережного обладнання

Процес складається з шести процедур, які передбачають втручання в роботу мережного обладнання.

Блок 3 описує вирішення проблем на рівні комутації. Враховуючи, що це основний рівень для корпоративних мереж, більшість проблем виявляється також на ньому. Основними операціями тут є аналіз налаштувань віртуальних мереж, таблиці ARP протоколу, таблиць MAC-адрес, механізмів протоколу STP та PortSecurity. Система аналізує інформацію про порушення та приймає рішення про необхідність внесення коректив у налаштування комутаторів.

Блок 4 описує вирішення проблем на рівні маршрутизації. Якщо мережна інфраструктура організації настільки велика, що необхідно використання підмережі маршрутизаторів, виникає необхідність здійснювати їх контроль. Основними методами маршрутизації всередині мережі є Router-on-a-stick для віртуальних мереж та статичні маршрути між підмережами. Це достатньо прості налаштування і потребують втручання у налаштування інтерфейсів та роботу статичного маршруту.

Блок 5 описує вирішення проблем фільтрації. При виявленні порушень, пов'язаних з помилками при фільтрації трафіку, необхідно використовувати сценарії, які виправляють програмні та апаратні міжмережеві екрани, проксі-сервери та списки доступу.

Блок 6 описує вирішення проблем з виявленням вторгнень. Якщо в системі використовується система виявлення вторгнень, можливі порушення, пов'язані з помилками першого та другого роду в роботі цих систем. При цьому необхідно втручання в сигнатури цієї системи або перенавчання системи за новими правилами функціонування трафіку.

Блок 7 описує вирішення проблем тунелювання. При використанні тунелів для підключення віддалених офісів та працівників виникають порушення, пов'язані з несанкціонованим доступом до ресурсів іншими особами. При цьому необхідні сценарії, які передбачають переналаштування або ліквідацію тунелю для підвищення безпеки системи.

В результаті виконання цих процедур формується загальне дерево рішень для конкретного порушення, яке надходить до виконавчої процедури алгоритму (блок 9). В цьому блоці виконуються сценарії адміністраторів, які автоматично, або напівавтоматично виконують зміни налаштувань мережного обладнання, згідно з представленим рішенням.

Для реалізації алгоритму було розроблено ряд моделей, які описують характеристики мережного обладнання у ракурсі безпеки:

- модель безпеки комутації;
- модель безпеки тунелювання;
- модель безпеки екранування;
- модель безпеки маршрутизації;
- модель безпеки виявлення вторгнень.

Комутація в комп'ютерних мережах реалізована комутаторами другого та третього рівнів [11]. Відповідно, розроблена модель описує характеристики комутатора, які впливають на рівень безпеки та надійності інфраструктури мережі. В загальному рівні модель описується наступним чином:

$$K = \{M, \{TS\}, \{PS\}\}, \quad (1),$$

де M – параметр з діапазону $[0..2]$, який характеризує рівень ієрархії комутатора в мережі. 0 – рівень доступу, 1 – рівень розподілу, 2 – рівень ядра; $\{TS\} = \{\{Trv\}, \{TPG\}\}$ – множина параметрів використання захисту від петель, де $\{Trv\}$ – множина параметрів для кож-

ної віртуальної мережі, $\{TPG\}$ – множина параметрів для кожної фізичної групи комутаторів; $\{PS\} = \{\{PMAC\}, \{PVL\}, \{PARP\}\}$ – множина параметрів використання технології захисту портів комутатора, де $\{PMAC\}$ – множина параметрів вивчення MAC-адрес, $\{PVL\}$ – множина параметрів налаштувань реакції на зміну в параметрах $\{PMAC\}$, $\{PARP\}$ – множина таблиць MAC-адрес комутаторів.

Використання цієї моделі дає можливість аналізувати стан системи комутації в мережі та приймати рішення щодо змін в роботі алгоритмів комутації. Для цього необхідно використання централізованої системи, яка побудована на основі протоколу SNMP, або спеціальних сценаріїв, які дають змогу автоматично виконувати команди програмної оболонки комутаторів.

При розгортанні тунелів VPN в комп'ютерних мережах необхідно враховувати особливості кінцевих пристроїв, а саме: зі сторони ресурсів інформаційної системи встановлений спеціальний шлюз, або маршрутизатор з підтримкою відповідних функцій; зі сторони клієнта встановлене спеціалізоване програмне забезпечення; зі сторони інших мереж встановлений спеціальний шлюз, або маршрутизатор [12].

Враховуючи, що в контексті дослідження розглядаються порушення безпеки в основній мережі, розроблена модель описує безпеку шлюзової частини розгорнутого VPN тунелю.

Представлена модель характеризує основні параметри тунелю і виглядає наступним чином:

$$VTUN = \{\{VP\}, \{VTR\}, \{VNET\}\}, \quad (2)$$

де $\{VP\}$ – тип тунельного протоколу, 0 – IPSec, 1 – GRE, 2 – SSL, 3 – L2TP, 4 – PPP; $\{VTR\}$ – тип транспорту між мережами, 0 – режим транспорту, 1 – режим тунелю; $\{VNET\}$ – тип з'єднання з кінцевою точкою, 0 – Site-to-Site, 1 – Remote access.

Множина цих параметрів для кожного шлюзу дає можливість аналізувати типові сценарії розгортання захищених тунелів та вносити зміни у відповідні характеристики функціонування пристрою.

Зміни вносяться за рахунок спеціальних сценаріїв, які оперують налаштуваннями обладнання на рівні командного рядку операційної системи шлюзу.

На рівні екранування трафіку необхідно враховувати, на якому рівні моделі TCP/IP виконується фільтрація трафіку [13]. Враховуючи стандартні типи мережних екранів, модель може бути представлена наступним чином:

$$FW = \{\{LY, FT\}, \{FVL\}\}, \quad (3)$$

де: LY – рівень фільтрації, 0 – каналний рівень, 1 – мережний рівень, 2 – рівень додатків; FT = {FMAC, FACL, FPR, FST, FIDS} – множина типів фільтрації трафіку, FMAC – наявність фільтрації MAC адрес, FACL – наявність пакетної фільтрації, FPR – використання проксі-сервера, FST – використання фільтрації на основі стану, FIDS – параметри розширення функцій фільтрації (модель безпеки вторгнень); {FVL} = {FD, FS, FA} – множина запланованих реакцій на події, FD – скид пакетів, FS – журналювання події, FA – повідомлення про подію.

Параметри типів фільтрації та реакцій на подію можуть комбінуватися всередині відповідної множини або становити порожню множину. Множина реакцій на події є одним із вхідних параметрів для аналізу рішень порушень безпеки.

Вирішення проблем екранування нині не може бути повністю автоматизованим процесом. Це пов'язано з тим, що втручання в фільтрацію трафіку в окремих випадках вимагає внесення часткових або повних змін у правила фільтрації, порядку виконання таких правил та їх видалення [14]. Проте можливе використання сценарних підходів, які дають можливість виконувати передумовлені дії за правилами в разі виникнення відповідного інциденту.

Модель безпеки виявлення вторгнення передбачає використання сумісної моделі з моделлю екранування, а саме розширює параметр фільтрації на основі стану. Це обумовлено тим, що системи виявлення вторгнень безпосередньо виконують контроль вхідного/вихідного трафіку мережі. Системи виявлення вторгнень у реальних системах завжди співпрацюють з системами фільтрації і дають відповідні команди корегування фільтрації трафіку. Тому представлена модель розширює модель фільтрації трафіку наступним чином:

$$FIDS = \{FTIDS, FSIDS\}. \quad (4)$$

У цій моделі параметри описують тип системи виявлення вторгнення і тип виявлення вторгнення.

Тип системи визначає два варіанти: 0 – локальна система, 1 – мережна система. В разі локальної системи виявлення необхідно асоціювати її з конкретним обладнанням мережі (комутатори, маршрутизатори, сервери тощо).

Тип виявлення включає два варіанти. 0 – сигнатурний метод виявлення, 1 – метод виявлення аномалій.

Модель безпеки маршрутизації необхідна, коли сегментація мережі приводить до необхідності використання відповідного обладнання. Для малих мереж з кількістю маршрутизаторів до трьох штук ця модель не використовується:

$$M = \{MR, MR, MH, MU\}, \quad (5)$$

де MR – тип маршрутизації, 0 – статична, 1 – динамічна, 2 – між віртуальними мережами; MR – тип протоколу динамічної маршрутизації, 0 – OSPF, 1 – EIGRP, 2 – RIP, 3 – BGP; MH – наявність (0) або відсутність (1) шифрування даних; MU – тип оновлення інформації, 0 – передача повної таблиці маршрутизації, 1 – часткова передача таблиці маршрутизації.

У разі використання статичної маршрутизації та маршрутизації між віртуальними мережами усі інші параметри не враховуються при аналізі, тому що маршрутна інформація не розповсюджується в мережі [15].

Виправлення проблем маршрутизації полягає у виконанні аналізу лістингу параметрів маршрутизатора, таких як час оновлення, час обміну контрольними пакетами, встановлення відношень сусідства та ін.

Для оцінювання ефективності розробленої системи було проведено порівняльні оцінні розрахунки, а також систему було випробувано в корпоративному секторі інформаційних систем.

Оцінювання проводилося в двох напрямках: 1. Виправлення реальних інцидентів (рисунк 2), які виникали під час спостереження; 2. Виправлення штучних інцидентів (рисунок 3), які генерувались як тестові події.



Рисунок 2 – Час виправлення реальних інцидентів системи

В результаті проведених дослідницьких заходів було отримано наступні дані:

- кількість інцидентів, які було виправлено;
- кількість реальних інцидентів;
- кількість тестових інцидентів;
- час, витрачений на виправлення інцидентів з використанням розробленої системи та без неї.



Рисунок 3 – Час виправлення штучних інцидентів

В результаті оцінених розрахунків було отримано наступні результати:

1. Кількість виправлених інцидентів з використанням системи майже збігається з виправленими інцидентами без використання системи. Без використання системи за аналогічний період часу було виправлено на чотири інциденти менше;

2. Час виправлення реальних інцидентів з використанням розробленої системи скоротився на 27,4 % порівняно з виправленням без використання системи;

3. Час виправлення штучних інцидентів з використанням розробленої системи є меншим на 33,9 % порівняно з виправленням без використання системи.

Для достовірності оцінок сценаріїв виправлення було проаналізовано однакову кількість інцидентів у ході однакового проміжку часу. Це обумовлює той факт, що кількість

вирішених інцидентів не збігається. Однак реально всі інциденти були вирішені, що свідчить про те, що система в автоматичному режимі здатна виправляти основні типи інцидентів безпеки

Висновок. Використання вищенаведених моделей у системі виправлення наслідків порушень інформаційної безпеки дало можливість повністю або частково автоматизувати реакцію на події безпеки, які виникають в інформаційних системах. Розроблені моделі дають можливість врахувати особливості інформаційної системи, характер сценаріїв загроз та особливості мережного обладнання. Проведені випробовування показали, що розроблена на основі моделей система дає змогу вирішувати більшість виявлених порушень без суттєвого втручання адміністраторів та суттєво зменшує час самого виправлення порушення. Реальні події порушення інформаційної безпеки, які були більшою мірою пов'язані з вірусами та помилками, були вирішені майже на 30 % швидше; тестові порушення, які склалися зі штучної DoS атаки та помилок на обладнанні, вирішувалися на 34 % швидше.

Список літератури

- [1] Д. О. Сікорський, "Аналіз принципів побудови моделей інформаційної безпеки в корпоративних інформаційних системах", *Ефективна економіка*, № 8, серпень, 2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4257>
- [2] М. О. Мельник, Г. Д. Нікітін, та К. О. Мезенцева, "Аналіз побудови моделі політики інформаційної безпеки підприємства", *Системи обробки інформації*, № 2 (148), с. 126-128, 2017.
- [3] О. К. Юдін, та С. С. Бучик, "Концептуальна модель інформаційної безпеки державних інформаційних ресурсів", *Наукоємні технології*, № 4 (24), 2014.
- [4] А. В. Потий, "Формальная модель процесса защиты информации", *Радиоелектроніка і комп'ютерні системи*, № 5, с. 128-133, 2006.
- [5] С. Н. Ильяшенко, "Составляющие экономической безопасности предприятия и подходы к их оценке", *Актуальні проблеми економіки*, № 3, с. 12-19, 2003.
- [6] Н. Кабірова, "Мовчання ягнят: як примусити персонал зберігати секрети фірми",

- Галицькі контракти, № 45, с. 34-36, 2004.
- [7] А. Кремер, "Информационная безопасность как важный фактор эффективного управления компанией", *Управление компанией*, № 9, с. 55-56, 2003.
- [8] О. М. Косогов, та А. О. Сірик, "Модельювання процесу оцінювання інформаційної безпеки на основі експертних висновків", *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 2 (26), 2016.
- [9] В. А. Герасименко, *Защита информации в автоматизированных системах обработки данных*, 1-е изд. Москва: Энергоатомиздат, 2010.
- [10] Л. К. Бабенко, и Е. А. Ищукова, *Современные алгоритмы блочного шифрования и методы их анализа*. Москва: Гелиос АРВ, 2006.
- [11] В. А. Галатенко, *Информационная безопасность*. Москва: Финансы и статистика, 2008.
- [12] И. Р. Конеев, и А. В. Беляев, *Информационная безопасность предприятия*. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2003.
- [13] А. А. Мелюк, С. В. Пазизин, и Н. С. Погужин, *Введение в защиту информации в автоматизированных системах*. Москва: Горячая линия – Телеком, 2001.
- [14] Т. Оглтри, *Практическое применение межсетевых экранов*. Москва: ДМК Пресс, 2001.
- [15] А. В. Соколов, и О. М. Степанюк, *Защита от компьютерного терроризма: справ. пособ.* Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, Арлит, 2002.
- [3] O. K. Yudin, and S. S. Buchik, "Conceptual model of information security of state information resources", *Naukoiemni tekhnologii*, no. 4 (24), 2014 [in Ukrainian].
- [4] V. Potiy, "Formal model of information security process", *Radioelektronika i kompiuterni systemy*, no. 5, pp. 128-133, 2006 [in Russian].
- [5] S. N. Ilyashenko, "Components of economic security of an enterprise and approaches to their assessment", *Aktualni problemy ekonomiky*, no. 3, pp. 12-19, 2003 [in Russian].
- [6] N. Kabirova, "Silence of lambs: how to make the staff keep the firm's secrets", *Halyski kontrakty*, no. 45, pp. 34-36, 2004 [in Ukrainian].
- [7] Kremer, "Information security as an important factor in the effective management of a company", *Upravleniye kompaniyey*, no. 9, pp. 55-56, 2003 [in Russian].
- [8] O. M. Kosogov, and A. O. Sirik, "Modeling of the process of information security assessment based on expert findings", *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta obrony*, no. 2 (26), 2016 [in Ukrainian].
- [9] V. A. Gerasimenko, *Information security in automated data processing systems*, 1st ed. Moscow: Energoatomizdat, 2010 [in Russian].
- [10] L. K. Babenko, and E. A. Ischukova, *Modern block cipher algorithms and methods for their analysis*. Moscow: Gelios ARV, 2006 [in Russian].
- [11] V. A. Galatenko, *Information security*. Moscow, Financy i statistika, 2008 [in Russian].
- [12] R. Koneev, and A. V. Belyaev, *Information security of an enterprise*, St. Petersburg: BHV-Peterburg, 2003 [in Russian].
- [13] A. Melyuk, S. V. Pazizin, and N. S. Pogozhin, *Introduction to the protection of information in automated systems*, Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2001 [in Russian].
- [14] T. Ogltree, *Practical application of firewalls*, Moscow: DMK Press, 2001 [in Russian].
- [15] V. Sokolov, and O. M. Stepanyuk, *Protection against computer terrorism: reference manual*, St. Petersburg: BHV-Peterburg, Arlit, 2002 [in Russian].

References

- [1] D. O. Sikorsky, "The analysis of the principles of building information security models in corporate information systems", *Efektivna ekonomika*. no. 8, August, 2015. [Online]. Available: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4257>
- [2] M. O. Melnyk, G. D. Nikitin, and K. O. Mezentseva, "Analysis of building a model of enterprise information security policy", *Systemy obrobky informatsii*, no. 2 (148), pp. 126-128, 2017 [in Ukrainian].

P. V. Stupen, *Ph. D., associate professor*,
e-mail: stek2000@gmail.com

K. V. Dikusar, *senior lecturer*,
e-mail: semuella@gmail.com

A. A. Ryaboy, *master*
e-mail: atasylle@gmail.com
Odesa National Polytechnic University
Shevchenko ave., 1, Odesa, 65044, Ukraine

MODELING OF FEATURES OF COMPUTER NETWORK EQUIPMENT FROM THE PERSPECTIVE OF INFORMATION SECURITY

The study focuses on the development of models for analyzing and assessing information security risks in computer networks that are used in the development of enterprise information security systems and in auditing the level of protection of already existing information systems, the development of a family of security models of computer network communications equipment.

The developed algorithms and models have been implemented in the system of analysis and correction of information security violations, the use of which has allowed to reduce the time of correction of the consequences of such violations.

The basic elements of violations, which are described by the information structure and determine the influence on the activity of information systems, are revealed. It is determined that most information security events are related to the communication equipment of the computer networks on which the information systems operate.

Further research has been aimed at finding and developing security models for communication levels of operation of computer networks and a system for correcting information security violations.

To implement the algorithm, a number of models, that describe the characteristics of network equipment in the security perspective, have been developed. The model of switch security describes the switch characteristics that affect the security and reliability of the network infrastructure. The tunneling security model reflects the security of the gateway portion of the deployed VPN tunnel. The intrusion detection security model involves the use of a compatible model with the shielding model, namely extending the state-based filtering parameter. The routing security model considers the types and protocols of routing.

The use of models in the correcting system of the consequences of information security violations has made it possible to fully or partially automate the response to security events occurring in information systems. The developed models allow to take into account the peculiarities of the information system, the nature of the threat scenarios and the features of the network equipment.

Keywords: *information security, computer network, communication equipment, security model, security violation, switching, tunneling.*

[0000-0002-0009-337X] С. В. Сисоєнко, к.т.н.,

e-mail: s.sysoienko@gmail.com

Д. В. Дахненко, магістрант

e-mail: dahnenko02501@gmail.com

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18000, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РОЗВИТКУ ТУРИЗМУ

Проведене дослідження дало можливість оптимізувати функціональний потенціал інформаційної автоматизованої системи для розвитку туризму. Дослідження показало, що одним із важливих факторів у проведенні оптимізації є швидкість завантаження сторінок та обробки даних з боку сервера. В результаті дослідження та оптимізації було отримано статистику відвідуваності цієї системи, а також ефективність її використання, виявлено основні переваги та недоліки.

Ключові слова: оптимізація, дослідження, система для розвитку туризму, статистика, база даних, авторизація, рефакторинг.

Вступ. У статті приділено увагу дослідженню та оптимізації функціональних можливостей системи для розвитку туризму за допомогою проведення аналізу відвідуваності системи, дослідження ефективності обробки даних з боку сервера.

Існує багато процесів і аспектів, які необхідно враховувати при виборі, розробці, тестуванні, впровадженні та підтримці цілісної системи. Проте аналіз технічної літератури, наукових статей показав, що система має значну кількість вразливих місць, які потрібно оптимізувати та вдосконалити.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналізуючи стан та враховуючи просторовий аспект застосування інформаційних технологій у туризмі [1, 2, 3], було визначено, що досить вагомим і перспективним стає застосування сучасних мультимедійних технологій.

Проведення та організація туристичних послуг, що пов'язані зі щорічним збільшенням кількості туристичних послуг, географічно далеких одна від одної, системою відносин суб'єктів туристичного ринку, яка постійно збільшується, різноманітність типів туризму викликають необхідність дослідження й оптимізацію функціональних можливостей інформаційної системи для розвитку туризму [4].

На сьогоднішній день туризм став невід'ємною галуззю кожної країни світу, тому що це – одна з найбільш прибуткових і поширених галузей серед інших галузей світової економіки. Туризм сприяє зміцненню та по-

ширенню соціальних, економічних і культурних зв'язків.

Всебічне дослідження аспектів туризму є актуальною проблемою, яка обумовлена його багатогранністю та суспільною значущістю. Можна впевнено сказати, що туризм став однією з невід'ємних складових життєдіяльності людей у більшості країн світу та є одним із найперспективніших напрямів соціально-економічної діяльності у XXI столітті. Варто також зазначити, що туристична діяльність увійшла до найбільших експортних галузей світу та стала найрентабельнішою галуззю світової економіки, що визначає актуальність і практичну значущість проблеми і вимагає всебічного її вивчення [5].

Значна роль туризму проявляється під час формування морального та культурного рівня суспільства, що впливає із не зацікавлених у плані прибутку масового об'єкта туристичної діяльності. Турист зазвичай сплачує певну суму грошей за туристичні послуги та очікує, що він проведе час пізнавально, а також гарно відпочине. Це створює передумови для того, щоб об'єкт туризму попередньо побудував собі соціальну й культурологічну основу на позитивний результат подорожі, а саме відпочинок, освоєння навколишнього середовища, знайомство з менталітетом того чи іншого об'єкта туризму. Внутрішній та зовнішній туризм є цікавим, вигідним і пізнавальним для туристів по країнах світу [6].

Для надання оперативної інформації потенційному клієнтові про будь-який тур, що

його цікавить, яка дає можливість швидко і безпомилково вибрати відповідний турпродукт, необхідно оптимізувати функціональний потенціал інформаційної автоматизованої системи [7].

Нині приділяється недостатня увага проблемі ефективного використання інформаційних технологій у туризмі.

Мета дослідження. Метою дослідження було: оптимізувати функціональні можливості та надати обґрунтовані висновки щодо ефективності використання інформаційної системи для розвитку туризму на основі аналізу відвідуваності системи; провести дослідження ефективності обробки даних з боку сервера; обрахувати навантаження на сервер при різних кількостях запитів за секунду за допомогою графіків завантаженості; виявити вразливості та недоліки системи для їх усунення, оптимізувати її функціональні можливості.

Опис об'єкта і методу дослідження. Важливим фактором у подібних системах є захищеність самої системи, а також даних користувача. Один із методів авторизації має назву basic-authentication, він і використовується в цій системі. Наведений метод використовує тіло Hypertext Transfer Protocol (HTTP) [8] для передачі даних користувача, таких як пароль та електронна пошта, тому цей метод виглядає захищеним, адже запити можна перехопити та отримати дані користувача. Для підвищення захисту системи було проведено оптимізацію та зміну методу авторизації на cookie-authentication, який дає змогу використовувати секретний зашифрований ключ. Таким чином, у випадку перехоплення запиту на сервер дані будуть зашифровані так, що без секретного слова неможливо дізнатися дані користувача. На рисунку 1 зображено форму авторизації цієї системи для розвитку туризму.

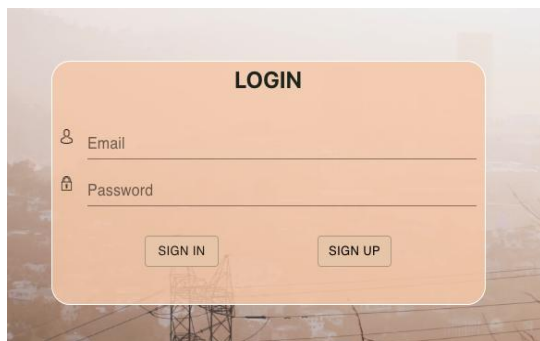


Рисунок 1 – Форма авторизації

«HTTP (Hypertext Transfer Protocol) – це протокол передачі даних, який застосовується

для передачі даних у комп'ютерних мережах» [4]. «Протокол для передачі гіпертекстових документів HTTP відноситься до протоколів моделі OSI 7-го прикладного рівня. Головним призначенням протоколу HTTP є передача веб-сторінок, тобто текстових файлів з розміткою HTML, за допомогою цього протоколу можна успішно передавати й інші файли, які відносяться до веб-сторінок (зображення та інші медіафайли), також можна передавати файли, не пов'язані з ними» [9].

На рисунку 2 зображено сторінку профілю користувача, де можна побачити особисту інформацію. Також тут можна редагувати особисті дані, добавляти або змінювати фото профілю.

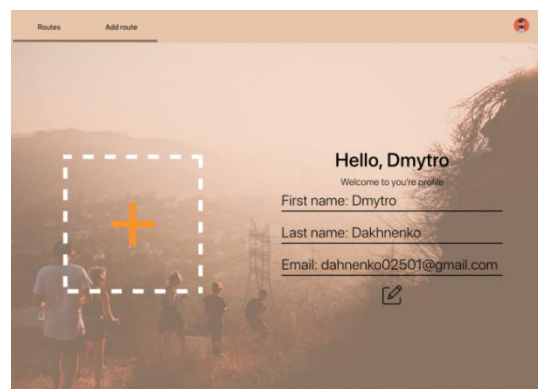


Рисунок 2 – Профіль користувача

З метою підвищення ефективності потрібно провести рефакторинг.

Рефакторинг – перетворення програмного коду, зміна внутрішньої структури програмного забезпечення для полегшення розуміння коду і легшого внесення подальших змін без зміни зовнішньої поведінки самої системи [10].

На рисунку 3 зображено сторінку додавання маршруту, де можна підписати маршрут, вибрати його тип (прогулянка велосипедом, подорож на машині чи піша прогулянка), додати опис та позначити на карті сам маршрут.

Мета рефакторингу – зробити код програми більш легким. Рефакторинг відрізняється від оптимізації продуктивності. Як і рефакторинг, оптимізація не змінює саму програму та її поведінку, а лише прискорює її роботу. В свою чергу оптимізація зазвичай ускладнює розуміння самого коду, що не властиво рефакторингу [9-10].

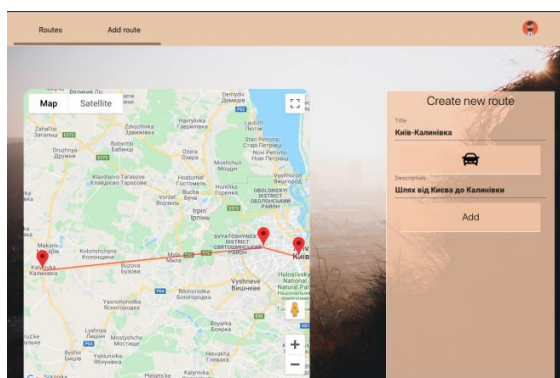


Рисунок 3 – Сторінка створення нових маршрутів

На рисунку 4 зображено перелік усіх доданих користувачами маршрутів (назва, тип маршруту та сам маршрут, відмічений на карті користувачем).

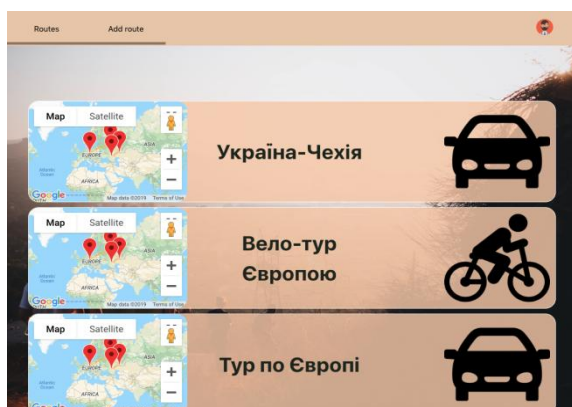


Рисунок 4 – Сторінка переліку всіх маршрутів

Для аналізу відвідуваності користувачами системи було підключено сервіс Google Analytics, що відображає відвідуваність системи користувачами, з якого пристрою той чи інший користувач входить у систему, з якої країни та о котрій годині. Сервіс дає можливість аналізу того, що саме привертає увагу користувачів. На основі даних, отриманих від сервісу, було проведено оптимізацію певних ділянок системи.

Google Analytics (GA) – сервіс, який надає компанія Google, призначений для створення детальної статистики відвідувачів певного веб-сайту. Сама статистика створюється з боку сервера самої компанії, все, що потрібно розробнику, – це розмістити JS-код на сторінці свого сайту. Відстеження коду спрацьовує, коли користувач відкриває сторінку в своєму веб-браузері (за умови, якщо користу-

вач надасть дозвіл використання Javascript у браузері). В GA інтегровано ще один сервіс компанії Google – AdWords. Особливістю цього сервісу є те, що веб-майстер може оптимізувати рекламні та маркетингові кампанії Google AdWords шляхом аналізу даних, отриманих за допомогою сервісу Google Analytics, про те, звідки приходять відвідувачі (з якого ресурсу), як довго вони знаходяться на сайті та де вони знаходяться географічно. Також доступні додаткові можливості, включаючи поділ відвідувачів на групи, користувачі бачать групи оголошень і віддачу від ключових слів у звітах [11].

«JavaScript (JS) – це асинхронна, не строго типізована, динамічна, об'єктно-орієнтована прототипна мова програмування. В мові реалізований стандарт ECMAScript. Використовується переважно для створення ефектів, сценаріїв, побічних ефектів на веб-сторінках, що надає можливість з боку клієнта (пристрій кінцевого користувача) взаємодіяти з користувачем, асинхронно обмінюватися даними з сервером, керувати браузером, змінювати структуру та зовнішній вигляд веб-сторінки» [12].

Важливим фактором у роботі такої системи є стійкість системи та захищеність від Distributed Denial of Service (DDoS) атак. DDoS – напад на сервіс, систему з намірами заблокувати комп'ютерні ресурси для користувачів, які користуються цією системою чи сервісом [12].

Зокрема [13], сукупність взаємопов'язаних даних, що відображає стан об'єктів та їх відносин у розглянутій предметній області і допускає їх використання оптимальним чином для одного або кількох додатків у певній предметній області, являє собою базу даних (БД). У загальному випадку БД містить схеми, таблиці, подання, збережені процедури та інші об'єкти. Дані у базі організовують відповідно до моделі організації даних. Таким чином, сучасна база даних, крім саме даних, містить їх опис і може містити засоби для їх обробки.

База даних є важливим компонентом в архітектурі системи, тому потрібно провести її аналіз та оптимізацію. В системі використовується база даних MongoDB.

«MongoDB – це документо-орієнтована система керування базами даних (СКБД) з відкритим вихідним кодом, яка не потребує створення та опису схеми таблиць. Вона займає місце між швидкими і масштабованими системами, які працюють з даними у форматі «ключ–значення», а також реляційними СКБД, функціональними і зручними у формуванні запитів» [14].

Система управління базами даних – набір взаємопов'язаних даних (баз даних) і програм для доступу до цих даних. Система надає можливості збереження, створення, оновлення та пошуку інформації в базах даних з контролем доступу до даних.

Опис результатів. Отримані результати від сервісу Google Analytics показали нам, що за тиждень, в середньому, системою користуються 246 користувачів, з них 40 – це користувачі смартфонів з операційною системою Android, 18 – користувачі смартфонів з операційною системою iOS, решта використовують персональний комп'ютер, що зображено на рисунку 5.

Сервіс також показав, що найбільш відвідуваними сторінками користувачів є сторінка створення маршрутів (рисунки 3) і сторінка переліку всіх маршрутів (рисунки 4). Тому на цих сторінках було проведено функціональну оптимізацію та рефакторинг.

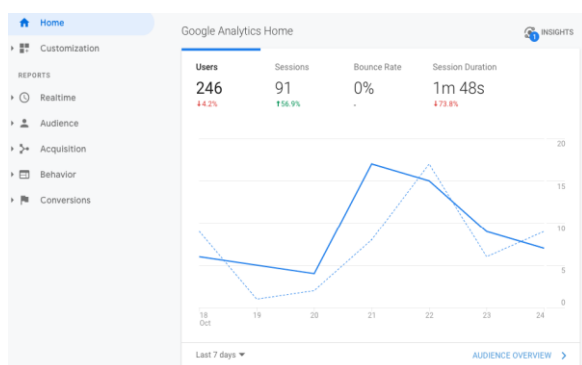


Рисунок 5 – Статистика відвідуваності системи користувачами за тиждень

Отримані дані дають можливість якісно розподілити навантаження сервера на найбільш відвідувані сторінки, а саме – сторінку створення маршрутів (рисунки 3) та сторінку переліку всіх маршрутів (рисунки 4).

Після проведеної оптимізації та рефакторингу коду було отримано статистику з но-

вими даними. Відтепер відвідуваність системи за тиждень є такою: в середньому, системою користуються 785 користувачів, з них 114 – це користувачі смартфонів з операційною системою Android, 57 – користувачі смартфонів з операційною системою iOS, решта використовують персональний комп'ютер (рисунки 6).

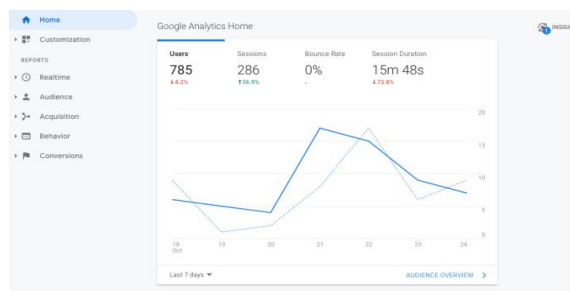


Рисунок 6 – Статистика відвідуваності за тиждень після проведення оптимізації

Наступним кроком був рефакторинг коду, який відповідає за авторизацію в системі, це дає змогу провести заміну методу авторизації на більш захищений. Після рефакторингу було оптимізовано метод авторизації в системі, а саме – замінено метод авторизації basic-authentication на метод cookie-authentication [9-10]. Внаслідок заміни методу процес авторизації користувача став помітно швидшим та надійнішим.

Після проведення аналізу бази даних було виявлено поля і таблиці, які є зайвими та не використовуються в системі. Для того щоб зменшити витрати на зберігання більшої кількості даних, ці поля було видалено.

Під час перевірки коду було знайдено вкладені цикли, які роблять запити до бази даних системи [15]. Такі цикли збільшують навантаження системи, що може призвести до зменшення продуктивності сервера а також вивести СУБД з ладу, тому їх було усунено із системи.

Наступним дуже важливим кроком була перевірка стійкості системи від DDoS атак. Для цього було розроблено систему, яка безперервно робить запити до системи, на той чи інший функціонал. Для першого разу було обрано інтервал 50 запитів в секунду, було використано 330 М (мегабайтів) з лімітованих 838 М (рисунки 7).

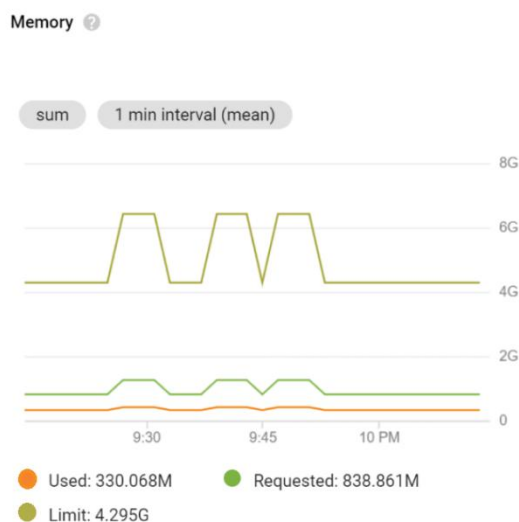


Рисунок 7 – Показники використаної пам'яті при інтервалі 50 запитів у секунду

Наступним було обрано інтервал у 1000 запитів у секунду, після чого система не витримала навантаження і дала збій (рисунок 8).

Використана потужність 1431.985 М більша, ніж відома 1258 М.

Для того, щоб захистити нашу систему від DDoS атак, було проведено фільтрування мережі.

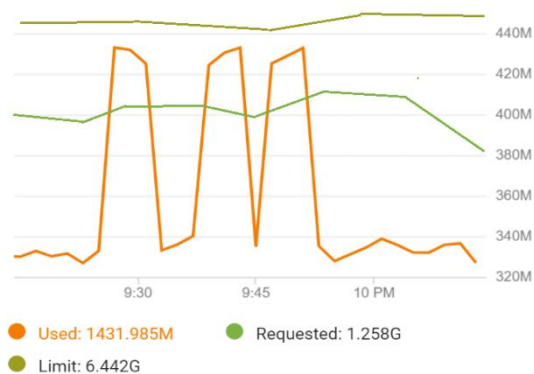


Рисунок 8 – Показники використаної пам'яті при інтервалі 1000 запитів у секунду

Тепер мережа перебирає трафік на себе, обробляє, а також фільтрує його, внаслідок чого до цільового сервера потрапляє тільки відфільтрований, перевірений і якісний трафік від справжніх користувачів. Наступним кроком було автоматичне збільшення потужності серверів шляхом створення нових реплік. Було рознесено активні частини сервера з можливістю їх дублювання. При цьому, якщо якась частина ресурсів виявить-

ся недоступною, інша частина буде функціонувати. Після завершення цих пунктів провели повторний аналіз системи при 1000 запитах у секунду (рисунок 9).

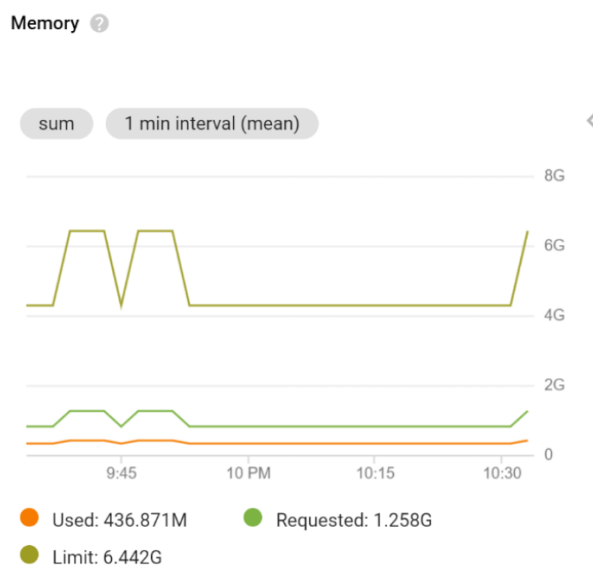


Рисунок 9 – Показники використаної пам'яті при інтервалі 1000 запитів у секунду після оптимізації

Висновки. Шляхом чисельних оптимізацій, проведених для підвищення ефективності використання інформаційної автоматизованої системи щодо розвитку туризму, було удосконалено її функціонал, що дало можливість стверджувати: оптимізована система розрахована на підвищене навантаження та справляється з DdoS-атаками, а проведення часткового рефакторингу на сторінках створення та переліку маршрутів забезпечило підвищення чисельності користувачів цієї розробленої та оптимізованої інформаційної системи.

Список літератури

- [1] О. В. Грицунов, *Інформаційні системи та технології*: навч. посіб. Харків: ХНАМГ, 2010.
- [2] В. І. Ящук, "Аналіз сучасного стану інформаційних технологій та систем в індустрії туризму". *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Економічні науки*, вип. 53, с. 56-60, 2017.
- [3] Н. Н. Кормягина, "Smart-туризм как часть Smart-концепции", *Маркетинг и логистика*: науч.-практ. журн., вып. 6 (14), с. 45-57, 2017.

- [4] С. В. Мельниченко, "Інформаційні технології в туризмі: теоретичні та практичні аспекти". *Вісник Запорізького національного університету*, № 2 (6), с. 129-138, 2010.
- [5] Ю. Б. Миронов, та І. І. Свидрук. "Туризм як чинник економічного розвитку країни", *Науковий вісник НЛТУ України* (Львів), вип. 26.6, с. 255-262, 2016.
- [6] Туризмологія: концептуальні засади теорії туризму: наук.-навч. вид. Київ: КУ-ТЕП, 2008.
- [7] В. П. Гаврилов, *Інформаційні системи і технології в туризмі*: навч. посіб. для студентів напряму підготовки 6.140103 "Туризм". Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. ISBN: 978-966-676-645-1.
- [8] David Gourley, Brian Totty, Marjorie Sayer, Anshu Aggarwal, and Sailu Reddy, *HTTP The Definitive Guide*, O'Reilly. ISBN: 9781565925090.
- [9] Р. Мартин, *Чистый код. Создание, анализ и рефакторинг*. Санкт-Петербург: Питер, 2013. ISBN: 9785446100699.
- [10] М. Фаулер, *Рефакторинг: улучшение существующего кода*, пер. с англ. Санкт-Петербург: Символ-Плюс, 2003. ISBN: 5-93286-045-6. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fktpm.ru/file/61-fauler-refactoring-refactoring-uluchshenie-suschestvujushchego-koda.pdf>
- [11] Брайан Клифтон, *Google Analytics для профессионалов*, 3-е изд., "Диалектика", 2013. ISBN: 978-5-8459-1797-3,
- [12] David R. Brooks, *An introduction to PHP for scientists and engineers: beyond JavaScript*. Moscow: Springer, 2008.
- [13] П. В. Бураков, и В. Ю. Петров, *Введение в системы баз данных*: учеб. пособ. Санкт-Петербург, 2010.
- [14] Kristina Chodorow, *MongoDB: the definitive guide*. Moscow, 2010.
- [15] Р. В. Киричок, "Тест на проникнення як імітаційний підхід до аналізу захищеності корпоративних інформаційних систем", *Сучасний захист інформації*, № 2 (34), 2018. ISSN: 2409-7292.
- systems in the tourism industry", *Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Ekonomichni nauky*, iss. 53, pp. 56-60, 2017 [in Ukrainian].
- [3] N. N. Kormyagina, "Smart tourism as a part of the Smart concept", *Marketing i logistika: sci.-pract. journ.*, iss. 6 (14), pp. 45-57, 2017 [in Russian].
- [4] S. V. Melnichenko, "Information technologies in the tourism: theoretical and practical aspects", *Visnyk Zaporizkoho natsionalnoho universytetu*, no. 2 (6), pp. 129-138, 2010 [in Ukrainian].
- [5] Yu. B. Mironov, and I. I. Svidruk, "Tourism as a factor of country's economic development", *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy* (Lviv), iss. 26.6, pp. 255-262, 2016 [in Ukrainian].
- [6] Tourism: conceptual foundations of tourism theory: sci. ed. Kyiv: KUTEP, 2008 [in Ukrainian].
- [7] V. P. Gavrylov, *Information systems and technologies in tourism: textbook*. Kharkiv: KhNEU im. S. Kuznets, 2016. ISBN: 978-966-676-645-1[in Ukrainian].
- [8] David Gourley, Brian Totty, Marjorie Sayer, Anshu Aggarwal, and Sailu Reddy, *HTTP The Definitive Guide*, O'Reilly. ISBN: 9781565925090.
- [9] R. Martin, *Clean code. Creation, analysis and refactoring*. St. Petersburg: Peter, 2013. ISBN: 9785446100699 [in Russian].
- [10] M. Fowler, *Refactoring: improving the existing code*, transl. from Engl. St. Petersburg: Symbol-Plus, 2003. ISBN: 5-93286-045-6. [Online]. Available: <https://fktpm.ru/file/61-fauler-refactoring-refactoring-uluchshenie-suschestvujushchego-koda.pdf>
- [11] Brian Clifton, *Google Analytics for professionals*, 3rd ed., "Dialectics", 2013. ISBN: 978-5-8459-1797-3 [in Russian].
- [12] David R. Brooks, *An introduction to PHP for scientists and engineers: beyond JavaScript*. Moscow: Springer, 2008.
- [13] P. V. Burakov, and V. Yu. Petrov, *Introduction to database systems: textbook*. St. Petersburg, 2010 [in Russian].
- [14] Kristina Chodorow, *MongoDB: the definitive guide*. Moscow, 2010.
- [15] R. V. Kirichok, "Penetration test as a simulation approach to the analysis of security of corporate information systems", *Suchasnyi zakhyst informatsii*, no. 2 (34), 2018. ISSN 2409-7292 [in Ukrainian].

References

- [1] O. V. Gritsunov, *Information systems and technologies: textbook*. Kharkiv: KhNAMG, 2010 [in Ukrainian].
- [2] V. I. Yashchuk, "Analysis of the current state of information technologies and

S. V. Sysoienko, Ph. D.,
e-mail: s.sysoienko@gmail.com

D. V. Dakhnenko, master
e-mail: dakhnenko02501@gmail.com
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

OPTIMIZATION OF FUNCTIONAL OPPORTUNITIES OF INFORMATION SYSTEM FOR TOURISM DEVELOPMENT

The research gives the possibility to optimize the functionality of information automated system for tourism development. The research has shown that the speed of page loading and data processing of the server is an important factor in the process of optimization. As a result of the research and optimization, the statistics on the attendance of this system, as well as the effectiveness of the system have been obtained, the advantages and disadvantages have been identified. After the optimization of the system, the shortcomings are eliminated, as well as the efficiency and attendance of information system for tourism development are increased. The specific features of the creation and implementation of tourist services (a large number of participants and their significant geographical separation, extensive system of relations between the subjects of tourist market, territorial differentiation of tourist product, the distance of the place of sale of tourist services from the place of their consumption) determine the need for research and optimization of the functionality of information system for tourism development. Tourism, as an important segment of foreign trade, envisages export-import operations with services and is one of the sources of attraction of foreign currency into the country. The sub-function of payments balance means a comparison of tourist expenditures of the local population who have gone abroad (outbound tourism, import of services), with the income derived from the consumption of goods and services by foreign nationals who have arrived in the country for tourist purposes (inbound tourism). In this case, the export of tourist services is specific and is often called "invisible" exports, since the tourist product is consumed, as a rule, at the point of service.

Keywords: optimization, research, system for tourism development, statistics, database, authorization, refactoring.

УДК 621.391.63

[0000-0002-0989-7112] **А. М. Чорній¹**, к.т.н., доцент,

e-mail: chorniy134@gmail.com

[0000-0002-7225-5606] **Д. А. Журбинський²**, к.т.н., доцент,[0000-0001-5013-9869] **І. О. Євтушенко²**, магістрант¹Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

²Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ МЕРЕЖІ НА ЯКІСТЬ ПЕРЕДАВАННЯ VoIP

Поява нових технологій та протоколів передачі даних у телекомунікаційних мережах зумовлює появу нових підходів до якісного та ефективного передавання інформації. Одним із найпоширеніших типів даних, що передаються, є передача голосових повідомлень (мови). У класичних аналогових системах передача мови здійснювалася за допомогою комутації каналів, але з появою підходу, який передбачає комутації пакетів, з'явилася і нова ідеологія до передачі голосових повідомлень. Однією з найефективніших, з точки зору використання наявної смуги пропускання каналу зв'язку та адаптивних параметрів якості, є IP-телефонія, за допомогою якої можна розгортати телефонні корпоративні мережі. На сьогодні є значна кількість протоколів для побудови IP-мереж або її сегментів, але непростю задачею є вибір «правильного» протоколу під конкретні умови мережі.

У статті авторами розглядається задача визначення допустимого рівня завантаженості телекомунікаційної мережі для оптимальної роботи голосового зв'язку за технологією VoIP. Запропоновано модель телекомунікаційної мережі, в якій наявне навантаження голосового зв'язку та відеоконференції, порівняння характеристик голосового трафіку для голосових кодеків, порівняльний аналіз характеристик при різній завантаженості. Визначено оптимальний тип з'єднання мережі та критерій завантаженості.

Проведено моделювання сегмента телекомунікаційної мережі для моделювання та аналізу характеристик найпоширеніших кодеків, що використовуються в IP-мережах. Також введено показники якості голосу за MOS-фактором для усіх розглянутих сценаріїв завантаженості мережі. На основі проведених досліджень здійснено рекомендації щодо використання різних кодеків для різної завантаженості мережі з метою забезпечення заданих параметрів MOS-фактора.

Ключові слова: завантаженість мережі, якість обслуговування, технологія VoIP, кодек, джитер, MOS-фактор.

Вступ. VoIP – технологія передачі мідіа-даних у реальному часі за допомогою сімейства протоколів TCP/IP. IP-телефонія – система зв'язку, в якій аналоговий звуковий сигнал абонента дискретизується (кодується в цифрову форму), компресується й пересилається цифровими каналами зв'язку до іншого абонента, де проводиться зворотна операція – декомпресія, декодування й відтворення аналогового сигналу.

Основними особливостями IP-телефонії є зручність, відносна надійність та невисока вартість порівняно з аналоговим зв'язком. Однак IP-телефонія має можливість об'єднувати абонентів різних протоколів з абонентами аналогової телефонії чи телефонної мережі загального користування (ТМЗК).

Розвиток голосової передачі на базі протоколу IP стрімко розвивається. На сьогодні

цей зв'язок інтегрується з програмними додатками, що спрощує сферу та засоби використання IP-телефонії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для дослідження якісних характеристик голосової інформації використовується порівняння зміни характеристик ряду кодеків [1, 2, 8]. У деяких випадках порівнюється вся група взятих кодеків або виділяють кодек, що є більш стійким до змін середовища мережі передачі даних [3].

В основному для дослідження частини голосової інформації в мережу вводиться навантаження сторонніх сервісів, наприклад перегляд web-сторінок, передача даних між сервером FTP тощо, оскільки при додатковій завантаженості можна спостерігати зміну якісних характеристик кодека. Якщо через локальну

мережу здійснюється передача даних з використанням протоколів передачі голосових даних, то зміни якісних характеристик параметрів голосового зв'язку є недоцільними.

Для дослідження якісних змін голосової інформації розглядаються зміни в затримці голосової інформації, оцінка якості голосової інформації за критерієм MOS, зміна затримки джитера, обсяг переданої інформації в мережу та обсяг отриманої інформації пристроями в мережі.

Мета роботи полягає у вивченні змін якості голосової інформації та її характеристик при певному рівні завантаженості мережі. Метою статті є дослідження впливу завантаженості телекомунікаційної мережі зв'язку на якість передавання VoIP, вибір оптимального протоколу для конкретних умов передачі, таких як задані параметри якості (QoS) та швидкості передачі.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження виконується побудова телекомунікаційної мережі в програмному середовищі OPNET [4]. Мережа передає голосову інформацію та інформацію відеоконференції. Виконано побудову мережі, в якій використовуються два сервери – для обслуговування голосового зв'язку та відеоконференції, 12 робочих станцій: із них 6 – клієнти голосового зв'язку та ще 6 – клієнти відеоконференції. Ці пристрої з'єднуються за допомогою «витої пари» та комутатора. Створено окремі сценарії, де використовуються окремо голосові кодеки: G.711, G.723.1, G.726, G.728 та G.729 A. Також створено сценарій для цього ж ряду кодеків, але зі з'єднанням у мережі зі швидкостями 100 Мбіт/с та 10 Мбіт/с для дослідження поведінки зміни якості передачі даних для кожного кодека [9].

В моделі зібрано наступні параметри для порівняння характеристик голосового зв'язку:

- **Затримка голосових пакетів.** Затримка – кількість часу, що затрачає пакет при передачі з одного кінця мережі в інший. Порівняно з іншими даними, дані голосу не допускають великої затримки в мережі. Допустима затримка даних голосу повинна бути 100 мс або менше. Затримки, що перевищують значення в 150 мс, спричиняють дискомфорт у сприйнятті голосової інформації. Неможливість голосового зв'язку починається із затримкою до 500 мс. У таблиці 1 наведено шкалу оцінювання, за якою Міжнародний союз електрозв'язку (МСЕ) визначає стандарти затримки для голосової інформації [5, 7, 10].

- **Якість голосу.** Для кількісної оцінки якості VoIP було введено шкалу MOS (Mean Opinion Score) – усереднену оцінку розбірливості мови. MOS включає показник сприйнятої якості звуку за шкалою від 1 до 5. Показник MOS є суб'єктивним, тому не варто приймати рішення по VoIP системі, спираючись лише на цей показник. Необхідна оцінка інших вимірювальних параметрів [6]. У таблиці 2 наведено MOS шкалу оцінювання якості звукової інформації.

- **Джитер.** Кожний пакет голосової інформації має різницю в кількості часу при проходженні з одного кінця в інший. Ця різниця називається джитером. Для оптимального забезпечення якості зв'язку за технологією VoIP значення джитера не повинно перевищувати 20-50 мс.

- **Смуга пропускання.** Важливим фактором для тестування продуктивності кодека є необхідна смуга пропускання для передачі голосових даних.

Таблиця 1 – Рекомендовані стандарти МСЕ для затримки

Затримка в мілісекундах	Опис
0–150	Прийнятна для більшості користувацьких програм
150–400	Прийнятна за умови, що адміністратори усвідомлюють час передачі та його вплив на якість передачі користувацьких програм
Більше 400	Неприйнятна для загального планування мережі

Таблиця 2 – Оцінка якості голосового зв'язку за шкалою MOS

Оцінка користувачів	MOS
Дуже задовільно	4,3–5,0
Задовільно	4,0–4,3
Допустимо задовільно	3,6–4,0
Більшість користувачів незадоволені	3,1–3,6
Практично всі користувачі незадоволені	2,6–3,1
Робота не рекомендується	1,0–2,6

На рисунку 1 представлено модель мережі для дослідження. Для половини робочих станцій задано підтримку програми голосового зв'язку, решта підтримує програму відеоконференції. Один сервер організовує голосовий зв'язок, другий – відеоконференцію. Параметри підтримуваних програм зображено на рисунках 2 та 3.

Для кожного сценарію моделювання змінювалася схема кодування голосового сигналу для програми голосового зв'язку.

Параметри для програми відеоконференції для решти сценаріїв залишаються без змін.

Результати моделювання та аналіз результатів. У цій частині матеріалу наведено результати моделювання створених сценаріїв для дослідження та порівняння характеристик голосового зв'язку.

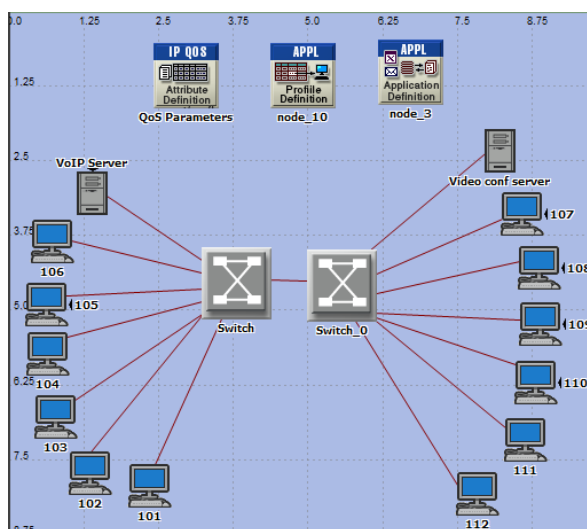


Рисунок 1 – Модель мережі зв'язку

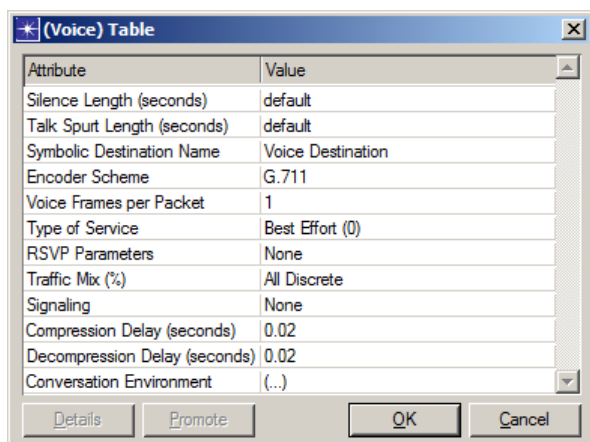


Рисунок 2 – Налаштування для програми голосового зв'язку

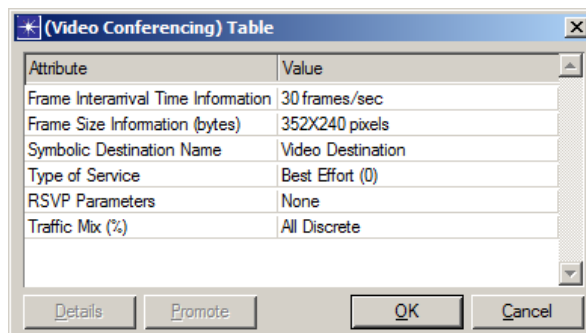


Рисунок 3 – Налаштування для програми відеоконференції

Результати для мережі 100 BaseT

1. Затримка голосових пакетів

Із графіка, зображеного на рисунку 4, видно, що максимальна затримка, що становить 100 мс, спостерігається для голосового кодека G.723.1. Найменші рівні голосових затримок, які становлять 60 мс, спостерігаються для решти кодеків. Відповідно до рекомендації МСЕ затримки голосових даних знаходяться в межах допустимих значень.

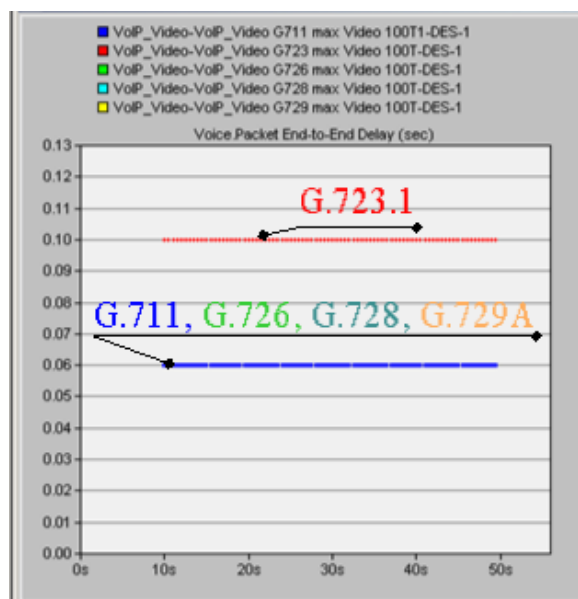


Рисунок 4 – Графік затримки голосових пакетів

2. Якість голосу

Із графіка, зображеного на рисунку 5, видно, що оцінка в 4,36 спостерігається для кодека G.711; G.726 має оцінку 3,69; для кодеків G.728 та G.729 A оцінка становить 3,08. Найнижчий показник, що становить 2,57, спостерігається у кодека G.723.1.

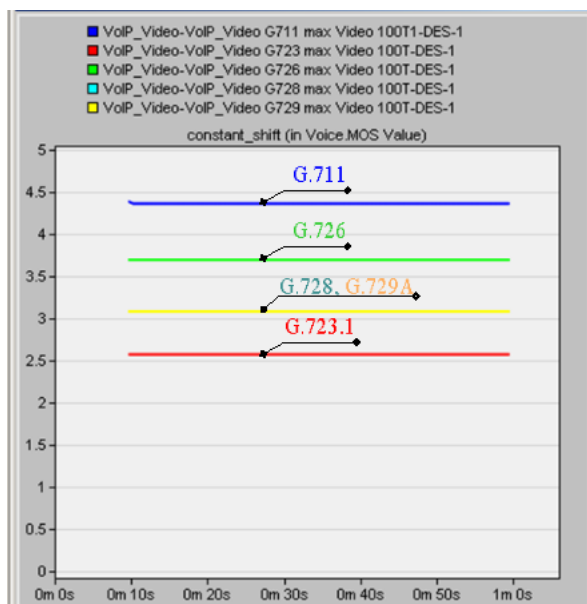


Рисунок 5 – Графік порівняння оцінки за MOS фактором

3. Джитер

Із графіка, зображеного на рисунку 6, видно, що максимальне значення джитера досягається для кодека G.723.1 та становить 0,3 мкс. Тобто значення затримок залишаються в межах норми і суттєвих розбіжностей не виявлено.

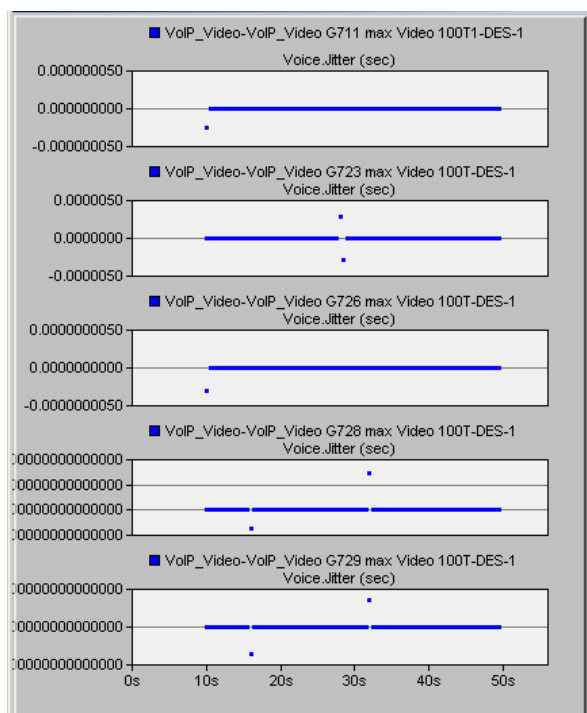


Рисунок 6 – Графіки порівняння оцінки джитерів

4. Смуга пропускання

Із зображеного на рисунку 7 графіка видно, що кодек G.711 має найбільшу смугу пропускання в 56 кБ/с. Найнижчу смугу пропускання, що становить 5,6 кБ/с, має кодек G.723.1.

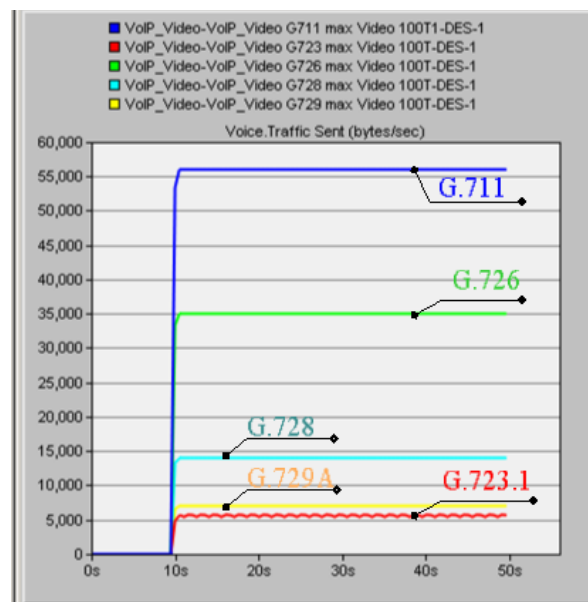


Рисунок 7 – Графік порівняння смуги пропускання голосового зв'язку

Результати для мережі 10 BaseT

1. Затримка голосових пакетів

Дані, отримані для смуги пропускання 10 Мбіт/с, показують, що затримка голосових пакетів для кодека G.711 становить 100 мс порівняно з даними при смузі пропускання в 100 Мбіт/с. Графік отриманих результатів зображено на рисунку 8.

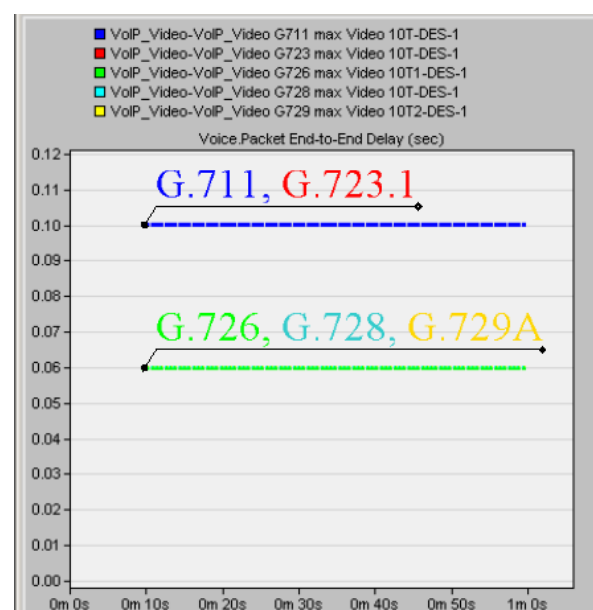


Рисунок 8 – Графік затримки голосових пакетів

2. Якість голосу

На графіку, зображеному на рисунку 9, видно, що однакова оцінка 2,57 спостерігається для кодеків G.711 та G.723.1. Найвища оцінка, що становить 3,69, спостерігається для кодеків G.726 та G.728.

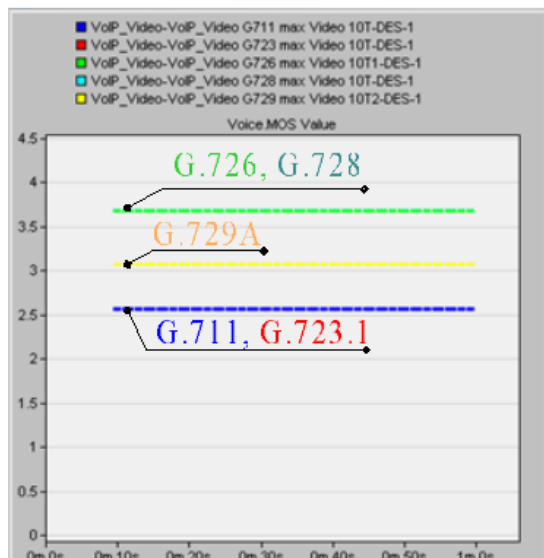


Рисунок 9 – Графік порівняння оцінки за MOS фактором

3. Джитер

З графіка, зображеного на рисунку 10, видно, що максимальне значення джитера, яке становить 1,4 мкс, досягається для кодеків G.711 та G.723.1, низький показник спостерігається у кодека G.729 A. Ці відхилення мають значний розрив з рештою кодеків, де значення джитера сягає 0,7 мкс. Тобто маємо незначні відхилення в цій смузі пропускання, але в межах допустимих значень.

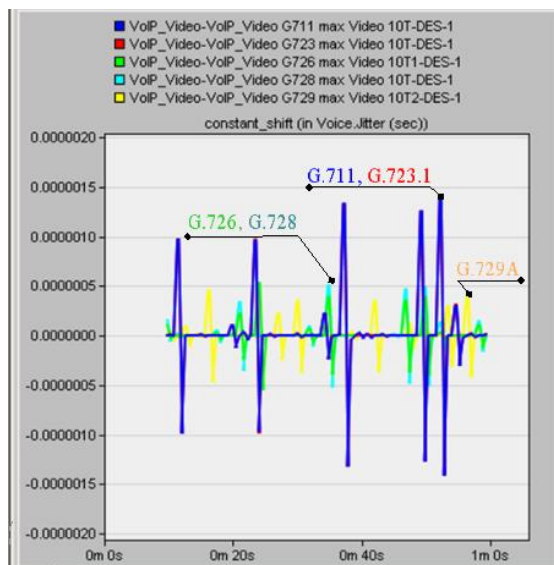


Рисунок 10 – Графік порівняння оцінки джитерів

4. Смуга пропускання

Із зображеного на рисунку 11 графіка видно, що кодек G.726 має найбільшу смугу пропускання. Найнижчу смугу пропускання мають кодеки G.711 та G.723.1.

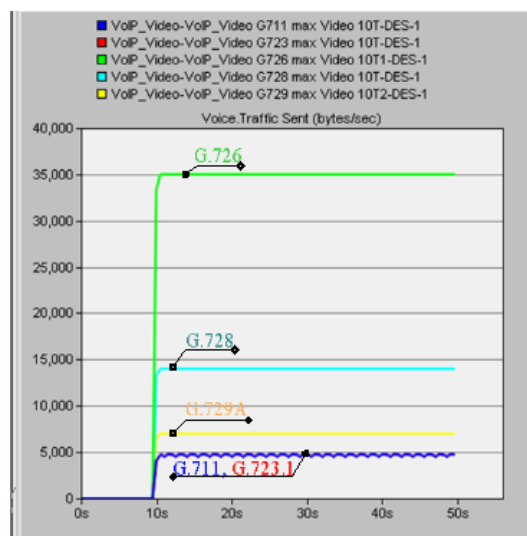


Рисунок 11 – Графік порівняння голосового трафіку

Висновки. На основі проведеного моделювання та аналізу характеристик можна зробити висновки, що кожний кодек здатен адаптуватися до завантаженості мережі. Тобто, чим вища завантаженість мережі, тим більшими будуть втрати якості голосової інформації, і чим менша завантаженість мережі, тим вища якість голосу. Використання кодека G.711 є оптимальним для мережі 100 Мбіт/с і більше, оскільки цей кодек найкраще з досліджених здатний зберегти якість переданої інформації. Використання кодеків G.726, G.728 і G.729 A виявилось найбільш доцільним з точки зору адаптації параметрів кодування до змін завантаженості мережі, оскільки в середовищі мережі з більшою інформацією вони зберігають якість голосової інформації.

Показники якості голосу за MOS-фактором для обох сценаріїв завантаженості мережі знижуються для кодека G.711 при максимальній завантаженості мережі. Показники джитера для досліджуваної групи кодеків при максимальній та мінімальній завантаженості мережі знаходяться в межах допустимих значень. Смуга пропускання для кодека G.711 знижується при максимальній завантаженості мережі. Для оптимального рівня якості звукової інформації буде доречно використовувати групу кодеків, відповідно виставивши їх за пріоритетом.

Список літератури

References

- [1] Alias Mohd, and Ong Lee Loon, "Performance of Voice over IP (VoIP) over a Wireless LAN (WLAN) for different Audio/Voice codecs", *Jurnal Teknologi*, vol. 47 (D) Dis., pp. 39-60, 2007.
- [2] Abdul-Bary Raouf Suleiman, and Abdulhameed Hameed, "Simulation of SIP-based VoIP for Mosul University Communication Network", *International Journal of Computing and Digital Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 89-94, 2013.
- [3] Bassam M. AL-Mahadeen, and Ameen Al-Msedn, "Improving the QoS of VoIP over WiMAX networks using OPNET Modeler", *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 17, no. 8, pp. 132-142, August 2017.
- [4] OPNET Modeler: MIL3, 1996. [Online]. Available: <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/opnet.html>
- [5] Recommendation ITU-T Y.1541, Network performance objectives for IP-based services. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541/en>
- [6] Recommendation ITU-T P.800.1, Mean opinion score (MOS) terminology. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.800.1/en>
- [7] Рекомендация МСЭ-Т G.114, Время односторонней передачи. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.114/en>
- [8] A. Asaduzzaman, and I. Mahgoub, ns2 – Network Simulator Version 2, Department of Computer Science and Engineering, Florida Atalantic University Mobile Computing, pp. 2-3, 2003.
- [9] The IEEE 802 LMSC Executive Committee, [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/3/OMEGA>
- [10] QoS and QoE management in UMTS cellular systems, Edited by David Soldani, Man Li and Renaud Cuny, John Wiley & Sons, Ltd. pp. 1-7, 2006.

A. M. Chorniy¹, *Ph.D., associate professor,*
e-mail: chorniy134gmail.com

D. A. Zhurbynskyi², *Ph.D., associate professor,*

I. O. Yevtushenko², *magistrant*

¹Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

²Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes
Onoprienko str., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF NETWORK LOAD ON VoIP TRANSMISSION QUALITY

The emergence of new technologies and protocols for data transmission in telecommunications networks leads to the emergence of new approaches to qualitative and efficient information transmission. The transmission of voice messages is one of the most common types of data being transmitted. In classical analogue systems, speech was transmitted by channel switching. But with the emergence of a packet switching approach, a new ideology for voice messaging has emerged. IP telephony, with which you can deploy telephone corporate networks, is among the most effective ones, in terms of utilizing the available bandwidth and adaptive quality settings. Today, there is a large number of protocols for building IP networks, or its segments, but it is not a simple task to choose the "right" protocol under specific network conditions.

The purpose of the article is to investigate the effect of telecommunication network congestion on VoIP transmission quality, to choose the optimal protocol for specific transmission conditions, such as preset quality parameters (QoS) and transmission speed.

The article discusses the problem of determining the admissible level of telecommunication network congestion for the optimal operation of VoIP communication. A model of a telecommunication network, in which there is a load of voice and videoconferencing, a comparison of characteristics of voice traffic for voice codecs, comparative analysis of characteristics at different load, is proposed. The optimum network connection type and usage criterion are determined.

The article deals with the simulation of telecommunication network segment in order to model and analyze the characteristics of the most common codecs used in IP networks. MOS voice quality metrics have been also introduced for all network congestion scenarios considered.

Based on the research, recommendations regarding the use of different codecs for different network congestion to provide the set parameters of MOS factor have been made.

Keywords: network load, quality of service, VoIP technology, codec, jitter, MOS factor.

[0000-0003-2007-9943] **І. В. Миронець**, к.т.н., доцент,
e-mail: irenmir30@gmail.com

А. В. Бобошко, магістрант
e-mail: boboshkoa@meta.ua

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ОСВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ

Досліджено актуальні аспекти застосування інформаційних систем в освітньому процесі. Розроблено й удосконалено інформаційну систему для iOS-пристроїв, яку було створено на базі закладу вищої освіти (ЗВО), що дає змогу за рахунок оперативного доступу й аналітичного опрацювання статистичних даних підвищити результативність освітнього процесу. За результатами удосконалення програмного забезпечення для обробки статистичних даних і проведення експерименту надано обґрунтування щодо доцільності впровадження таких систем в освітній процес. Доведено, що удосконалення інформаційної системи моніторингу освітнього процесу впливає на успіхи в навчанні за рахунок економії часу, а в цілому інформаційні системи в освіті дають змогу оптимізувати використання інформаційно-ресурсної бази ЗВО, підвищити комфортність навчання для здобувачів освітніх послуг і конкурентоспроможність освітнього закладу.

Ключові слова: інформаційна система, статистичні дані, освітній процес, удосконалення, дослідження, експеримент, програмне забезпечення.

Вступ. Швидкі темпи інформатизації суспільства привели до значних змін у повсякденному житті і професійній діяльності. Інформатизація освіти є ключовою умовою підготовки фахівців, здатних працювати у кардинально нових, дедалі більш автоматизованих, умовах праці. Сучасна людина в умовах інформаційного суспільства прагне досягти максимального комфорту при навчанні й трудовій діяльності, чому сприяє користування мережею Інтернет.

На рисунку 1 продемонстровано найбільш відвідувані Інтернет-джерела в Україні станом на липень 2019 р. [1].

Інформаційні ресурси стали доступнішими через те, що в сучасному суспільстві в будь-який час завжди є можливість підключитися до мережі за допомогою різноманітних мобільних додатків, які встановлені на смартфон або планшет.

На рисунку 2 продемонстровано статистику користувачів Інтернету, мобільних пристроїв та найрізноманітніших мобільних систем, які широко використовуються в різних сферах. Нині постійно створюються нові, сучасніші й досконаліші засоби з використанням сучасних технологій, що впливає на швидкість і функціональність відповідних систем.

Фахівцями розроблено безліч новинок у сфері мобільних додатків, які дають змогу

вирішувати завдання, що в результаті дає можливість швидко реагувати на поставлену задачу, економити час і досягати максимального комфортного рівня життя.

Найбільш відвідувані вебсайти в Україні

top-25, унікальні користувачі - липень 2019

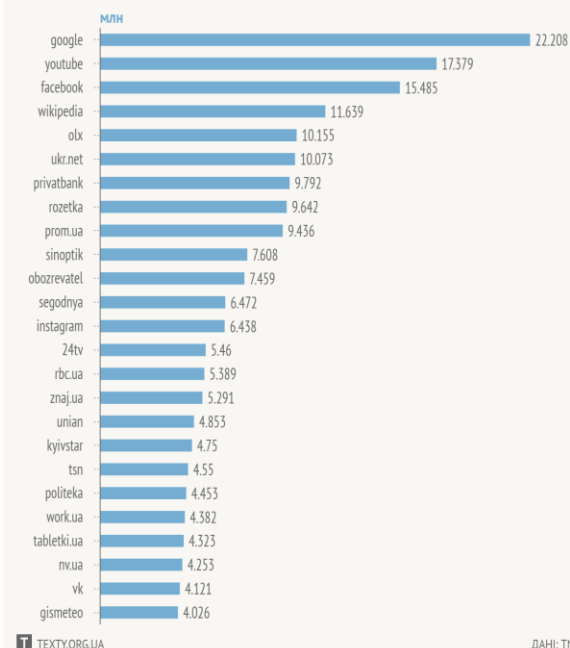


Рисунок 1 – Найбільш відвідувані веб-сайти в Україні за 2019 рік [2]

Разом з тим, збільшується кількість інформації, і її стало надзвичайно багато. Передбачається, що до 2020 р. на планеті буде 50 млрд. підключених пристроїв, з них 6,1 млрд. – смартфони. Населення Землі досягне 7,75 млрд. (тобто в 6,5 разу менше підключених пристроїв), і кожний житель буде генерувати 1,7 Мб інформації в секунду. Приблизно третина всіх даних буде зберігатися в «хмарному» сховищі [1].



Рисунок 2 – Загальна відсоткова статистика користувачів у світі за 2019 рік [3]

У 2018 р. загальний обсяг даних в Інтернеті становив близько 22 Збайт, кожен два роки це число подвоюється. Ймовірно, до 2020 р. цей показник зросте до 44 Збайт [1].

Для того, щоб розмістити всю цю інформацію на накопичувачах, потрібно буде приблизно 4,4 млрд. 10-терабайтних накопичувачів. Якби кожний терабайт у зетабайті був кілометром, то це було б еквівалентно 1300 поїздкам на Місяць і назад (76 800 км). Якби кожний гігабайт у зетабайті був метром, то він би охопив протяжність річки Амазонки (найдовшої річки в світі – 6992 км) більш ніж у 150 000 разів. Якби кожний гігабайт у зетабайті був цеглиною, можна було б побудувати 258 великих стін Китаю (з 3 873 000 000 цеглин). З цих прикладів можна зрозуміти, що інформації стало набагато більше, і її кількість не перестас збільшуватись.

Беручи до уваги рисунок 3, можна дійти висновку, що інформаційними технологіями здебільшого користуються студенти. З цього випливає, що молодь найкраще розуміє проблему пошуку інформації: адже для того щоб стати фахівцями своєї галузі, просто необхідно володіти великою кількістю інформації.

Студенти, які активно користуються сучасними гаджетами, отримують інформацію переважно за їх допомогою. Таким чином, можна стверджувати, що основною причиною оптимізації та удосконалення програмного забезпечення для цього кола користувачів є розвиток технологій для кишенькових гаджетів і збільшення кількості інформації, яку су-

часний здобувач освіти повинен освоювати в процесі свого навчання.

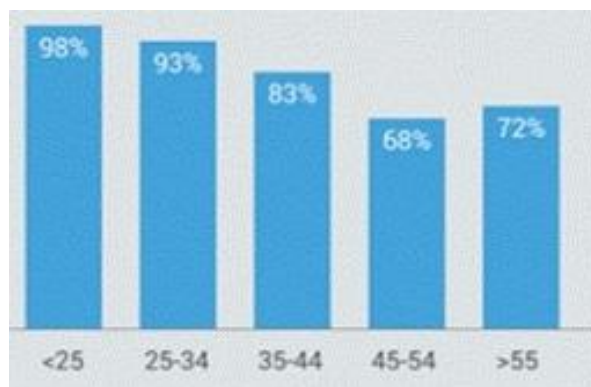


Рисунок 3 – Статистика використання мережі Інтернет за допомогою мобільних пристроїв серед різних вікових категорій за 2019 рік [4]

Провівши аналіз досліджень щодо застосування інформаційних технологій в освіті [5, 6, 7], було визначено, що це питання є досить актуальним для майбутніх спеціалістів будь-яких професій. Інформаційні системи мають значний вплив на розвиток студентів та їх становлення як майбутніх фахівців [5].

Дослідження такого впливу є дуже важливим, але в реаліях сучасності не всі заклади освіти приділяють цьому питанню достатню увагу, тому це є важливою проблемою. Однією з найважливіших складових вирішення цієї проблеми є доведення та обґрунтування того факту, що сучасні інформаційні технології необхідно інтенсивніше впроваджувати в освітній процес – як з огляду на підвищення вимог до якості освіти, так і зважаючи на необхідність моніторингу освітнього процесу в освітніх закладах [6, 7, 14], який проводиться з урахуванням вимог Закону України «Про освіту», Закону України «Про вищу освіту», стандартів і рекомендацій щодо забезпечення якості в Європейському просторі вищої освіти ESG 2015 р. та нормативних документів закладів освіти. Моніторинг стейкхолдерів щодо якості освіти і освітньої діяльності є складовою системи внутрішнього забезпечення якості освіти і освітньої діяльності у закладі вищої освіти [14]. Метою такого моніторингу є отримання об'єктивної інформації щодо очікувань та задоволення здобувачами вищої освіти, випускниками, роботодавцями та іншими зацікавленими особами якістю освіти і станом освітнього процесу, забезпечення зворотного зв'язку між усіма учасниками освітнього процесу, розробка пропозицій щодо його удосконалення.

Метою дослідження є вдосконалення наявної інформаційної системи моніторингу освітнього процесу для iOS-пристроїв, що дозволить підвищити ефективність її використання в закладах вищої освіти.

Для досягнення мети було сформульовано та вирішено наступні **завдання**:

1) на основі дослідження проблеми інформатизації в закладах освіти зробити обґрунтування необхідності удосконалення інформаційної системи моніторингу освітнього процесу;

2) розглянути загальні методики та методи досліджень щодо отримання інформації;

3) оцінити ефективність роботи вдосконаленої інформаційної системи та проаналізувати отримані результати.

Опис об'єкта та методу дослідження. Об'єктом дослідження у статті є інформаційна система моніторингу освітнього процесу у вигляді мобільного додатка. Розроблялася ця інформаційна система для закладу вищої освіти з метою покращення ефективності і якості освітнього процесу (рисунок 4).

В будь-якому закладі вищої освіти (ЗВО) використовується велика кількість інформації, яка розрахована на студентів і викладачів, але користуватися цією інформацією незручно, тому що вона знаходиться на різних джерелах або ж отримати її може студент особисто на кафедрі чи в деканаті (наприклад, щодо власних результатів навчання, перспектив і наукових досліджень або проблем, що виникають).

Спираючись на зазначене вище та враховуючи проблеми інформатизації в закладах освіти, виникла ідея створення модернізованого мобільного додатка для допомоги студентам – з огляду на необхідність впровадження і вдосконалення подібних систем у закладах вищої освіти (рисунок 5). З одного боку, заклад освіти отримає інструментарій для оперативного і повного інформування здобувачів освітніх послуг та для моніторингу освітнього процесу. З другого боку, студентам не потрібно буде витрачати час на пошук інформації стосовно освітнього процесу в навчальному закладі, а можна буде спрямувати цей час на отримання знань. Студентство – це майбутнє кожної держави, отже, важливо надати їм якомога більше простору для розвитку в межах закладу освіти, підвищуючи тим самим його конкурентоспроможність.

За основу було взято наступні методи дослідження:

1. *Опитування* як один із найпоширеніших методів для отримання інформації. Цей метод важливий у дослідженні, оскільки це один із найпоширеніших методів для отримання інформації. До опитування вдаються, коли єдиним джерелом інформації є людина – безпосередній учасник, представник, носій досліджуваних явищ чи процесу.

За допомогою опитування можна одержати інформацію, не завжди відображену в документальних джерелах чи доступну прямому спостереженню [8]. Види опитувань: письмове – анкетування; усне – інтерв'ю, бесіда.

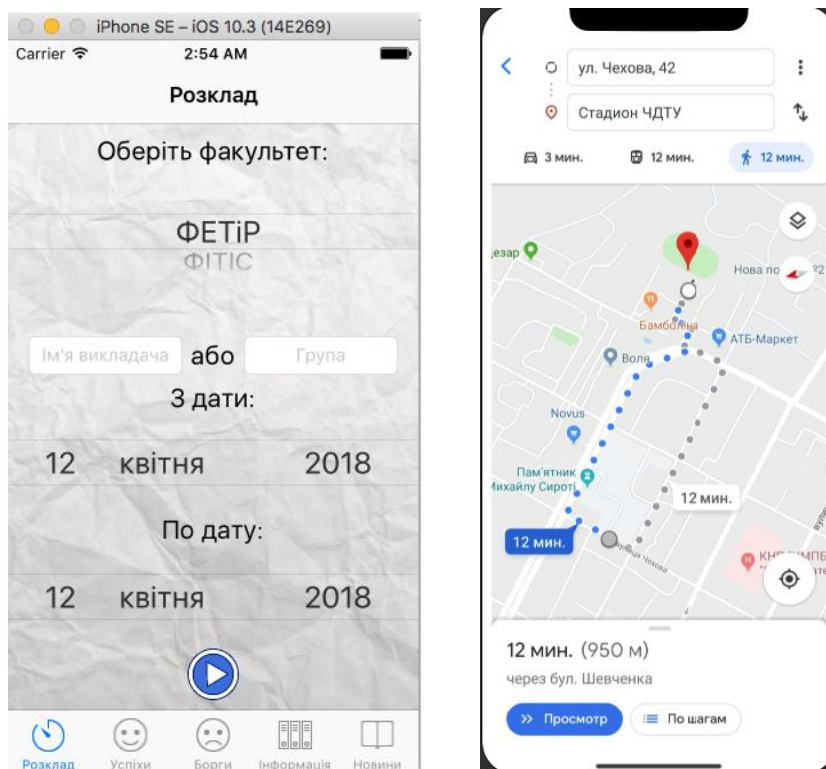
З метою підвищення якості освіти й освітньої діяльності та врахування результатів опитування в управлінській діяльності основними видами опитування, що застосовуються в університеті, є анкетування та інтерв'ю. Анкетування – метод опитування, при якому респондент самостійно заповнює анкету. Передбачається можливість проведення групового або індивідуального анкетування. Анкета, за винятком випадків, коли є потреба з'ясувати особисту думку конкретного респондента, є анонімною. Анкети заповнюються респондентами самостійно. У випадку, коли анкетування потребує зазначення даних про респондента (прізвища, імені, курсу і номеру академічної групи тощо) обов'язковою є умова його особистої згоди [14].

2. *Спостереження* як метод наукового дослідження полягає в активному (систематичному, цілеспрямованому, планомірному) та навмисному сприйнятті об'єкта, в ході якого здобуваються знання про зовнішні сторони, властивості й відносини досліджуваного об'єкта з метою майбутнього використання для практичної діяльності. Спостереження включає такі елементи: спостерігача, об'єкт спостереження та засоби спостереження [9].

3. *Експеримент* – один із основних методів наукового дослідження, в якому вивчення явищ відбувається в доцільно вибраних або штучно створених умовах, які забезпечують появу тих процесів, спостереження яких необхідне для встановлення закономірних зв'язків між явищами [10]. Експеримент проведеного дослідження полягав у тому, щоб надати тестовій групі доступ до відкоригованої версії системи та провести аналіз впливу використання системи на успішність користувачів у навчанні, а саме: без використання та з використанням вже розробленої, удосконаленої системи за допомогою попередніх методів дослідження.



Рисунок 4 – Інформаційна система для закладу вищої освіти. Стартове вікно



- а) вікно для пошуку розкладу;
б) вікно для пошуку маршруту

Рисунок 5 – Інформаційна система після вдосконалення

Опис результатів. Опис того, як саме проводилися зазначені дослідження, та інтерпретацію одержаних результатів наведено нижче в тому порядку, в якому вони були здобуті при проведенні дослідження.

1. *Опитування* проводилося у вигляді анонімного анкетування, в якому з 50 осіб, що проходили опитування, 43 – обрали варіант за впровадження подібних систем в освітній процес, 7 – обрали варіант, який пропонував залишити все так, як є на сьогоднішній день. 43 особи, які обрали варіант впровадження подібних систем, запропонували внести в наданий їм тестовий зразок такі доповнення та коригування:

- додати підтримку операційної системи Android;
- додати більше безпеки для захисту інформації користувача;
- додати можливість прокласти маршрут до обраної аудиторії або іншого місця призначення, пов'язаного з освітнім процесом;
- додати сповіщення (попередження про зміни в розкладі);
- off-line режим;
- змінити користувацький інтерфейс для зручності.

Перед впровадженням цих змін в існуючу систему було проведено дослідження, чи дійсно нові функції збігаються з потребами користувачів, чи варто було б додати інші функції. Приділялося багато часу питанню, наскільки просто та інтуїтивно зрозуміло користуватися цією системою. Варто зазначити, що багато уваги було приділено зовнішньому вигляду системи. Адже, якщо порівнювати дві системи з однаковими функціями, але в одній більше приділено уваги зовнішньому вигляду, а в другій – зовсім мало, то користувач буде

продуктивнішим у тій системі, яка «приємно» виглядає [11].

Продуктивність досягається навіть за рахунок правильно підібраних кольорів, які не будуть втомлювати та відволікати користувача від продуктивного сеансу в системі.

2. *Спостереження.* Додавши запропоновані удосконалення, нову версію системи було запропоновано до користування, через деякий час було переглянуто аналітику та крашалітику відредагованої системи.

Під час аналізу відповідних даних було знайдено кілька некритичних помилок, які швидко були усунуті. Розпочалася фаза підготовки системи до майбутнього експерименту, під час якої було обрано кандидатів для так званого «АБ тестування».

3. *Експеримент.* «АБ тестування» – метод дослідження, суть якого полягає в тому, що контрольна група порівнює один або декілька показників, для того щоб з'ясувати, які зі змін покращують цільовий показник, та як саме покращують [12, 13].

Підготувавши все для тестування та заповнивши систему тестовими даними, її було передано тестовій групі. Мета експерименту полягала в тому, що одна група буде робити все, як зазвичай, для пошуку інформації стосовно освітнього процесу, а другій групі наданий тестовий примірник системи, який дасть змогу зменшити витрачений час на пошук тієї ж інформації.

Результат зібраних даних наведено нижче, де у вигляді таблиці висвітлено, наскільки змінюється витрачений час на виконання монотонних дій щодня при звичному для всіх освітньому процесі і після впровадження сучасних інформаційних систем та пристроїв у цей процес (таблиця 1).

Таблиця 1 – Результати «АБ тестування»

<i>Вид діяльності</i>	<i>Витрачений час на виконання операції групою А (без використання системи)</i>	<i>Витрачений час на виконання операції групою Б (з використанням системи)</i>
Пошук інформації стосовно успішності в навчанні	30 хв., за умови близького розташування з університетом	5 хв.
Пошук розкладу	10 хв.	2 хв.
З'ясування змін у розкладі	15 хв.	1 хв., за умови миттєвого реагування на сповіщення
Створення маршруту до місця призначення	15 хв.	2 хв.
<i>Всього:</i>	<i>~ 1 год. 10 хв.</i>	<i>~ 10 хв.</i>

Висновки. Інформаційні системи широко використовуються в освіті і мають значний вплив на розвиток студентів і становлення їх як фахівців. Дослідження такого впливу є дуже важливим і необхідним з огляду на підвищення якості освіти, управління успішністю та постійний моніторинг освітнього процесу, а також реалізацію принципу зворотного зв'язку здобувачів освітніх послуг і закладу освіти та ін. Але в реаліях сучасності не всі навчальні заклади приділяють цьому питанню достатню увагу. Проведене дослідження мало за мету вдосконалення наявної системи моніторингу освітнього процесу для iOS-пристроїв, яку було створено на базі закладу вищої освіти. Об'єктом дослідження стала інформаційна система моніторингу освітнього процесу у вигляді мобільного додатка.

Було використано такі методи дослідження: опитування, спостереження і експеримент. Було використано письмове (анкетування) та усне (інтерв'ю) опитування. Після отримання результатів опитування було запропоновано внести певні корективи щодо покращення системи. Однак перед впровадженням цих змін в існуючу систему було проведено дослідження, чи дійсно нові функції збігаються з потребами користувачів, чи варто було б додати інші функції.

Метод спостереження надав інформацію, необхідну для остаточного коригування системи (перевірка системи на наявність помилок та коректність її роботи) та налаштування перед експериментом. Додавши запропоновані удосконалення, нову версію системи було запропоновано до користування, через деякий час було переглянуто аналітику та крашалітику цієї системи.

Метод експерименту полягав у тому, щоб надати тестовій групі доступ до відкоригованої версії системи та провести аналіз впливу використання системи на успішність користувачів у навчанні, а саме: без використання та з використанням вже розробленої, удосконаленої системи за допомогою попередніх методів дослідження. Як результат – маємо порівняльну таблицю з висновками щодо досліджуваної системи.

Проведення дослідження можна вважати успішним, тому що різниця у витраченому часі на виконання рутинних і звичних користувачеві речей в середньому змінилася з 1 години 10 хвилин на 10 хвилин (7 % від того часу, який витрачався раніше).

Спираючись на результати дослідження, можна констатувати, що впровадження інформаційних систем подібного типу в освітній процес є доцільним для ЗВО та інших освітніх закладів (з певними індивідуальними коригуваннями в самій системі).

Впровадження значно покращить навчальний процес для користувачів, вирішуючи одну з актуальних проблем інформатизації, заощаджуючи час для саморозвитку, самопідготовки і, власне, самого освітнього процесу, що має позитивно вплинути на успішність у навчанні, а також на участь у науковій та виховній складових. Впровадження піде на користь не лише студентам, а й самому ЗВО, адже і в абітурієнтів, і у студентів зросте рівень комфорту і довіри, а також розуміння того, що в закладі освіти піклуються про них. За рахунок цього має суттєво зрости і рейтинг самого ЗВО.

У процесі вирішення поставлених завдань у роботі одержано наступні результати:

1) на основі дослідження проблеми інформатизації в закладах освіти обґрунтовано необхідність удосконалення розробленої інформаційної системи моніторингу освітнього процесу;

2) розглянуто загальні методики, методи досліджень і обґрунтовано їх вибір та використання;

3) реалізовано оптимізацію мобільного додатка, проведено експеримент, виконано оцінку ефективності роботи системи та проаналізовано отримані результати.

Отже, запропоноване вдосконалення інформаційної системи моніторингу освітнього процесу дасть змогу, окрім економії часу, досягти максимального інформаційного комфорту для студентів у сучасних умовах та поліпшити конкурентоспроможність закладу освіти.

Список літератури

- [1] Т. М. Корпанюк, та Я. І. Мулик, "Застосування мобільних", *Ефективна економіка*: електрон. фахове вид., № 1 (3), 2018.
- [2] Режим доступу: http://texty.org.ua/pg/news/textynewseditor/read/95692/google_youtube_facebook_ale_j_novynni?a_offset
- [3] Режим доступу: <https://wearesocial.com/blog/2018/01/global-digital-report-2018>

- [4] Режим доступу: <https://tehnot.com/ua/google-vuyasnil-skolko-ukraintsev-polzuetsya-smartfonami/>
- [5] І. Ю. Хомишин, "Сучасні інформаційні технології в освіті", *IT право: Проблеми і перспективи розвитку в Україні*, APhD, 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://aphd.ua/publication-157/>
- [6] О. В. Андрощук, Ю. В. Кондратенко, О. В. Головченко, Т. О. Ворона, та М. В. Петрушен, "Інформаційні технології та їх вплив на розвиток суспільства", *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського*, № 1 (50), 2014.
- [7] О. Л. Перевозчикова, *Информационные системы и структуры данных: учеб. пособие для студентов вузов / Нац. ун-т "Киево-Могилянская академия"*. Москва, Россия: КМ Академия, 2007.
- [8] В. І. Зацерковний, І. В. Тишаєв, та В. К. Демидов, *Методологія наукових досліджень*: навч. посіб. Ніжин, Україна, 2012.
- [9] О. О. Железняк, та І. В. Корнієнко, *Наука та наукові дослідження*: навч. посіб. Ніжин, Україна, 2007.
- [10] О. В. Колесніков, *Основи наукових досліджень*: навч. посіб., 2-ге вид., випр. та доп. Київ, Україна, 2011.
- [11] Jaime Levy, *UX strategy: how to device innovative digital products that people want*. O'Reilly Media, 2015.
- [12] Charles Wheelan, *Naked statistics*. WW Norton & Company, 2014.
- [13] Е. В. Чекотовський, *Статистичні методи*: навч. посіб. Київ, Україна: Знання, 2016.
- [14] Положення про моніторинг стейкхолдерів щодо якості освіти і освітньої діяльності Черкаського державного технологічного університету. Черкаси, 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://chdtu.edu.ua>
- [2] Режим доступу: http://texty.org.ua/pg/news/textynewseditor/read/95692/google_youtube_facebook_ale_j_novynni?a_offset
- [3] Режим доступу: <https://wearesocial.com/blog/2018/01/global-digital-report-2018>
- [4] Режим доступу: <https://tehnot.com/ua/google-vuyasnil-skolko-ukraintsev-polzuetsya-smartfonami/>
- [5] I. Yu. Khomyshyn, "Modern information technologies in education", *IT pravo: Problemy i perspektyvy rozvytku v Ukraini*, APhD, 2019. [Online] Available: <http://aphd.ua/publication-157/>
- [6] O. V. Androschuk, Yu. V. Kondratenko, O. V. Golovchenko, T. O. Vorona, and M. V. Petrushen, "Information technologies and their influence on society development", *Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy imeni Ivana Cherniakhovskoho*, no. 1 (50), 2014 [in Ukrainian].
- [7] O. L. Perevozchikova, *Information systems and data structures: textbook for university students*; National University "Kyiv-Mohyla Academy". Moscow, Russia: KM Akademy, 2007 [in Russian].
- [8] V. I. Zatserkovny, I. V. Tishaev, and V. K. Demidov, *Methodology of scientific research: textbook*. Nizhyn, Ukraine, 2012 [in Ukrainian].
- [9] O. O. Zheleznyak, and I. V. Kornienko, *Science and scientific research: textbook*. Nizhin, Ukraine, 2007 [in Ukrainian].
- [10] O. V. Kolesnikov, *Fundamentals of scientific research: textbook, the 2nd ed., cor. and suppl.*, Kyiv, Ukraine, 2011 [in Ukrainian].
- [11] Jaime Levy, *UX strategy: how to device innovative digital products that people want*. O'Reilly Media, 2015.
- [12] Charles Wheelan, *Naked statistics*. WW Norton & Company, 2014.
- [13] E. V. Chekotovsky, *Statistical methods: textbook*. Kyiv, Ukraine: Znannya, 2016 [in Ukrainian].
- [14] Regulations on stakeholder monitoring of the quality of education and educational activities of Cherkasy State Technological University. Cherkasy, 2019. [Online] Available: <http://chdtu.edu.ua>

References

- [1] Т. М. Корпаниук, and Ya. I. Mulik, "Mobile application", *Efektivna ekonomika: electron. prof. ed.*, no. 1 (3), 2018 [in Ukrainian].
- [14] Regulations on stakeholder monitoring of the quality of education and educational activities of Cherkasy State Technological University. Cherkasy, 2019. [Online] Available: <http://chdtu.edu.ua>

I. V. Myronets, *Ph. D., associate professor,*
e-mail: irenmir30@gmail.com

A. V. Boboshko, *master,*
e-mail: boboshkoa@meta.ua

Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

IMPROVEMENT OF THE INFORMATION SYSTEM FOR EDUCATIONAL PROCESS MONITORING

The article investigates the essence of information systems and the results of their use in educational process. The rapid pace of society informatization has led to significant changes in daily life and professional activities. Informatization of education is a key prerequisite for training professionals able to work in radically new, increasingly automated, working conditions. The purpose of the study is to improve the existing information system for educational process monitoring for iOS devices which will increase its efficiency in higher education institutions. The article describes the object and methods of the study, considers their features and the process of the experiment. Conducting the survey can be considered successful because the difference in the time spent on performing of such simple and familiar things to the user on average has changed from 1 hour 10 minutes to 10 minutes (7 % of the time previously spent).

Based on the results of the study, it can be stated that the implementation of information systems of this type in educational process is appropriate for higher educational institutions and other educational institutions (with certain individual adjustments in the system itself). The implementation will significantly improve the learning process for users by addressing one of the pressing problems of informatization, saving time for self-development, or better training for the educational process itself, which should have a positive impact on the success in learning. The implementation will benefit not only students but also the institution of higher education itself, because both students and university entrants will increase the level of trust and understanding, that they are cared for. Due to this, the rating of higher educational institution has to increase significantly. In the process of solving the set tasks in the work the following results have been obtained: 1) the feasibility of improving the developed information system is substantiated on the basis of research; 2) general and research methods are considered and their selection and use are substantiated; 3) optimization of the mobile application is carried out, the experiment is conducted and the obtained results are analyzed.

Keywords: *information system, statistical data, educational process, improvement, research, experiment, software.*

УДК 628.1; 620.197

[0000-0002-8775-2744]

И. М. Астрелин, д.т.н., профессор,

[0000-0002-2997-1295]

Ю. С. Герасименко, д.т.н., профессор,

[0000-0003-2-401-192X]

Н. А. Белоусова, к.т.н.,

[0000-0002-9795-7110]

И. В. Косогина, к.т.н., доцент

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

пр-т Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРРОЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ ВОДЫ

Предложено определять относительную коррозионную активность (коррозивность) водной среды как скорость коррозии металла на начальном этапе его контакта со средой в условиях отсутствия потока и при постоянной температуре 25 °С. Особенность методики заключалась в том, что измеряли мгновенные значения поляризационного сопротивления на свежезачищенной поверхности металла и получали значения скорости коррозии, используя коэффициент пересчета 104 Ом·мм/год. Установлено, что минерализация воды существенно влияет на ее коррозионную активность и стабильность. В зависимости от содержания анионов в воде и их конкурирующей адсорбции, которая приводит к десорбции диполей воды на поверхности металла и устранению кислородного барьера, скорость восстановления кислорода может увеличиваться, и, соответственно, увеличивается скорость коррозии металла. Зависимость коррозивности слабоминерализованной воды от концентрации растворенного кислорода является линейной и экстраполируется на нуль.

Ключевые слова: коррозионная активность, скорость коррозии, поляризационное сопротивление, минерализация воды, стабильность воды, сточная вода.

У статті з'ясовано кількісні характеристики корозійної активності води різної мінералізації й генезису відносно сталі з малим вмістом вуглецю. Запропоновано визначати відносну корозійну активність (корозивність) водного середовища як швидкість корозії металу на початковому етапі його контакту з середовищем в умовах відсутності потоку і при постійній температурі 25°C. Особливість методики полягала в тому, що вимірювали миттєві значення поляризаційного опору на свіжозачищеній поверхні металу і отримували значення швидкості корозії, використовуючи коефіцієнт перерахунку 104 Ом·мм/рік. Встановлено, що мінералізація води суттєво впливає на її корозійну активність і стабільність. Залежно від вмісту аніонів у воді і їх конкуруючої адсорбції, яка приводить до десорбції диполів води на поверхні металу і усунення кисневого бар'єру, швидкість відновлення кисню може збільшуватися, і, відповідно, збільшується швидкість корозії металу. Залежність корозивності слабомінералізованої води від концентрації розчиненого кисню є лінійною і екстраполюється на нуль. Отримано кількісні характеристики корозійної активності води різного походження відносно сталі 20, а також розчинів середніх солей з активуючими і пасивуючими властивостями. Досліджено воду з криниць, артезіанську воду, мінеральні бутильовані негазовані води, піддано аналізу води технологічних систем: водопровідну воду (дніпровського і деснянського водозаборів) і стічну воду Бортницької станції аерації, а також модельну морську воду. Корозивність води знаходиться в діапазоні від 0,281 мм/рік (трускавецька вода) до 0,141 мм/рік (моришинська вода). Корозивність слабомінералізованої аерованої води – 0,145 мм/рік; корозивність стічної води в процесі біохімічного очищення найбільша – до 0,4 мм/рік. По мірі відстоювання стічної води її корозивність зменшилась удвічі.

Ключові слова: корозійна активність, швидкість корозії, поляризаційний опір, мінералізація води, стабільність води, стічна вода.

Введение. Многообразие использования природной воды как в быту, так и в промышленности определяется ее свойствами и качеством. Одним из таких свойств является коррозионная активность воды как составляющая стабильности воды, зависящей от равновесия в воде между солями жесткости и углекислотой. Самопроизвольные процессы восстановления равновесия, которые сопровождаются либо выделением в осадок твердой фазы, либо ее растворением, приводят к изме-

нению коррозионной активности. Наличие в воде окисляемых органических и неорганических веществ (окисляемость) также влияет на ее коррозионную активность. Согласно международному стандарту терминов ISO 8044:2015 коррозионная активность (коррозивность) – это способность среды вызывать коррозию в определенной коррозионной системе [1]. Для водных систем определение коррозивности по ASTM D2688 (Standard Test Method for Corrosivity of Water in the Absence

of Heat Transfer (Weight Loss Method – Стандартный метод испытаний на коррозионную активность воды при отсутствии теплопередачи (метод весовых потерь)) следует рассматривать как неотделимое свойство для воды и материалов, с которыми она контактирует. Поэтому коррозионную активность воды или коррозионную стойкость материала следует определять в относительных, а не абсолютных условиях. Относительная коррозионная активность может быть установлена сравнением скорости коррозии определенного металла в водах разного состава. С другой стороны, вода одного и того же состава будет иметь неодинаковую коррозионную активность по отношению к различным металлам [2-5].

Поскольку коррозивность является относительной величиной, то количественно ее можно характеризовать как скорость коррозии металла на начальном этапе его контакта со средой в условиях отсутствия потока и при постоянной температуре. Оперативно измерить величину коррозивности можно с помощью электрохимического метода поляризационного сопротивления (R_p) и приборов-индикаторов скорости коррозии [4-6]. Измерения методом R_p позволяют получать мгновенные значения скорости коррозии в реальном времени. Согласно стандарту ДСТУ 3895-99 [7] этот метод предлагается для оценки эффективности ингибиторов для водных сред, которая определяется сравнением данных скорости коррозии в воде в присутствии ингибитора и без него по поляризационному сопротивлению.

Цель работы – определить количественные характеристики коррозионной активности воды различной минерализации и генезиса по отношению к малоуглеродистой стали, а также оценить влияние на коррозивность растворенного кислорода и анионов, проявляющих активирующие и пассивирующие свойства.

Методика эксперимента:

Материалы:

- вода подземных источников: колодезная (до 20 м), вода артезианской скважины (до 50 м), минеральная негазированная бутилированная вода «Бонаква», «Бювет-вита», «Миргородская», «Моршинская», «Тростянецкая»;

- модельная морская вода (NaCl – 27,01 г, MgCl₂ – 3,78 г, MgSO₄ – 1,69 г, CaSO₄ – 1,25 г, K₂SO₄ – 0,87 г, CaCO₃ – 0,1 г) [8];

- вода технологических систем: водопроводная вода (днепровская и деснянская) и

сточная вода 1 и 2-й ступени очистки Бортнической станции аэрации (БСА).

Анализы водопроводной и сточной воды проведены в специализированной лаборатории. В отдельных случаях содержание определяли с помощью портативного солемера “TDS meter”.

Для получения данных о коррозивности воды с помощью индикатора поляризационного сопротивления P5126 в прибор необходимо ввести значение коэффициента пересчета K поляризационного сопротивления на скорость коррозии. Сущность метода R_p заключается в пропускании через металлические электроды, находящиеся в электропроводной среде, внешнего поляризующего тока ΔI , измерении поляризации ΔE и определении поляризационного сопротивления R_p по формуле

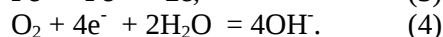
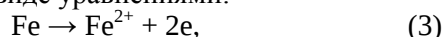
$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}, \text{ Ом} \quad (1)$$

где $\Delta E = E_i - E_{cor}$, E_i – потенциал электрода под током, E_{cor} – потенциал свободной коррозии. При этом величина R_p обратно пропорциональна скорости коррозии металла:

$$I_{cor} = \frac{K}{R_p} \quad (2)$$

где K – эмпирический коэффициент пересчета в Ом·мм/год, I_{cor} – скорость коррозии в мм/год.

Из теории метода поляризационного сопротивления известно [6], что величина коэффициента K , в свою очередь, зависит от механизма частных коррозионных анодной (3) и катодной (4) реакций, представленных в упрощенном виде уравнениями:



Если механизм коррозии не меняется под воздействием коррозионной среды, то значение коэффициента K , которое вводится в прибор для автоматического пересчета R_p на скорость коррозии, можно считать постоянным и получить следующим образом. В отдельном опыте на четырех парах электродов из малоуглеродистой стали 20 в водопроводной воде при температуре 25 °С периодически измеряли мгновенные значения R_p и были получены средние значения за 100 часов эксперимента. Массометрическим методом по коррозионной потере массы в том же опыте найдена средняя скорость коррозии каждой пары электродов за все время эксперимента. Произведение ее на среднее значение R_p дает коэффициент пересчета K в Ом·мм/год (таблица 1).

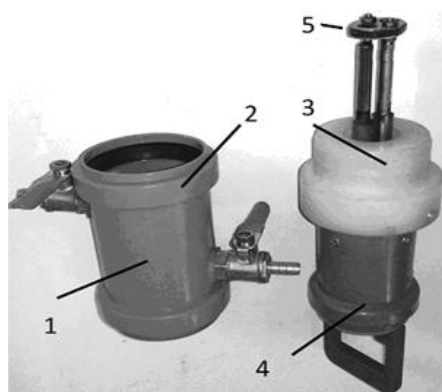
Таблица 1 – Исходные данные для установления значения коэффициента пересчета поляризационного сопротивления на скорость коррозии

№ пары электродов	Среднее значение поляризационного сопротивления, Ом	Средняя скорость коррозии по массометрии, мм/год	Коэффициент пересчета K , Ом·мм/год
1	645	0,162	105
2	714	0,154	110
3	857	0,114	97
4	839	0,126	105
Среднее значение коэффициента K			104

Как видно из результатов, значения коэффициента K очень близки, поэтому их можно усреднить.

Ячейка для измерения коррозивности оснащена датчиком ДК-1 с двумя металлическими электродами, входным и выходным шаровыми кранами и имеет подвижную резиновую диафрагму в нижней части, что позволяет избегать «подсоса» воздуха после закрытия кранов и изменения температуры ячейки при термостатировании. Тесты проводили с помощью трех ячеек одновременно с одной и той же водной средой.

Методика определения коррозивности была следующей. Электроды датчиков ДК-1 (сталь 20 с размерами: диаметр электрода – 6 мм, длина – 31 мм) перед опытом зачищали до блеска наждачной бумагой Р800 с помощью вращательного устройства. Емкость с исследуемой водной средой объемом 0,5 дм³ термостатировали при 25 °С и аэрировали продувкой воздуха с помощью компрессора в течение 15 минут для того, чтобы различные воды привести к одинаковым условиям по содержанию кислорода. После чего воду разливали в три отдельные ячейки (рисунок 1).



1 – корпус ячейки, 2 – кольцо уплотнения, 3 – герметичная пробка, 4 – устройство механической прочистки, 5 – резиновое кольцо для прочистки электродов

Рисунок 1 – Электрохимическая ячейка

Датчики ДК-1 вставляли в ячейку и подсоединяли к соответствующим контактам индикатора Р5126. Переключая каналы, последовательно измеряли мгновенные значения R_p электродов в каждой ячейке несколько раз и усредняли их. Прочистными устройствами очищали все электроды трижды и повторяли измерения. Усредненное значение R_p для исследуемой водной среды пересчитывали в коррозивность согласно формуле (2). Необходимость прочисток поверхности электродов резиновым слабоабразивным материалом непосредственно перед измерением коррозивности связана с удалением продуктов коррозии, которые образуются на поверхности после контакта с водной средой и меняют ее исходное состояние, блокируя доступ кислорода.

Результаты и обсуждение. Влияние окислителя на коррозионную активность воды. Известно, что скорость коррозии зависит от нескольких факторов: состава среды, наличия и количества деполяризатора (в воде это растворенный кислород, концентрация которого в открытых системах составляет в среднем 8-12 мг/дм³), температуры, наличия потока или перемешивания. Важно также состояние поверхности корродирующего металла. Например, чистая начальная поверхность стали покрывается продуктами коррозии – малорастворимыми гидроксидами железа, и поэтому скорость коррозии с течением времени снижается. С помощью разработанной ячейки установлена зависимость коррозивности водопроводной воды (солеосодержание – 257 мг/дм³) от концентрации кислорода при температуре 25 °С без потока (рисунок 2). Зависимость является линейной, проходит через ноль координат и закономерно возрастает с ростом концентрации деполяризатора.

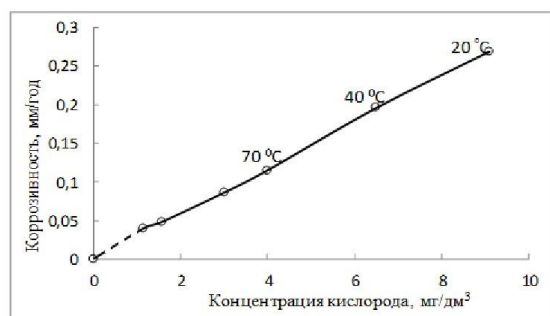


Рисунок 2 – Влияние концентрации кислорода на коррозивность воды

Точки в діапазоні концентрації кисню від 4,0 до 9,1 мг/дм³ отримані шляхом вимірювання корозивності води, попередньо збалансованої в рівновазі з повітрям при температурах 70, 40 і 20 °C. Концентрація кисню в цих точках відповідає справочним даним [9] з урахуванням коефіцієнта абсорбції Бунзена – по об'єму газу, поглиненого одиницею об'єму рідини при нормальних умовах. Такий підхід обраний в зв'язі з тим, що з підвищенням температури концентрація кисню в розчині закономірно зменшується.

Точки корозивності води при концентрації кисню нижче 4,0 мг/дм³ отримані вимірюванням в сумісях деаерованої води (з районної міської котельної з концентрацією кисню 0,05 мг/дм³), в яку вводили визначений об'єм аерованої води, розрахований по необхідному кількості кисню.

Корозійна активність водних серед різного мінерального складу. З допомогою розробленої методики були визначені значення корозивності води технологічних систем, а саме водопровідної води, води з колодця і артезіанської скважини, моделі морської води і відомих питтєвих вод (негазованих).

Отримані значення корозивності при 25 °C наведені в таблиці 2. Як видно з таблиці, більшість вод за показником рН можна віднести до нейтральних. Стабільність води, виражена через корозивність, змінюється за показниками майже вдвічі, причому вміст солей знаходиться в межах 200-400 мг/дм³, за винятком моделі морської, жорсткої і сточної води.

Таблиця 2 – Коррозивность водных сред по отношению к малоуглеродистой стали 20

Водная среда	рН	Солесодержание, мг/дм ³	Хлориды, мг/дм ³	Сульфаты, мг/дм ³	Коррозивность, мм/год
Деснянская водопроводная	7,1	266	22,8	34,6	0,167
Днепровская водопроводная	7,0	199	16-18	≤20	0,145
Морская вода (модельная)	9,2	31000	19200	2660	0,233
Жесткая вода (колодец)	8,2	1020	129,6	96,0	0,224
Оболонская (артезиан. скважина)	7,5	279			0,220
«Бонаква»	7,2	425			0,219
«Бювет-вигал»	7,3	373	> 50	>100	0,243
«Миргородская»	7,2	312	>50	> 50	0,190
«Моршинская»	6,9	100	> 60	> 100	0,141
«Прозора»	7,1	202			0,201
«Трускавецька»	7,1	392	7,6	53,8	0,281
Сточная вода БСА 1-й ст. очистки*	7,07	549	~ 120	20,9	0,130
Сточная вода БСА 2-й ст. очистки*	7,07	549	~ 120	20,9	0,364

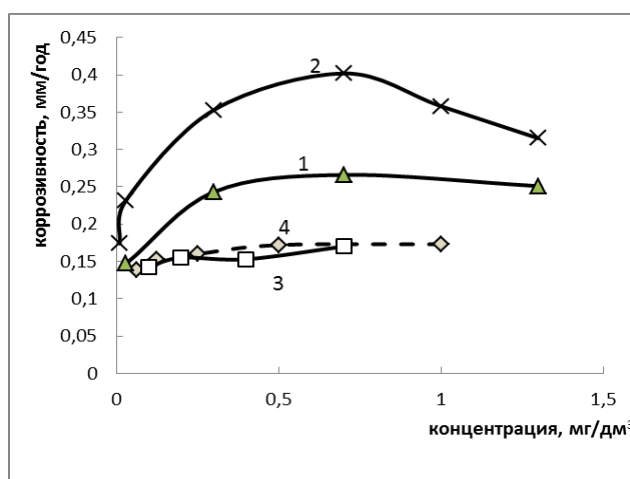
*показатель окисляемости – 231,9 мг/дм³

Наибольший показатель коррозионной активности имеет сточная вода 2-й ступени очистки в (0,33-0,41 мм/год), поскольку в процессе биохимической очистки в аэротэнке в воде существенно увеличивается концентрация растворенного кислорода. При этом коррозионность сточной воды 1-й ступени очистки находится на уровне 0,130 мм/год. Данные показатели измерили в день отбора пробы воды. Следует отметить, что после отстаивания воды в лаборатории в течение 10 дней значения коррозионности обеих вод практически сравнялись до 0,23-0,24 мм/год. Это значение находится в пределах коррозионности воды рассмотренных объектов.

Если рассмотреть влияние на коррозионность воды активирующих коррозию анионов хлорида и сульфата, то обнаруживается некоторое противоречие. Так, содержание хлоридов и сульфатов в днепровской или деснянской водопроводных водах небольшое, и ее

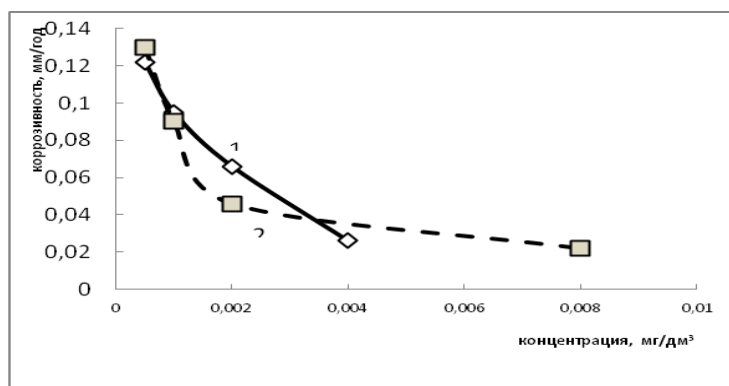
коррозионность также относительно невелика. Однако, несмотря на гораздо меньшее содержание этих анионов в трускавецкой воде по сравнению с морской или жесткой водами, ее коррозионность значительно выше. Учитывая этот факт, было проведено исследование влияния на коррозионность воды отдельных анионов в минимальных концентрациях.

Концентрационные зависимости получали для активаторов коррозии – хлорида и сульфата натрия, для нейтральной соли (нитрата натрия) и пассиваторов (нитрита натрия, хромата калия). В опытах использовали соли марки «чда» и дистиллированную воду. Определение коррозионности растворов проводили по той же методике. Полученные результаты приведены на рисунках 3 и 4. Из рисунка 3 видно, что коррозионность растворов средних (нормальных) солей по-разному изменяется с концентрацией соли.



1 – NaCl; 2 – Na₂SO₄; 3 – NaNO₃; 4 – Ca(NO₃)₂

Рисунок 3 – Влияние концентрации кислорода на коррозионность воды



1 – NaNO₂, 2 – KCrO₄

Рисунок 4 – Концентрационные зависимости коррозионности для пассиваторов

Для нитратов натрия и кальция она почти неизменна, а для активатора хлорида натрия она возрастает в 1,7 раза при изменении концентрации соли на порядок, тогда как для сульфата натрия увеличивается в 2,3 раза. С увеличением концентрации пассиваторов коррозионность существенно уменьшается (рисунк 4), поскольку металл (сталь 20) закономерно переходит из активного состояния в пассивное, и скорость коррозии значительно снижается.

Необходимо отметить, что при снижении концентрации солей коррозионность растворов приближается к одному значению $0,145 \pm 0,005$ мм/год. Это значение можно считать характеристической величиной и действительным значением коррозионности для чистой аэрированной воды при 25°C в стационарных условиях по отношению к малоуглеродистой стали. Как видно из результатов, при появлении в воде хлоридов или сульфатных ионов коррозионность воды увеличивается. О такой зависимости известно из литературы [10]. При адсорбции хлоридных или сульфатных ионов часть диполей воды десорбируется из адсорбционного слоя, поскольку сродство большинства металлов к хлору больше, чем к кислороду. В результате ионы хлорида или сульфата будут препятствовать образованию кислородного барьера диполей воды, поэтому скорость анодной реакции (3) станет расти и, соответственно, будет увеличиваться скорость коррозии металла. Конкурирующая адсорбция хлорид- и сульфат-анионов, которая зависит от соотношения их содержания в воде [11], является основным фактором, который будет влиять на ее коррозионность и стабильность. Что касается влияния нитратных ионов, то их адсорбция на металле не отличается от адсорбции диполей воды. Нитрат-ионы также адсорбируются кислородом к поверхности металла и, поэтому, скорость коррозии не будет меняться.

Поскольку коррозионная активность воды в процессе ее обработки на водопроводных станциях может существенно изменяться, то определение степени коррозионности воды различного назначения играет важную роль. Учитывая, что транспортировка воды осуществляется водопроводами, изготовленными, в основном, из стали, чугуна, железобетона без защитных покрытий, то интенсивность коррозионных процессов и вторичное загрязнение

воды продуктами коррозии являются первостепенными факторами, влияющими на ее качество. Определение коррозионности воды особенно важно для коммунальных предприятий водо- и теплоснабжения, в частности, при обескислороживании воды в системах теплоснабжения как термическим, так и химическим методом сульфитирования. Согласно требованиям к качеству воды количество кислорода, растворенного в воде тепловой сети, не должно превышать 50 мкг/дм^3 . Соответственно, коррозионность воды должна быть низкой и не выше $0,05$ мм/год, что требуется нормативными документами [12]. Применение регулярного контроля коррозионности воды систем тепло-водоснабжения совместно со средствами противокоррозионной защиты будет способствовать не только сокращению аварий по причине коррозии, но и улучшению качества услуг для населения.

Выводы:

1. Предложено определять характеристическую величину коррозионности воды по отношению к неокисленной поверхности металла (малоуглеродистой стали 20) при 25°C в стационарных условиях. Найдено, что коррозионность чистой аэрированной воды соответствует $0,145 \pm 0,005$ мм/год.

2. Установлено, что количественные характеристики коррозионности водных сред находятся в диапазоне от $0,281$ мм/год (трускавецкая вода) до $0,141$ мм/год (моршинская вода). Коррозионность водопроводной воды – деснянской и днепровской – находится на низком уровне ($0,167$ и $0,145$ мм/год соответственно). Наиболее коррозионно-активной является сточная вода в процессе аэрации при биохимической очистке.

3. Получена линейная зависимость коррозионности водопроводной воды от концентрации растворенного кислорода, которая экстраполируется на нулевое значение при его нулевой концентрации.

4. Установлено, что минерализация воды существенно влияет на ее коррозионную активность и стабильность. В зависимости от содержания анионов в воде и их конкурирующей адсорбции, которая приводит к десорбции диполей воды на поверхности металла и устранению кислородного барьера, скорость восстановления кислорода может увеличиваться, и, соответственно, увеличивается скорость коррозии.

Список литературы

- [1] М. С. Блантер, В. Я. Кершенбаум, Г. Г. Мухин и др., *Терминологический словарь «Металлы»*: в 2 т. Москва, Россия – Запорожье, Украина: Мотор-Сич, 2005.
- [2] A. A. Gallegos, S. S. Martinez, and J. L. Ramirez Reyes, "Evaluation of water corrosivity using a corrosion rate model for a cooling water system", *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, no. 8, pp. 133-142, 2005.
- [3] А. Т. Тамазашвілі, Ю. І. Мазна, К. А. Малихіна, та М. Д. Гомеля, "Оцінка впливу фізико-хімічних факторів на корозійну активність води", *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 5/6, с. 15-19, 2013.
- [4] Н. А. Белоусова, М. И. Донченко, Ю. С. Герасименко, и Р. М. Редько, "Экологически безопасные способы защиты стали от коррозии в воде. Влияние минерализации воды на коррозию малоуглеродистой стали", *Экотехнологии и ресурсосбережение*, № 4, с. 33-37, 2010.
- [5] Ю. В. Балабан-Ирменин, В. М. Липовских, и А. М. Рубашов, *Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей*, 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Россия: Новости теплоснабжения, 2008.
- [6] Ф. Мансфельд, "Определение тока коррозии методом поляризационного сопротивления", в *Достижения науки о коррозии и технологии защиты от нее*, М. Фонтана, Р. Стэйл, Ред., т. 6. Москва, Россия: Metallurgiya, 1980. С. 180-265.
- [7] ДСТУ 3895-99 (международный ГОСТ 9.514-99) "Ингибиторы коррозии металлов для водных систем. Электрохимический метод определения защитной способности".
- [8] А. М. Гриценко, и В. Н. Степанов, "Водный баланс Мирового океана и его роль в планетарных процессах", *Изв. АН СССР, серия геогр.*, № 6, с. 19-25, 1980.
- [9] Справочник химика, т. 3. Москва, Россия: Химия, 1968, с. 316-317.
- [10] Н. П. Лапотышкина, и Р. П. Сазонов, *Водоподготовка и водно-химический режим тепловых сетей*, Москва, Россия: Энергоиздат, 1982.
- [11] И. Л. Розенфельд, *Ингибиторы коррозии*. Москва, Россия: Химия, 1977.
- [12] Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж. Затв. 14.02.2007. № 71/М / М-во палива і енергетики України. Харків, Україна: Індустрія, 2007.

References

- [1] M. S. Blanter, V. Ya. Kershenbaum, G. G. Mukhin et alr. *Terminological dictionary "Metals"*: in 2 vol. Moscow, Russia – Zaporozhye, Ukraine: Motor-Sich, 2005 [in Russian].
- [2] A. A. Gallegos, S. S. Martinez, and J. L. Ramirez Reyes, "Evaluation of water corrosivity using a corrosion rate model for a cooling water system", *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, no. 8, pp. 133-142, 2005.
- [3] A. T. Tamazashvili, Yu. I. Mazna, K. A. Malyhina, and M. D. Gomelya, "Valuation of the impact of physical and chemical factors on water corrosive activity", *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, no. 5/6, pp. 15-19, 2013 [in Ukrainian].
- [4] N. A. Belousova, M. I. Donchenko, Yu. S. Gerasimenko, and R. M. Redko, "Ecologically safe ways to protect steel from corrosion in water. Impact of water mineralization on low-carbon steel corrosion", *Eko-tehnologii i resursosberezhnie*, no. 4, pp. 33-37, 2010 [in Russian].
- [5] Yu. V. Balaban-Irmenin, V. M. Lipovskih, and A. M. Rubashov, *Protection from inner corrosion of pipelines of water heat networks*, 2-nd ed. Moscow, Russia: Novosti teplosnabzheniya, 2008 [in Russian].
- [6] F. Mansfeld, "Determination of corrosion current by polarization resistance method", in *Dostizheniya nauki o korrozii i tehnologii zashity ot nee*, M. Fontana, R. Stejl, Eds., vol. 6. Moscow, Russia: Metallurgiya, 1980, pp. 180-265 [in Russian].
- [7] DSTU 3895-99 (International State Standard 9.514-99) "Metal corrosion inhibitors for water systems. Electrochemical method for determination of protective potency" [in Russian].
- [8] A. M. Gricenko, and V. N. Stepanov, "Water balance of the great oceans and their role in planetary processes", *Izv. AN SSSR, seriya geogr.*, no. 6, pp. 19-25, 1980 [in Russian].

- [9] Handbook of chemical industry worker, vol. 3. Moscow, Russia: Himiya, 1968, pp. 316-317 [in Russian].
- [10] N. P. Lapotyshkina, and R. P. Sazonov, *Water treatment and water-chemical regime of heat networks*. Moscow, Russia: Energoizdat, 1982 [in Russian].
- [11] I. L. Rozenfeld, *Corrosion inhibitors*. Moscow, Russia: Himiya, 1977 [in Russian].
- [12] Rules of technical exploitation of heat units and networks. Approved 14.02.2007, no. 71/M. Kharkiv, Ukraine: Industriya, 2007 [in Ukrainian].

I. M. Astrelin, D. Sc., professor,

Yu. S. Gerasymenko, D. Sc., professor,

N. A. Bilousova, Ph. D., senior researcher,

I. V. Kosogina, Ph. D., associate professor

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF WATER CORROSION ACTIVITY

It is proposed to determine the relative corrosivity of an aqueous medium as the metal corrosion rate at the initial stage of its contact with the medium in the absence of flow and at a constant temperature 25 °C. The measurements have been carried out using the electrochemical method of polarization resistance R_p , corrosion meter-indicators and a developed two-electrode electrochemical chamber with a cleaning device. The peculiarity of the methodology is that instantaneous values of polarization resistance have been measured on a freshly cleaned metal surface and the values of the corrosion rate have been obtained using a conversion factor of 104 Ohm·mm/year. Quantitative characteristics of water corrosivity of various origins with respect to steel 20, as well as solutions of salts with activating and passivating properties are obtained. Well- and artesian water, tap water (Dnieper and Desnian water abstraction), mineral bottled still water, model sea water and wastewater from the Bortnichy aeration station have been investigated. Water corrosivity ranges from 0.281 mm/year (Truskavets water) to 0.141 mm/year (Morshin water). The corrosivity of slightly mineralized aerated water corresponds to 0.145 mm/year. The corrosivity of wastewater in the process of biochemical treatment is the greatest – up to 0.4 mm/year. With sedimentation of the wastewater, the corrosivity has decreased by 2 times. It has been established that the mineralization of water significantly affects its corrosivity and stability. Depending on the content of anions in the water and their competing adsorption, which leads to the desorption of water dipoles on the metal surface and the removal of the oxygen barrier, the oxygen reduction rate can increase, and, accordingly, the metal corrosion rate increases. The dependence of the corrosivity of weakly mineralized water on the concentration of dissolved oxygen is linear and extrapolated to zero.

Keywords: corrosion activity, corrosion rate, polarization resistance, water mineralization, water stability, wastewater.

УДК 543.544:541.183

[0000-0002-3871-4063] **З. О. Знак**, д.т.н., професор,

e-mail: znak_zo@ukr.net

А. С. Грабаровська, аспірантка,

e-mail: 1584466@ukr.net

О. І. Зінь, м.н.с.,

e-mail: zin.olha@gmail.com

А. В. Дяденчук, студент

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна

МОДИФІКУВАННЯ ТЕРМІЧНО АКТИВОВАНОГО ПРИРОДНОГО КЛИНОПТИЛОЛІТУ ЙОНАМИ АРГЕНТУМУ

Проаналізовано області використання природного цеоліту – клиноптилоліту – як сорбенту для очищення природних і стічних вод. Зазначено перспективність модифікування цеоліту йонами Аргентуму, які надають йому антибактеріальних властивостей. Подано опис лабораторної установки та методики проведення досліджень з модифікування цеоліту. Наведено результати дегідратування природного клиноптилоліту за температур 100...400 °C та під дією електромагнітних випромінювань надвисокочастотного діапазону. Визначено швидкість процесу дегідrataції клиноптилоліту за різних температур. Наведено результати модифікування термічно активованого клиноптилоліту йонами Аргентуму в умовах перемішування в турбулентному режимі. Встановлено значення сорбційної ємності клиноптилоліту щодо йонів Аргентуму та розраховано швидкості йонного обміну залежно від умов дегідrataції цеоліту. Проаналізовано особливості заміщення обмінних катіонів клиноптилоліту йонами Аргентуму.

Ключові слова: природні сорбенти, очищення води, клиноптилоліт, модифікування, йони Аргентуму, сорбційна ємність.

Вступ (постановка проблеми). Природні сорбенти завдяки доволі високій сорбційній ємності, низькій вартості, наявності величезного ресурсного потенціалу дедалі ширше використовують у процесах підготовки природних і очищення стічних вод. Зокрема, це стосується такого природного мінералу, як клиноптилоліт – один із різновидів цеолітів. Окрім високої сорбційної ємності, зумовленої наявністю розвиненої системи макро-, мезо- та мікропор, клиноптилоліту притаманна йонообмінна здатність, оскільки в його структурі містяться так звані обмінні йони, зокрема, кальцію, магнію, натрію, калію. Тому завдяки йонообмінній здатності клиноптилоліт часто використовують для очищення різних вод від шкідливих домішок. Так, застосування дисперсного природного цеоліту (0,315...0,63 мм) забезпечило ступінь очищення води від йонів амонію не менше 95 % [1]. Показано, що висока йонообмінна здатність щодо йонів амонію притаманна клиноптилоліту болгарського родовища [2]. Дослідження кінетики та рівноваги сорбції амонійних йонів на цеоліті китайського родовища

підтвердило доцільність його застосування в процесах очищення вод від NH_4^+ [3]. Природний клиноптилоліт словацького родовища володіє високою ємністю щодо йонів кольорових металів, зокрема Купруму [4]. Показано, що високий ступінь очищення вод клиноптилолітом досягається за наявності йонів Цинку, Купруму та Плюмбуму [5]. Для вилучення йонів кольорових металів запропоновано використовувати натуральні та модифіковані цеоліти [6]. Для вилучення йонів важких металів з промислових вод доцільно застосовувати синтетичні та природні цеоліти [7]. Внаслідок вилучення йонів Феруму можна отримати цеоліт, який надалі можна використовувати для очищення води від йонів Флюору [8]. Встановлено, що модифіковані солями Мангану та Феруму(II) цеоліти забезпечують високу поглинальну здатність цеолітів щодо йонів Феруму(III) [9]. Активовані природні цеоліти дають змогу вилучати з вод сполуки Флюору [10].

У типових процесах підготовки води для господарсько-питних потреб важливою стадією є знезараження води, яке здебільшого

здійснюють хлоруванням. У разі використання природних поверхневих вод, що містять різноманітні органічні сполуки, хлорування може призвести до утворення хлорпохідних цих органічних сполук, більшості з яких притаманна канцерогенна дія. Тому в розвинених країнах альтернативою хлорування є використання озонування, ультрафіолетове знезаражування, а також використання нанокмполімерів на основі срібла, яке володіє вираженою окисною здатністю. Наприклад, запропоновано модифікувати природні цеоліти, в тому числі й клиноптилоліт, йонами Аргентуму, які надають мінералу ще й дезінфікуювальних властивостей [11]. Нанокмполімерні матеріали на основі модифікованого сріблом цеоліту застосовують у фільтрах для води [12]. Попереднє кислотне модифікування цеоліту дає змогу здійснити ефективніше його модифікування сполуками Аргентуму [12]. Одночасно це дає змогу розширити сфери використання клиноптилоліту, модифікованого йонами Аргентуму, зокрема в медицині, харчовій промисловості, сільському господарстві та інших галузях економіки. Загалом, фізичне (термічне) та хімічне модифікування цеолітів, як природних, так і синтетичних, стало традиційним способом покращення їх іонообмінних та сорбційних властивостей. Однак наявні в джерелах інформації відомості щодо умов модифікування та їх вплив на сорбційну ємність клиноптилоліту щодо йонів Аргентуму є вельми обмеженими, що й зумовило мету цих досліджень.

Метою роботи було дослідження впливу умов дегідратації природного клиноптилоліту на кінетику його модифікування йонами Аргентуму та величину сорбційної ємності цеоліту за йонами Ag^+ .

Експериментальна частина. У дослідженнях використовували природний клиноптилоліт Сокирницького родовища (ТУ У 20.5-43073742-002:2019). Для очищення цеоліту від домішок, передусім глини, що зазвичай входить до складу цеолітової породи, товарну фракцію клиноптилоліту 2-3 мм впродовж 10 хв. подрібнювали до фракції <2,0 мм у кульовому млині (об'єм барабана – 3 дм³; частота обертання барабана – 1 об/с; масове співвідношення клиноптилоліт : молотильні тіла = 1 : 1; ступінь заповнення барабана – 50±5 %). Після подрібнення фракцію <0,25 мм, в якій вміст глинистих частинок був найбільшим, відсіювали. Фракцію клинопти-

лоліту >0,25 мм надалі знову розмелювали на кульовому млині.

Оскільки процес модифікування є типовим гетерогенним, то для зменшення впливу фракційного складу на результати усі дослідження проводили з використанням вузької фракції клиноптилоліту – 0,056...0,063 мм.

Визначення температурного діапазону термічного оброблення природного клиноптилоліту з метою його дегідратації перед модифікуванням йонами Ag^+ проводили методом диференційно-термічного аналізу (ДТА) з використанням дериватографа Q-1500 D системи "Paulik-Paulik-Erdey".

За результатами ДТА термооброблення клиноптилоліту надалі проводили в діапазоні температур 373...773 К. Окрім того, цеоліт піддавали обробленню надвисокочастотним (НВЧ) електромагнітним випромінюванням з частотою $2,45 \pm 0,05$ ГГц потужністю 400 ± 25 Вт (за нижчої потужності ефективність поглинання НВЧ-випромінювань клиноптилолітом є незначною [14]).

Ступінь дегідратації цеоліту визначали гравіметрично за допомогою аналітичної ваги Axis A-500. Значення цього показника впродовж термооброблення (та оброблення НВЧ-випромінюванням) визначали за формулою

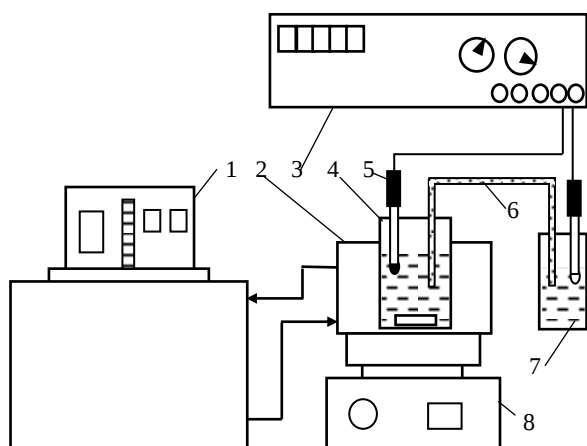
$$x = \frac{m_{\text{ze},0} - m_{\text{ze},i}}{m_{\text{gid}}} 100,$$

де $m_{\text{ze},0}$ – початкова маса зразка цеоліту, г;

$m_{\text{ze},i}$ – поточна маса зразка цеоліту, г;

m_{gid} – маса води у зразку цеоліту, яку визначали при нагріванні клиноптилоліту до температури 450 °С, г.

Дослідження модифікування природного клиноптилоліту йонами Аргентуму проводили на установці, зображеній на рисунку 1. До її складу входили: ультратермостат УТ-8 (1); термостатна ванна (2), яка розташована на магнітній мішалці (8); хімічна склянка (4), в якій проводили модифікування клиноптилоліту і яка розташована в термостатній ванні (2); Ag -селективний електрод (ESS-01) (5), який разом з хлорид-срібним електродом (EVL-1M), комутованим з мілівольтметром Ф-30 (3), слугував для визначення концентрації йонів Аргентуму в розчині; електролітичний мостик (6), заповнений агар-агаром; проміжна ємність (7), заповнена електролітом (0,1 N розчин KNO_3).



- 1 – ультратермостат; 2 – термостатна ванна;
3 – мілівольтметр; 4 – хімічна склянка;
5 – Ag-селективний електрод; 6 – мостик;
7 – хлоридсрібний електрод порівняння;
8 – магнітна мішалка

Рисунок 1 – Схема лабораторної установки

Модифікування клиноптилоліту проводили в розчині 0,1 N AgNO₃ за постійного перемішування суспензії цеоліту в турбулентному режимі в діапазоні температур 20...60 С. Дослідження проводили за п'ятиразового надлишку йонів Ag⁺ щодо обмінних йонів цеоліту (в еквівалентному вираженні). Надлишок йонів Ag⁺ був необхідний для досягнення рівноваги процесу обміну катіонів, що входять до складу клиноптилоліту, на йони Аргентуму з розчину. Періодично в розчині потенціометрично визначали залишкову концентрацію йонів Ag⁺. Тривалість процесу йонного обміну не перевищувала 30 хв., що попередньо встановлено експериментально.

Ag-селективний електрод перед кожним дослідженням калібрували в розчинах AgNO₃ (1·10⁻⁴...1·10⁻¹ екв/дм³).

Після досягнення сталого значення потенціалу Ag-селективного електрода, тобто після припинення йонного обміну в системі розчин–цеоліт, дисперсний клиноптилоліт відфільтровували на мембранному фільтрі, цеоліт на фільтрі промивали дистильованою водою об'ємом 250 см³. У промивній воді визначали вміст йонів Аргентуму, який надалі (разом із загальним об'ємом промивних вод) враховували під час визначення сорбційної ємності певного зразка клиноптилоліту.

Після закінчення процесу модифікування методом зворотного йонного обміну визначали вміст йонів Аргентуму в клиноптило-

літі. Для цього модифікований цеоліт промивали дистильованою водою і обробляли 1 М розчином HNO₃, взятим з 10-разовим надлишком щодо вмісту йонів Ag⁺ в цеоліті, попередньо визначеним за зміною їх концентрації під час модифікування. Вміст йонів Ag⁺ в отриманому розчині визначали потенціометрично.

Відносна похибка визначення вмісту йонів Ag⁺ у клиноптилоліті (під час модифікування та внаслідок зворотного йонного обміну) не перевищувала 6 %.

Ступінь заміщення обмінних катіонів, що містяться у клиноптилоліті, на йони Аргентуму визначали за формулою

$$x_{Ag} = \frac{E_{Ag}}{E_0} 100,$$

де E_0 – інтегральна іонообмінна ємність вихідного клиноптилоліту, мекв/г;

E_{Ag} – досягнута іонообмінна ємність клиноптилоліту за йонами Ag⁺, мекв/г.

Результати та їх обговорення. Методом термогравіметричного аналізу встановлено, що дегідратація природного клиноптилоліту головню відбувається в два етапи. На першому – до температури близько 115 °С відбувається видалення фізично сорбованої води, що відображається у вигляді глибокого чітко вираженого ендоефекту (рисунок 2, лінія DTA), який супроводжується відповідною втратою маси (рисунок 2, лінія DTG).

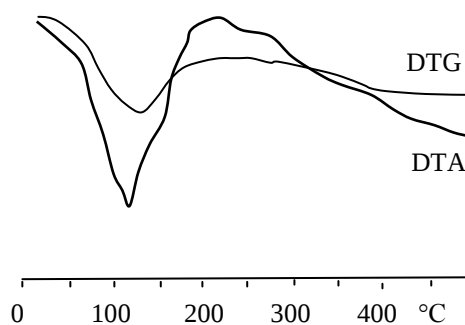


Рисунок 2 – Термограма природного клиноптилоліту

В області 230...400 °С проявляється наступний ендоефект, зумовлений виділенням води за рахунок гідроксильних груп та кристалогідратної води. Інтенсивність цього ендоефекту є меншою, ніж попереднього, однак його інтегральне значення, як і втрата маси в цій температурній області, є сумірними з першим. Вміст фізично сорбованої води у клиноптилоліті, який зберігався за кімнатної темпе-

ратури, становив близько 55 % від її загально-го вмісту. За подальшого підвищення температури понад 400 °С спостерігався ще один ендоефект, який, проте, відбувався практично без втрати маси. Це пояснюється зміною структури клиноптилоліту, яка може супроводжуватись міграцією обмінних катіонів.

На підставі отриманих результатів подальші дослідження з впливу температури на дегідратацію клиноптилоліту проводили в діапазоні температур 100...400 °С.

Залежність ступеня дегідратації клиноптилоліту від температури, а також під дією НВЧ-випромінювання наведено на рисунку 3.

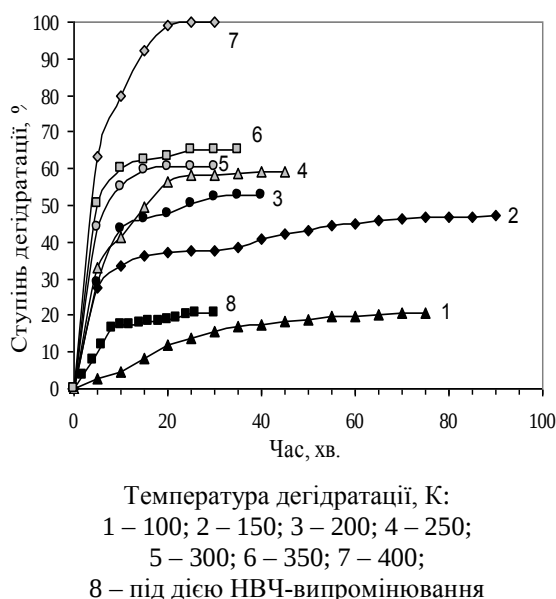


Рисунок 3 – Залежність ступеня дегідратації клиноптилоліту від часу

Швидкість дегідратації на початкових стадіях процесу пропорційна температурі дегідратації (рисунок 4). Збільшення температури в 4 рази (від 100 до 400 °С) спричиняє збільшення початкової швидкості дегідратації в 12,4 разу (від $0,3 \cdot 10^{-4}$ до $3,73 \cdot 10^{-4}$ (г H_2O /г Кл·с).

За температури близько 100 °С десорбується фізично сорбована вода, тоді як за вищих температур дегідратація відбувається за рахунок цеолітних гідроксильних груп та кристалогідратної води.

Швидкість цього процесу в НВЧ-полі дорівнює $0,575 \cdot 10^{-4}$ (г H_2O /г Кл·с), що відповідає температурі дегідратації близько 120 °С. Водночас температура клиноптилоліту, обробленого в полі дії електромагнітних випромінювань, впродовж усього процесу зростає

всього на 1...2 градуси. Це зумовлене тим, що кристалічна ґратка цеоліту типу клиноптилоліт є «прозорою» для НВЧ-випромінювань. Після досягнення сталої маси зразка цеоліту його температура не змінюється. Отже, електромагнітне випромінювання з частотою близько 2,45 ГГц не поглинається мінералом, а його енергія витрачається лише на видалення саме фізично сорбованої води. Молекули води, як відомо, є диполями. Завдяки цьому НВЧ-випромінювання взаємодіє з молекулами фізично сорбованої води селективно, внаслідок чого вода нагрівається й випаровується, а сам цеоліт при цьому не нагрівається. Через це енергетичні витрати на перебіг дегідратації під дією НВЧ-випромінювань є значно нижчими, ніж у разі термічної.

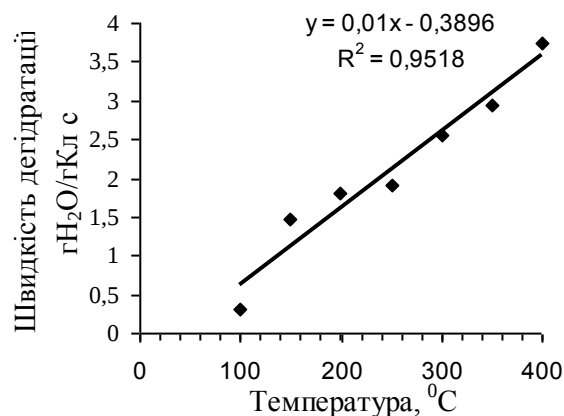


Рисунок 4 – Залежність початкової швидкості дегідратації клиноптилоліту від температури

Залежність тривалості процесу дегідратації (до досягнення сталої маси зразка клиноптилоліту за певних умов) від температури процесу у зазначеному вище діапазоні взагалі також є прямолінійною (рисунок 5), тобто виділення води пропорційне кількості підведеної теплової енергії.

Зразки дегідратованого клиноптилоліту надалі модифікували йонами Аргентуму за температури 20 ± 2 °С. З урахуванням біжучої концентрації йонів Аргентуму в розчині та маси цеоліту розраховували вміст йонів Ag^+ у клиноптилоліті, тобто його сорбційну ємність (рисунок 6). Цей показник вибірково контролювали методом зворотного йонного обміну.

Найменша швидкість процесу, що дорівнювала $2,22 \cdot 10^{-4}$ (ммоль Ag^+)/(с·г Кл), властива для вихідного цеоліту (швидкість гетерогенного процесу йонного обміну розраховували відносно маси клиноптилоліту,

оскільки визначення загальної площі поверхні високодисперсних частинок не коректне).

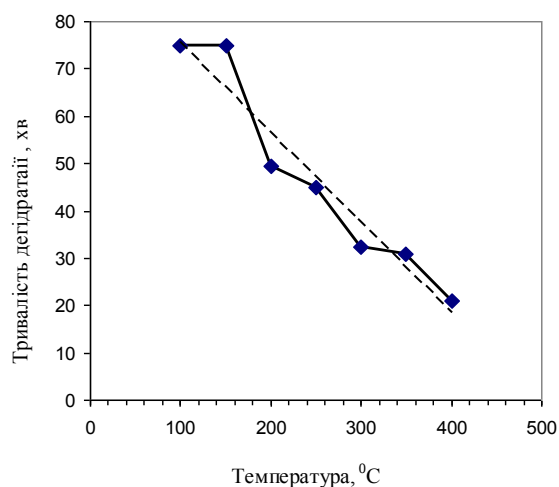
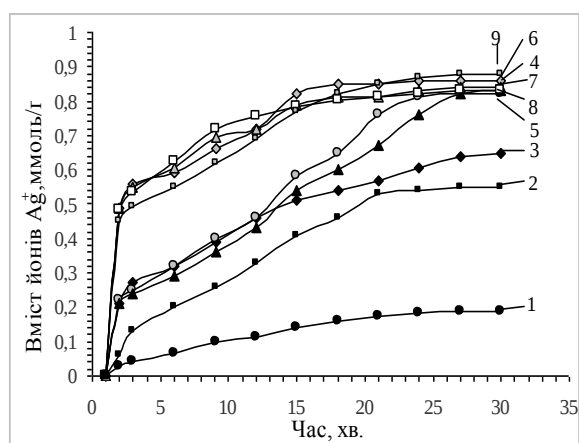


Рисунок 5 – Залежність тривалості дегідратації клиноптилоліту (до досягнення сталої маси) від температури



1 – вихідний (недегідратований);
2 – під дією НВЧ-випромінювання;
за температури, °C: 3 – 100; 4 – 150; 5 – 200;
6 – 250; 7 – 300; 8 – 350; 9 – 400

Рисунок 6 – Залежність вмісту йонів Аргентуму в клиноптилоліті від часу залежно від умов дегідратації

Швидкість йонного обміну у разі цеоліту, обробленого в НВЧ-полі, збільшувалась у 3,25 разу, порівняно з вихідним клиноптилолітом. При цьому сорбційна ємність щодо йонів Ag^+ зростала у 2,9 разу.

Цікаво, що початкові швидкості йонного обміну для зразків клиноптилоліту, термоактивованого за температур 100, 150 і 200 °C, є практично однаковими і дорівнюють $1,39 \cdot 10^{-3}$ (ммоль Ag^+)/(с·г Кл). Однак після 12...13-ї хв. швидкість процесу за участю це-

оліту, активованого за 100 °C, зменшилась практично вдвічі, тоді як для двох інших зразків (оброблених за 150 і 200 °C) вона залишалась практично сталою ще впродовж наступних 10...13 хв.

Активация цеоліту за 150 і 200 °C дала змогу досягнути вмісту йонів Ag^+ 0,82 мекв/г, що в 1,26 і 4,3 разу більше, ніж для вихідного (неактивованого) і активованого за 100 °C відповідно.

Початкова швидкість йонного обміну в клиноптилоліті, обробленому за температур у діапазоні 250...400 °C, є практично сталою (дорівнює $0,85 \pm 0,01$ ммоль/с·г) і більшою в 1,31 разу, порівняно з такою ж для цеолітів, активованих за 100...200 °C. Однак після 11...15-ї хв. швидкість процесу істотно зменшується, а після 22...25 хв. практично припиняється – наступає стан рівноваги.

В усіх випадках за тривалості модифікування 30 хв. у розчині досягалось стабільне значення потенціалу Ag-селективного електрода, тобто досягалась рівновага йонного обміну. За цих умов розраховували статичну ємність клиноптилоліту.

Значення статичної ємності клиноптилоліту, активованого за різних температур та у полі НВЧ-випромінювання, щодо йонів Ag^+ наведено на рисунку 7.

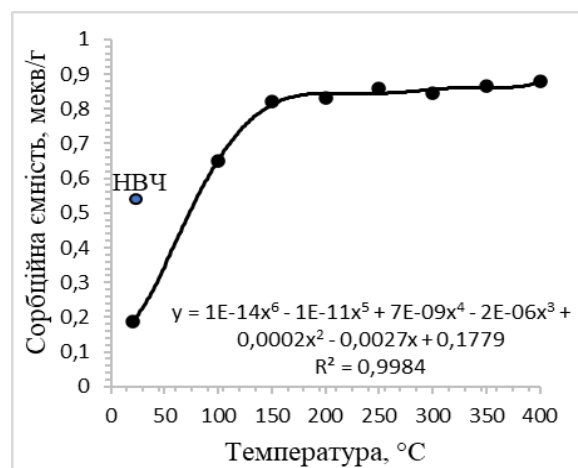


Рисунок 7 – Залежність сорбційної ємності клиноптилоліту від температури активації та під дією НВЧ-випромінювання

Як видно з рисунка 7, зі збільшенням температури активації від 150 до 400 °C сорбційна ємність клиноптилоліту зростає незначно: від 0,82 до 0,88 мекв/г, тобто всього в 1,07 разу. При цьому питома витрата енергії на активування зростає суттєво. Очевидно, що

ефективність використання енергії зі збільшенням температури активації дедалі зменшується й витрачається здебільшого на нагрівання мінералу. Приріст сорбційної ємності у цьому температурному діапазоні дорівнює всього $2,4 \cdot 10^{-4}$ мекв/К.

Активування клиноптилоліту в НВЧ-полі дає змогу досягнути сорбційної ємності 0,55 мекв/г, яка в 2,9 разу більша, ніж для вихідного цеоліту, і менша в 1,5...1,6 разів, порівняно з цеолітом, обробленим за температур 150...400 °С.

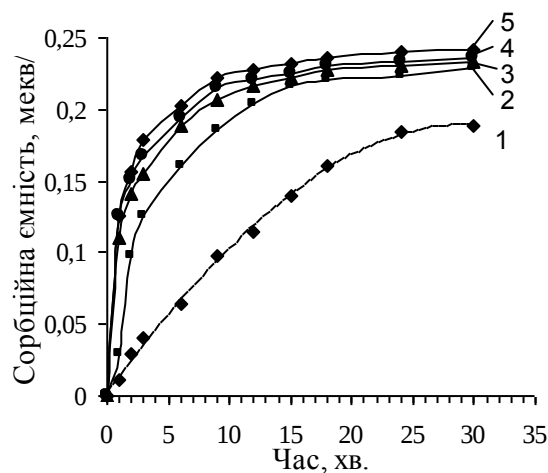
Клиноптилоліт Сокирницького родовища характеризується середньою іонообмінною ємністю 1,5 мекв/г. Розрахований ступінь заміщення усіх протийонів, що містяться у цьому цеоліті, на йони Аргентуму дорівнює (%) для: вихідного клиноптилоліту – 12,6; активованого під дією НВЧ-випромінювання – 40,3; активованого за температур (°С): 100 – 43,3; 150 – 54,7; 200 – 55,3; 250 – 57,3; 300 – 56,0; 350 – 56,7; 400 – 58,7.

Як видно, за температури процесу модифікування 20 ± 2 °С, незалежно від температури активування цеоліту, статична ємність за йонами Аргентуму не сягає навіть 60 % від теоретично можливої. Те, що максимальний ступінь заміщення обмінних катіонів клиноптилоліту на йони Аргентуму є порівняно невеликим, можна пояснити особливостями перебігу цього процесу. Очевидно, що за умов турбулентного перемішування зовнішньодифузійний опір у системі практично відсутній. Оскільки клиноптилоліт характеризується розвиненою системою каналів (макро-, мезо- і мікро-), наявністю обмінних катіонів (Ca^{2+} ; Na^+ ; K^{2+} ; Mg^{2+}) гідроксильних груп і кристалогідратної води, то у внутрішній області частинок цеоліту одночасно відбуваються дифузійні процеси та обмінні рівноважні хімічні реакції.

Попередня термічна активація, як видно з отриманих результатів, сприяє збільшенню сорбційної ємності клиноптилоліту завдяки його дегідратації. Причому, за умов проведення експериментів найбільше впливає наявність фізично сорбованої води, яка утримується в цеоліті. Зокрема, це відбувається за рахунок утворення водневих зв'язків молекул води з гідроксильними групами. Тому можна вважати, що вилучення гідроксильних груп за температур понад 150 °С має менший вплив на перебіг йонного обміну.

Йонний обмін відбувається як обмінна реакція, швидкість якої залежить від температури. Тому надалі модифікування проводили за температур 30, 40, 50 і 60 °С з використанням вихідного (термічно неактивованого) клиноптилоліту.

Зміну сорбційної ємності неактивованого цеоліту в часі наведено на рисунку 8.



1 – 20; 2 – 30; 3 – 40; 4 – 50; 5 – 60

Рисунок 8 – Залежність сорбційної ємності вихідного клиноптилоліту від часу залежно від температури (°С) модифікування

Підвищення температури від 20 до 30 °С спричиняє незначне збільшення рівноважної сорбційної ємності за йонами Аргентуму – від 0,189 до 0,229 мекв/г, тобто всього в 1,2 разу. Подальше підвищення температури має ще менший вплив на величину сорбційної ємності. Так, зі збільшенням температури від 30 до 60 °С сорбційна ємність збільшується від 0,229 до 0,249 – в 1,1 разу.

Початкова швидкість заміщення обмінних йонів на йони Ag^+ за температур 20; 30; 40; 50 і 60 °С дорівнює $2,22 \cdot 10^{-4}$; $8,13 \cdot 10^{-4}$; $2,35 \cdot 10^{-3}$; $2,50 \cdot 10^{-3}$ і $2,61 \cdot 10^{-3}$ ммоль/с·г відповідно. Зі збільшенням температури від 20 до 30 °С температурний коефіцієнт швидкості дорівнює 3,6. Тобто у початковий момент процес відбувається у кінетичній області. Однак надалі, як свідчать отримані результати, модифікування природного клиноптилоліту відбувається у внутрішньодифузійній області. Це можна пояснити переміщенням фронту реакції обміну у внутрішні області частинки та гальмуванням дифузії наявністю обмінних йонів, передусім Кальцію та Магнію.

Зі збільшенням температури від 30 до 40 °C і більше значення температурного коефіцієнта швидкості дедалі зменшується і для температур 50 і 60 °C воно дорівнює лише 1,04, що підтверджує висновок про зміщення області перебігу процесу у внутрішньодифузійну область.

На підставі наведених вище даних розраховано, що у разі здійснення процесу за температури 50...60 °C з використанням термічно активованого (за температури 200...400 °C) клиноптилоліту можна досягнути сорбційної ємності близько 1,25...1,30 мекв/г (відповідно ступінь йонного обміну – 83...87 %). Однак ці висновки потребують подальшого експериментального підтвердження.

Висновки:

1. Найбільша сорбційна ємність клиноптилоліту щодо іонів Аргентуму досягається у разі його термічної активації за температур 200...400 °C.

2. Активація клиноптилоліту в полі НВЧ-випромінювання потужністю 400±25 Вт дає змогу досягнути сорбційної ємності 0,55 мекв/г, що відповідає температурі активації 120 °C, за одночасно істотного зменшення витрат енергії на дегідратацію.

3. Приріст сорбційної ємності у разі збільшення температури модифікування від 20 до 60 °C за турбулентного перемішування дорівнює близько 20 %, що свідчить про перебіг процесу у внутрішньодифузійній області.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення впливу температури модифікування термічно та хімічно активованого клиноптилоліту на його ємність щодо Ag^+ .

Список літератури

- [1] A. Mažeikiene, M. Valentukevičiene, M. Rimeika et al., "Removal of nitrates and ammonium ions from water using natural sorbent zeolite (clinoptilolite)", *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, vol. 16, pp. 38-34, 2008.
- [2] N. Taneva, "Removal of ammonium and phosphates from aqueous solutions by activated and modified Bulgarian clinoptilolite", *Journal of Chemical Engineering and Materials Science*, vol. 3, no.5, pp. 79-85, 2012.
- [3] Z. Ying, "Effect of dissolved organic matter on ammonium sorption kinetics and equilibrium to Chinese clinoptilolite", *Environmental technology*, vol. 33, no. 21, pp. 2395-2403, 2012.
- [4] I. Pandová, A. Panda, J. Valíček et al., "Use of sorption of copper cations by clinoptilolite for wastewater treatment international", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, (15), pp. 1364-1371, 2018.
- [5] J. Peric, M. Trgo, and N. Vukojevic Medvidovi, "Removal of zinc, copper and lead by natural zeolite. A comparison of adsorption isotherms", *Water Res.*, no. 38, pp. 1893-1899, 2004.
- [6] A. Zendelska, M. Golemeova, K. Blazev, and A. Krstev, "Adsorption of copper ions from aqueous solutions on natural zeolite", *Environ. Prot. Eng.*, no. 41, pp. 17-36, 2015.
- [7] U. Wingenfelder, C. Hansen, G. Furrer, and R. Schulin, "Removal of heavy metals from mine waters by natural zeolites", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 12, pp. 4606-4613, 2005.
- [8] Y. Sun, Q. Fang, J. Dong et al., "Removal of fluoride from drinking water by natural stilbite zeolite modified with Fe(III)", *Desalination*, vol. 277, no. 1-3, pp. 121-127.
- [9] М. Д. Гомеля, та М. М. Твердохліб, "Дослідження ефективності очищення води від сполук заліза за допомогою модифікованих фільтрувальних завантажень", *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 2/10 (80), с. 47-52, 2016.
- [10] З. О. Знак, та Г. Ф. Винявська, "Кондиціювання природної води щодо вмісту іонів Флюору клиноптилолітом, активованим термічним та електромагнітним методами", *Вісник НУ "Львівська політехніка". Хімія, технологія речовин та їх застосування*, № 761, с. 6-11, 2013.
- [11] K. Shameli, M. B. Ahmad, W. Yunus et al., "Fabrication of silver nanoparticles doped in the zeolite framework and antibacterial activity", *International Journal of Nanomedicine*, no. 6, pp. 331-341, 2011.
- [12] L. Leslie Petrik, R. Missengue, O. Fatoba et al. "Silver/zeolite nano composite-based clay filters for water disinfection", *Report to the Water Research Commission. WRC Report no. KV 297/12*, 2012, August.

- [13] M. Onal, Y. Sarikaya, and T. Alemdaroglu, "The effect of acid activation on some physico-chemical properties of bentonite", *Turkish Journal of Chemistry*, no. 26, pp. 409-416, 2002.
- [14] А. С. Грабаровська, З. О. Знак, та Р. Р. Оленич, "Дослідження активування природного клиноптилоліту надвисокочастотними електромагнітними випромінюваннями", *Chemistry, Technology and Application of Substances*, т. 1, № 2, с. 21-26, 2018.
- References**
- [1] A. Mažeikiene, M. Valentukevičiene, M. Rimeika et al., "Removal of nitrates and ammonium ions from water using natural sorbent zeolite (clinoptilolite)", *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, vol. 16, pp. 38-34, 2008.
- [2] N. Taneva, "Removal of ammonium and phosphates from aqueous solutions by activated and modified Bulgarian clinoptilolite", *Journal of Chemical Engineering and Materials Science*, vol. 3, no.5, pp. 79-85, 2012.
- [3] Z. Ying, "Effect of dissolved organic matter on ammonium sorption kinetics and equilibrium to Chinese clinoptilolite", *Environmental technology*, vol. 33, no. 21, pp. 2395-2403, 2012.
- [4] I. Pandová, A. Panda, J. Valíček et al., "Use of sorption of copper cations by clinoptilolite for wastewater treatment", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, (15), pp. 1364-1371, 2018.
- [5] J. Peric, M. Trgo, and N. Vukojevic Medvidovi, "Removal of zinc, copper and lead by natural zeolite. A comparison of adsorption isotherms", *Water Res.*, no. 38, pp. 1893-1899, 2004.
- [6] A. Zendelska, M. Golemeova, K. Blazev, and A. Krstev, "Adsorption of copper ions from aqueous solutions on natural zeolite", *Environ. Prot. Eng.*, no. 41, pp. 17-36, 2015.
- [7] U. Wingenfelder, C. Hansen., G. Furrer, and R. Schulin, "Removal of heavy metals from mine waters by natural zeolites", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 12, pp. 4606-4613, 2005.
- [8] Y. Sun, Q. Fang, J. Dong et al., "Removal of fluoride from drinking water by natural stilbite zeolite modified with Fe(III)", *Desalination*, vol. 277, no. 1-3, pp. 121-127.
- [9] M. D. Homelia, and M. M. Tverdokhlib, "Investigation of the efficiency of purification of water from iron compounds by modified filtering loads", *Vostochno-Evropaiskyi jurnal peredovych tehnologii*, no. 2/10 (80), pp. 47-52, 2016 [in Ukrainian].
- [10] Z. O. Znak, and H. F. Vuniavska, "Conditioning of natural water from fluorine ions by clinoptilolite, activated by thermal and electromagnetic methods", *Visnyk NU "L'viv's'ka politehnika". Khimiya, tekhnolohiya rechovyn ta yih zastosuvanniya*, no. 761, pp. 6-11, 2013 [in Ukrainian].
- [11] K. Shameli, M. B. Ahmad, W. Yunus et al., "Fabrication of silver nanoparticles doped in the zeolite framework and antibacterial activity", *International Journal of Nanomedicine*, no. 6, pp. 331-341, 2011.
- [12] L. Leslie Petrik, R. Missengue, O. Fatoba et al. "Silver/zeolite nano composite-based clay filters for water disinfection", *Report to the Water Research Commission*. WRC Report no. KV 297/12, 2012, August.
- [13] M. Onal, Y. Sarikaya, and T. Alemdaroglu, "The effect of acid activation on some physico-chemical properties of bentonite", *Turkish Journal of Chemistry*, no. 26, pp. 409-416, 2002.
- [14] А. С. Грабаровська, З. О. Знак, and Р. Р. Оленич, "Investigation of the activation of natural clinoptilolite by ultra-high frequency electromagnetic radiation", *Khimiya, tekhnolohiya rechovyn ta yih zastosuvanniya*, vol. 1, no. 2, pp. 21-26, 2018 [in Ukrainian].

Z. O. Znak, D. Sc., professor,
e-mail: znak_zo@ukr.net
A. C. Hrabarovska, graduate student,
e-mail: 1584466@ukr.net
O. I. Zin, junior researcher,
e-mail: zin.olha@gmail.com
A. V. Dyadenchuk, student
Lviv Polytechnic National University
S. Bandery str., 12, Lviv, 79013, Ukraine

MODIFICATION OF THERMALLY ACTIVATED NATURAL CLINOPTILOLITE WITH SILVER IONS

The analysis of the areas of application of natural zeolite – clinoptilolite is carried out. In particular, it is used as a sorbent with cation-exchange properties in the purification of natural and waste waters from non-ferrous and heavy metals, radionuclides and other harmful components of water. The prospects of modifying clinoptilolite with silver ions are shown. These ions give it antibacterial properties, which significantly expands the scope of its application.

The scheme, as well as a description of laboratory unit and the methodology for carrying out studies related to dehydration as thermal activation and modification of natural clinoptilolite with silver ions, are presented. The results of zeolite dehydration in the temperature range of 100 ... 400 °C, as well as due to the action of electromagnetic radiation of the microwave range, are presented and analyzed.

The speed of the process and the degree of thermal and electromagnetic dehydration of clinoptilolite are determined. It is shown that, under the influence of electromagnetic oscillations, the degree of dehydration corresponds to thermal activation at a temperature of 120 °C, however, the temperature of the mineral rises at this by no more than 2 degrees. It is found that thermal activation contributes to an increase in the sorption capacity of clinoptilolite relative to silver ions.

An increase in the activation temperature leads to an increase in the rate of ion exchange, however, in the range of dehydration temperatures of 150 ... 400 °C, the equilibrium capacity of zeolite with respect to silver ions is almost the same. An increase in the temperature of modification has little effect on the rate and degree of substitution of the exchange zeolite cations with silver ions. This indicates that the modification process takes place in the intradiffusion region. The features of ion exchange in the case of initial and thermally activated samples of clinoptilolite are analyzed.

Keywords: natural sorbents, water purification, clinoptilolite, modification, silver ions, sorption capacity.

[0000-0001-9251-5017] **О. В. Суворін**, д.т.н., професор,

e-mail: avsuvin@ukr.net

М. М. Шорохов, аспірант кафедри хімічної інженерії та екології,

e-mail: teplopribors@i.ua

[0000-0003-3862-1964] **М. А. Ожередова**, к.т.н., доцент,

e-mail: ozheredovama@ukr.net

[0000-0002-4697-1975] **Є. І. Зубцов**, к.т.н., доцент

e-mail: mining_07@i.ua

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля
м. Северодонецьк, Україна

ВИСОКОЕФЕКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ЗНЕШКОДЖЕННЯ Cr (VI)-ВМІСНИХ ПРОМИВНИХ ВОД ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

Робота присвячена розробці технології знешкодження Cr (VI)-вмісних промивних вод електрохімічних виробництв. Як реагент-осаджувач пропонується використовувати водний розчин барій (II) гідроксиду. Експериментально обґрунтовано температуру процесу очищення і надлишок реагенту-осаджувача для отримання залишкової концентрації Cr (VI) в очищеній воді на рівні значень ГДК та максимальної швидкості розширювання суспензії.

Ключові слова: стічні води, Cr (VI), реагентне знешкодження, температура, залишкова концентрація, очищена вода, швидкість розширювання.

Вступ. Серед найважливіших проблем у сфері захисту навколишнього середовища особливе місце займає охорона водного середовища від забруднень, найбільш небезпечними з яких є стічні води, що містять важкі та кольорові метали. Очищення стоків на багатьох підприємствах країни, як правило, є недосконалим, і очищена вода не відповідає вимогам міжнародних стандартів.

Процеси електрохімічного хромування супроводжуються утворенням стічних та промивних вод, що містять сполуки високо-токсичного Cr⁶⁺. Зростаючі викиди таких забруднень мають розміри серйозної загрози для екосистеми.

Разом з тим у виробничих стічних водах хром має значну цінність, а його вилучення та повторне використання у виробництві може дати значний економічний ефект. Крім того, при повторному використанні очищених вод значно скорочуються витрати на водоспоживання та водовідведення. Однак велика різноманітність складу хромвмісних стічних вод, великі капітальні та експлуатаційні витрати на комплекси водоочищення підприємств галузі створюють труднощі в організації технологічної схеми очищення стічних вод від іонів хрому. Скидання таких вод у поверхневі водні об'єкти, без попереднього очищення до норм ГДК, заборонено.

Нині універсальних прийомів очищення виробничих стоків від хрому не існує. Для очищення стоків використовуються різні методи: реагентні, електро- та гальванокоагуляційні, іонообмінні, електродіалізні, сорбційні, мембранне розділення, біологічні та ін. Кожен із цих методів має свої характерні переваги та недоліки.

Реагентний метод утилізації хромвмісних стічних вод полягає в переведенні іонів хрому (VI) в тривалентний стан і осадженні їх у вигляді нерозчинного продукту. Реагентний метод можна вважати двоступеневим, однак після одержання нерозчинних продуктів пульпа проходить ще декілька етапів обробки: відстоюється і фільтрується через фільтр-прес з отриманням осаду [1].

Метод в цілому є порівняно простим у реалізації, не вимагає спеціального обладнання. Він дає змогу працювати у великому діапазоні параметрів стоків (якісний і кількісний склад, рН тощо), що в умовах реального виробництва вельми зручно. Тому більшість великих машинобудівних заводів використовують саме цей метод очищення стічних вод.

Проте наявні недоліки реагентного методу суттєво знижують його ефективність. Так, осад, що утворюється, відзначається не тільки складним складом, але й аморфною гелевою структурою [2]. У такому вигляді їх фільтрація та сушіння становлять істотну тех-

нічну й економічну проблему для підприємств.

Однак, незважаючи на перелічені недоліки, реагентний метод знешкодження стічних вод, що містять хром (VI), не втратив своєї актуальності. Так, наприклад, якщо як осаджувач використовувати водні розчини сполук Ba^{2+} ($Ba(OH)_2$, $BaCl_2$, $Ba(NO_3)_2$ та інші водорозчинні сполуки) або сполук Pb^{2+} ($Pb(CH_3COO)_2$, $PbCl_2$, $Pb(NO_3)_2$ та ін.), то в результаті реакцій отримаємо важкорозчинні хромати барію або свинцю [3].

Іонообмінні методи очищення дають можливість проводити очищення відпрацьованих розчинів від іонів хрому (III) та хрому (VI), дають можливість вести обробку великих об'ємів розчинів (до сотень $m^3/год.$), вимагають порівняно невеликої витрати електроенергії, є можливість повної автоматизації процесу. У той же час іонообмінні методи мають істотні недоліки: вимагають попередньої реагентної обробки відпрацьованих розчинів з метою поділу змішаних стоків і потребують значних витрат на придбання іонітів. Існує також проблема елюатів, які мають бути додатково перероблені в утилізовані речовини. Без вирішення проблеми утилізації елюатів іонообмінне очищення призводить до збільшення майже в три рази сумарної кількості солевих скидів [2].

З метою запобігання утворенню змішаних осадів застосовують сорбційне очищення відпрацьованих розчинів від іонів хрому. Сорбційні методи є високоефективними і найбільш екологічно чистими. Основними параметрами вибору матеріалу для використання цього методу є сорбційні якості, пористість та економічність. Як сорбенти для знешкодження відпрацьованих хромовмісних розчинів знаходять використання вуглецеві сорбенти [4, 5, 6], сполуки заліза [7], різні природні біоматеріали.

До переваг адсорбційного методу слід віднести: очищення до вимог ГДК; можливість рекуперації речовин, що сорбуються; після коригування рН є можливість повернення очищеної води у виробництво. Однак метод не позбавлений і недоліків, до яких можна віднести: невисоку продуктивність сорбційних установок; природні сорбенти застосовні для обмеженого кола домішок та їх концентрацій; громіздкість устаткування; обмеження роботи матеріалів за областями рН вихідної води; складність регенерації [8].

Електрохімічні методи нейтралізації або регенерації хромовмісних стоків поділяються на: електроліз без діафрагми і мембранний електроліз з однією або декількома мембранами; електрокоагуляцію і гальванокоагуляцію; електрофлокуляцію; електрофлотацію [2].

Суть електрохімічних методів, в яких хром бере участь у реакціях на електродах, полягає, в першу чергу, в деактивації шестивалентного хрому шляхом відновлення його на катоді до тривалентного стану. Для того щоб на аноді не відбувалося зворотної реакції окиснення, можуть застосовуватися мембрани і діафрагми.

Перевагами електролітичного методу відновлення хрому (зокрема, із застосуванням діафрагм) є швидкість і повнота відновлення. Однак процес вимагає точного дотримання параметрів стоків, що надходять на очищення, чого в реальних виробничих умовах домогтися дуже складно. Крім цього, до складу стоків можуть входити сторонні іони, які заважають процесу відновлення. Осадів під час електролізу не утворюється. Незважаючи на всі переваги, електрохімічне відновлення нечасто застосовується у реальних гальванічних виробництвах через складність обладнання і загальну дорожнечу процесу.

Електро- і гальванокоагуляційний методи використовуються, в основному, для очищення хромовмісних стоків від іонів $Cr(VI)$. В обох методах спочатку проводять розчинення заліза, далі іони Fe^{2+} , що утворилися, відновлюють Cr^{6+} до Cr^{3+} з подальшим утворенням $Cr(OH)_3$. Окрім залізних анодів, можливо використовувати й алюмінієві [9, 10].

Відмінність методів полягає у різній рушійній силі процесу розчинення металевого заліза, що і визначає особливості застосування електро- та гальванокоагуляційних апаратів [11].

Так, при експлуатації електрокоагуляторів спостерігається засмічення міжелектродного простору, що викликає необхідність у постійному прочищенні його скребками. При обслуговуванні гальванокоагуляторів необхідно постійно підтримувати співвідношення сталевих стружки і коксу або сталевих і мідної стружки. Також є незручності завантаження апарату та необхідність ретельної фільтрації розчину, що очищається, від дрібнодисперсної фази, яка містить оксиди заліза і частинки коксу [12].

Недоліками методів є використання великої кількості кислоти і лугу та утворення значної кількості осаду, який практично не утилізується. Він являє собою суміш гідроксидів заліза і хрому, в перерахунку на суху вагу – близько 10 кг на 1 кг хрому (III), що міститься у вихідному розчині [13].

В цілому слід зазначити, що всі електрохімічні методи досить дорогі в експлуатації, вимагають дорогого устаткування, кваліфікованого обслуговуючого персоналу і високої культури виробництва. Вузкий діапазон концентрацій забруднених стоків не дозволяє використовувати ці методи як універсальні для очищення хромовмісних стічних вод, відводячи їм роль лише для доочищення стоків.

Мембранні методи добре підходять для очищення низькоконцентрованих відпрацьованих розчинів, оскільки стоки високої концентрації дуже швидко виводять мембрани з ладу, причому якість очищення в цьому випадку виявляється невисокою. У реальних умовах, також як і при електрохімічних методах очищення, підтримувати точно задані параметри стоків складно. Мембранні методи добре виправдовують себе для регенерації компонентів відпрацьованих розчинів та деяких видів промивних вод після технологічних операцій. Однак ці методи є досить дорогими в експлуатації.

Мембранні технології використовують два типи мембран – напівпроникні мембрани, радіус пор яких менший, ніж радіус забруднюючих іонів або молекул, та іонообмінні, які спроможні пропускати іони певного знака [2].

Серед мембранних методів виділяють: мікрофільтрацію, ультрафільтрацію, нанофільтрацію, зворотний осмос, діаліз, електродіаліз, випаровування через мембрани [14]. Найбільшої ефективності й технологічності щодо виділення важких металів, зокрема хрому, дають змогу досягти наступні методи: зворотний осмос (гіперфільтрація), ультрафільтрація та електродіаліз.

Найбільшого поширення для очищення стічних вод від іонів хрому набули три основні типи матеріалів мембран: різновиди ацетату целюлози, поліамідний полімер і складні композиційні мембрани, які являють собою тонкі плівки поліаміду, що накладаються на пористі полімерні субстрати, наприклад полісульфон, полівенілфторид [15, 16, 17].

Ефективність очищення стічних вод від хрому зворотним осмосом та ультрафільтра-

цією становить 94-95 %. Окрім цього, є можливість здійснювати очищення від комплексних іонів та створити зворотний цикл по воді (майже 60 % очищеної води можливо повернути у виробництво).

До недоліків методів можна віднести:

- відпрацьовані розчини потребують попередньої фільтрації,

- мембрани є досить дефіцитними, чутливими до зміни технологічних характеристик відпрацьованих розчинів, що подаються на очищення, та мають значну вартість,

- є складнощі в експлуатації обладнання та висуваються високі вимоги до його герметичності [13].

Біологічні методи очищення знаходять все більш широке застосування завдяки таким важливим факторам, як низька витрата енергії, відсутність вторинного забруднення води, відносно невисокі експлуатаційні витрати, здатність забезпечувати жорсткі нормативи умов скидання [18].

Біологічний метод є альтернативою використанню хімічних реагентів. В його основі лежить самоочищення водою і здатність рослин і мікроорганізмів накопичувати важкі метали.

Висока аккумулятивна здатність мікроростових відносно важких металів створює перспективи їх використання при очищенні стічних вод. Існуючий досвід у біотехнології показує, що ефективність акумулювання досягає 95 % [19].

До бактерій, що здатні відновлювати Cr^{6+} до Cr^{3+} , відносяться бактерії родів *Pseudomonas*, *Aeromonas* і *Escherichia*. Вони здатні переносити концентрацію іонів Cr^{6+} вище 200 мг/л, при цьому час відновлення становить 1-3 доби, який зростає до 20 і 60 діб при збільшенні початкової концентрації сполук хрому відповідно до 350 і 500 мг/л [20].

Загальними недоліками біологічних методів знешкодження відпрацьованих розчинів від іонів хрому (VI) є чутливість мікроорганізмів до зміни складу стічних вод і підвищення концентрації токсичних компонентів; значні займані площі; недостатній ефект очищення; тривалість технологічного процесу. Також після очищення всередині біомаси накопичується хром, який далі знову потрібно утилізувати, вже в формі біоматеріалу.

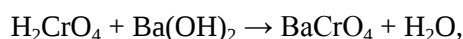
Таким чином, утилізацію відпрацьованих хромовмісних розчинів можна здійснювати багатьма способами. Одним із найбільш прий-

нятих слід вважати реагентний метод. В роботі [11] показано, що реагентний метод знешкодження стічних вод, що містять Cr (VI), незважаючи на такі явні недоліки, як необхідність використання товарних реактивів та складність досягнення залишкової концентрації Cr^{6+} на рівні нормативів ГДК, не втратив своєї актуальності.

На підставі проведених нами попередніх досліджень запропонований як осаджувач водний розчин барій (II) гідроксиду (баритова вода) [3]. Однак малодослідженими є питання впливу температури і надлишку осаджувача на властивості одержуваної суспензії і залишкову концентрацію Cr^{6+} в очищених розчинах.

Метою роботи є визначення оптимального температурного режиму та надлишку осаджувача в рамках розробки технології знешкодження Cr (VI)-вмісних промивних вод електрохімічних виробництв.

Методика експерименту. У термостатований циліндричний реактор заливався розчин H_2CrO_4 з концентрацією 90 мг/л, який моделює типові промивні води після операції промивання виробів, підданих електрохімічному хромуванню. Після досягнення заданої температури, яку підтримували на рівні 20, 30, 40, 50 і 60 °C (точність регулювання – $\pm 0,5$ °C), в реактор при перемішуванні зі швидкістю ≈ 2 об/с дозували насичений при 20 °C водний розчин $\text{Ba}(\text{OH})_2$, попередньо нагрітий до температури експерименту. Дозування розчину здійснювали після попереднього розрахунку, виходячи з отримання осаду барій (II) хромату за нерівноважною реакцією



виходячи з мольного співвідношення $A = \frac{\text{Ba}^{2+}}{\text{Cr}^{6+}} = 1,0; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,7$ і 2,0.

Кожну з суспензій витримували при заданій температурі і перемішуванні протягом 30 хв, після чого перемішування зупиняли, і в умовах природного охолодження відбувалося розшарування суспензії, яка утворилася. В освітленій частині суспензії визначали залишкову концентрацію Cr (VI) і pH середовища.

Для визначення вмісту іонів Cr^{6+} використовувалися відомі титриметричні методики [21], для визначення малих концентрацій – спектрофотометр DR 1900 і методичні рекомендації до нього.

pH середовища визначали за допомогою приладу Eutech CyberScan pH-метр 700 pH/mV, забезпеченого pH-електродом ECFC7252101B.

Швидкість розшарування суспензій визначали за методикою, запропонованою в [22].

Для приготування робочих розчинів використовували хромовий ангідрид кваліфікації «Ч» за ГОСТ 3776-78 і барій (II) гідроокис кваліфікації «Ч» за ГОСТ 4107-78.

Результати та їх обговорення. Результати впливу мольного співвідношення A на ступінь очищення розчину від Cr^{6+} зображено на рисунку 1.

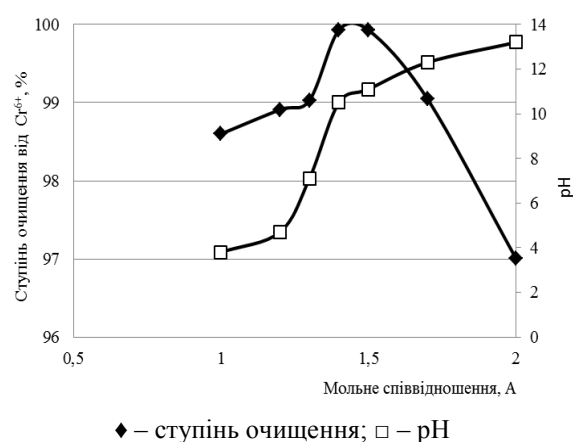


Рисунок 1 – Вплив співвідношення A на ступінь очищення розчину від Cr^{6+} при $T = 20$ °C

Дані, зображені на рисунку 1, показують, що найбільший ступінь очищення 99,93 % досягається при $A = 1,4 \div 1,5$. Екстремальний характер кривої пояснюється тим, що збільшення співвідношення A від 1 до $1,4 \div 1,5$ призводить до збільшення концентрації іонів Ba^{2+} в розчині і пропорційного зниження концентрації іонів Cr^{6+} відповідно до закону добутка розчинності $[\text{Ba}^{2+}] \cdot [\text{CrO}_4^{2-}] = DP_{\text{BaCrO}_4}$. Подальше збільшення співвідношення A призводить до збільшення іонної сили розчину, що призводить до зв'язування аніона в комплекс ізополікислоти $\{\text{H}_2[\text{CrO}_4 (\text{CrO}_3)]\}$, до утворення якої має велику схильність хром [23].

Результати дослідження впливу температури на залишкову концентрацію хрому та швидкість розшарування суспензії зображено на рисунку 2.

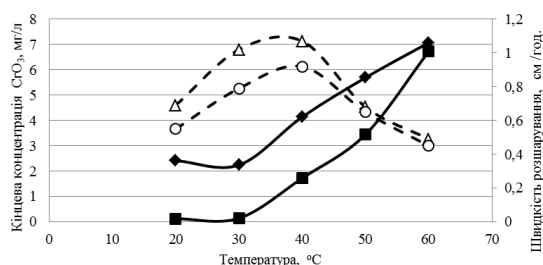


Рисунок 2 – Вплив температури на залишкову концентрацію CrO_3 і швидкість розширення суспензій C_{CrO_3} при $A = \diamond - 1$; $\blacksquare - 1,4$.

Швидкість розширення при $A = \circ - 1$; $\Delta - 1,4$

Аналіз наведених даних показує, що найменші залишкові концентрації CrO_3 в розчині ($\approx 0,12$ мг/л) отримані при температурі $20 \div 30$ °C. Найбільша швидкість розширення суспензій $1,02 \div 1,07$ ($A = 1,4$) і $0,79 \div 0,92$ ($A = 1$) см/год. досягається при $T = 30 \div 40$ °C.

Висновки. Показано, що при реагентному очищенні розчинів від Cr^{6+} з використанням як реагенту-осаджувача водного розчину $\text{Ba}(\text{OH})_2$ найменші значення залишкових концентрацій CrO_3 в очищеному розчині, близькі до значень ГДК для поверхневих вододім, отримані при температурі $20 \div 30$ °C і надлишку осаджувача $40 \div 50$ % від стехіометрично необхідної кількості для отримання важкорозчинної солі BaCrO_4 . З урахуванням того, що найбільші швидкості розширення суспензій спостерігаються в інтервалі температур $30 \div 50$ °C, найбільш оптимальним режимом проведення процесу очищення розчинів від сполук Cr^{6+} слід вважати температуру $25 \div 35$ °C і надлишок осаджувача $40 \div 50$ %.

Список літератури

- [1] Ю. П. Перельгин, О. В. Зорькина, И. В. Рашевская и др., *Реагентная очистка сточных вод и утилизация отработанных растворов и осадков гальванических производств*: учеб. пособ. Пенза: Изд-во ПГУ, 2013.
- [2] С. С. Виноградов, *Экологически безопасное гальваническое производство*; под ред. проф. В. Н. Кудрявцева; 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Глобус, 2002.
- [3] М. М. Шорохов, М. А. Ожередова, та О. В. Суворін, "Вплив типу осаджувача на ефективність очищення Cr^{6+} -вмісних стічних вод промислових підприємств", *Perspectives of science and education: Proc. 3rd Int. Youth Conf. SLOVO\WORD*, New York, USA, 2018, pp. 235-244.
- [4] R. A. Khaydarov, R. R. Khaydarov, and O. O. Gapurova, "Water purification from metal ion using carbon nanoparticle-conjugated polymer nanocomposites", *Water Research*, vol. 44, no. 6, pp. 1927-1933, 2010.
- [5] M. Vukčević et al., "Carbon materials from waste shot hemp fibers as a sorbent for heavy metal ions – Mathematical modeling of sorbent structure and ions transport", *Chemical Engineering Journal*, vol. 235, no. 1, pp. 284-292, 2014.
- [6] C. Jung et al., "Hexavalent chromium removal by various adsorbents: Powdered activated carbon, chitosan, and single/multi-walled carbon", *Separation and Purification Technology*, vol. 106, pp. 63-71, 2013.
- [7] А. М. Сапсенов, А. К. Казбекова, Н. А. Усенова, и У. А. Есенгулов, "Очистка сточных вод от ионов хрома (III) на фосфате железа (III)", *Геология, география и глобальная энергия*, № 4, с. 97-101, 2010.
- [8] К. Л. Тимофеев, и Л. Ф. Акулич, "Сорбционное извлечение тяжелых металлов из техногенных стоков", *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*, № 11, с. 26-30, 2012.
- [9] E. Bazrafshan, H. Mahvi, S. Naseri, and A. Mesdaghinia, "Performance evaluation of electrocoagulation process for removal of chromium (VI) from synthetic chromium solutions using iron and aluminum electrodes", *Turk. J. Eng. Environ. Sci.*, vol. 32, pp. 59-66, 2008.
- [10] S. Hamdan, and M. H. El-Naas, "Characterization of the removal of Chromium (VI) from groundwater by electrocoagulation", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 20, pp. 2775-2781, 2014.
- [11] С. С. Виноградов, и С. С. Кругликов, "О положительных и отрицательных сторонах электро- и гальванокоагуляционных методов очистки сточных вод", *Гальванотехника и обработка поверхности*, т. 16, № 1, с. 46-47, 2008.
- [12] M. S. Bhatti, A. S. Reddy, and A. K. Thukral "Electrocoagulation removal of Cr (VI) from simulated wastewater using response surface methodology", *Hazard. Mater.*, vol. 172, pp. 839-846, 2009.

- [13] Ю. П. Хранилов, *Экология и гальванотехника: проблемы и решения*. Киров: ВятГТУ, 2000.
- [14] А. Ю. Токарь, "Мембранные процессы разделения", *Международный научно-исследовательский журнал*, № 1, с. 94-96, 2014.
- [15] K. Kolomaznik, M. Barinova, and H. Vasikova, "Chromium VI issue in leather waste", *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 6, no. 5, pp. 447-455, 2012.
- [16] P. Kocurek, K. Kolomazník, and M. Bařinová, "Chromium removal from wastewater by reverse osmosis", *Wseas transactions on environment and development*, vol. 10, pp. 358-365, 2014.
- [17] Z. Kaili, W. Xiuju, Zhun, Lu Xingjie, W. Zhongpeng, and W. Ligu, "Preparation and characterization of modified polyvinylidene fluoride/2-amino-4-thiazoleacetic acid ultrafiltration membrane for purification of Cr(VI) in water", *Journal of chemical engineering of Japan*, vol. 51, pp. 501-506, 2018.
- [18] Д. А. Кривошеин, П. П. Кукин, и В. Л. Лапин, *Инженерная защита поверхностных вод от промышленных стоков*. Москва: Высшая школа, 2003.
- [19] Г. О. Горшкова, Т. В. Гудзенко, В. О. Иваннича, та О. В. Волювач, "Спосіб очищення води від хрому (VI) за присутністю мікроорганізмів", *ScienceRise: sci. journ.*, № 9, с. 57-60, 2015.
- [20] Б. Н. Ласкорин, Б. В. Громов, А. П. Цыганков, и В. Н. Сенин, *Проблемы развития безотходных производств*. Москва: Стройиздат, 2005.
- [21] Н. Ф. Клещев, Т. Д. Костыркина, Г. С. Бескова, и Е. Т. Моргунова, *Аналитический контроль в основной химической промышленности*. Москва: Химия, 1992.
- [22] Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, и Е. А. Амелина, *Коллоидная химия*. Москва: Высшая школа, 2004.
- [23] Chromium (VI) handbook / [written by Independent Environmental Technical Evaluation Group (IETEG)]; James A. Jacobs, Jacques Guertin, Cynthia Avakian, Eds. CRC Press, 2005.
- [2] S. S. Vinogradov, *Environmentally friendly galvanic production*, prof. V. N. Kudryavceva, Ed., 2nd ed. Moscow: Globus, 2002 [in Russian].
- [3] M. M. Shorohov, M. A. Ozheredova, and O. V. Suvorin, "Influence of the type of precipitator on the efficiency of purification of Cr⁶⁺-contaminated wastewater of industrial enterprises", *Perspectives of science and education: Proc. 3rd Int. Youth Conf. SLOVO\WORD*, New York, USA, 2018, pp. 235-244 [in Ukrainian].
- [4] R. A. Khaydarov, R. R. Khaydarov, and O. O. Gapurova, "Water purification from metal ion using carbon nanoparticle-conjugated polymer nanocomposites", *Water Research*, vol. 44, no. 6, pp. 1927-1933, 2010.
- [5] M. Vukčević et al., "Carbon materials from waste shot hemp fibers as a sorbent for heavy metal ions – Mathematical modeling of sorbent structure and ions transport", *Chemscat Engineering Journal*, vol. 235, no. 1, pp. 284-292, 2014.
- [6] C. Jung et al., "Hexavalent chromium removal by various adsorbents: Powdered activated carbon, chitosan, and single/multi-walled carbon", *Separation and Purification Technology*, vol. 106, pp. 63-71, 2013.
- [7] A. M. Sarsenov, A. K. Kazbekova, N. A. Usenova, and U. A. Esengulov, "Wastewater treatment of chromium (III) ions on iron (III) phosphate", *Geologiya, geografiya i globalnaya energiya*, no. 4, pp. 97-101, 2010 [in Russian].
- [8] K. L. Timofeev, and L. F. Akulich, "Sorption extraction of heavy metals from industrial wastes", *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*, no. 11, pp. 26-30, 2012 [in Russian].
- [9] E. Bazrafshan, H. Mahvi, S. Naseri, and A. Mesdaghinia, "Performance evaluation of electrocoagulation process for removal of chromium (VI) from synthetic chromium solutions using iron and aluminum electrodes", *Turk. J. Eng. Environ. Sci.*, vol. 32, pp. 59-66, 2008.
- [10] S. Hamdan, and M. H. El-Naas, "Characterization of the removal of Chromium (VI) from groundwater by electrocoagulation",

References

- [1] Yu. P. Perelygin, O. V. Zorkina, I. V. Rashesvskaya, et al., *Reagent wastewater*

- Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 20, pp. 2775-2781, 2014.
- [11] S. S. Vinogradov, and S. S. Kruglikov, "On the positive and negative aspects of electro- and galvanocoagulation methods of wastewater treatment", *Galvanotekhnika i obrabotka poverhnosti*, vol. 16, no. 1, pp. 46-47, 2008 [in Russian].
- [12] M. S. Bhatti, A. S. Reddy, and A. K. Thukral, "Electrocoagulation removal of Cr (VI) from simulated wastewater using response surface methodology", *Hazard. Mater.*, vol. 172, pp. 839-846, 2009.
- [13] Yu. P. Hranilov, *Ecology and electroplating: problems and solutions*. Kirov: VyatGTU, 2000 [in Russian].
- [14] A. Yu. Tokar, "Membrane separation processes", *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, no. 1, pp. 94-96, 2014 [in Russian].
- [15] K. Kolomaznik, M. Barinova, and H. Vasikova, "Chromium VI issue in leather waste", *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 6, no. 5, pp. 447-455, 2012.
- [16] P. Kocurek, K. Kolomazník, and M. Bařinová, "Chromium removal from wastewater by reverse osmosis", *Wseas transactions on environment and development*, vol. 10, pp. 358-365, 2014.
- [17] Z. Kaili, W. Xiuju, Zhun, Lu Xingjie, W. Zhongpeng, and W. Ligu, "Preparation and characterization of modified polyvinylidene fluoride/2-amino-4-thiazoleacetic acid ultrafiltration membrane for purification of Cr(VI) in water", *Journal of chemical engineering of Japan*, vol. 51, pp. 501-506, 2018.
- [18] D. A. Krivoshein, P. P. Kukin, and V. L. Lapin, *Engineering protection of surface waters from industrial effluents*. Moscow: Vysshaya shkola, 2003 [in Russian].
- [19] G. O. Gorshkova, T. V. Gudzenko, V. O. Ivanicya, and O. V. Volyuvach, "A method of purifying water from chromium (VI) in the presence of microorganisms", *ScienceRise: sci. journ.*, no. 9, pp. 57-60, 2015 [in Ukrainian].
- [20] B. N. Laskorin, B. V. Gromov, A. P. Cyganov, and V. N. Senin, *Problems of development of non-waste production*. Moscow: Strojizdat, 2005 [in Russian].
- [21] N. F. Kleshev, T. D. Kostyrkina, G. S. Beskova, and E. T. Morgunova, *Analytical control in the main chemical industry*. Moscow: Himiya, 1992 [in Russian].
- [22] E. D. Shukin, A. V. Percov, and E. A. Amelina, *Colloid chemistry*. Moscow: Vysshaya shkola, 2004 [in Russian].
- [23] Chromium (VI) handbook / [written by Independent Environmental Technical Evaluation Group (IETEG)]; James A. Jacobs, Jacques Guertin, Cynthia Avakian, Eds. CRC Press, 2005.

A. V. Suvorin, D. Tech. Sc., professor,

e-mail: avsuvorin@ukr.net

M. N. Shorokhov, post-graduate student of the Department of Chemical Engineering and Ecology,

e-mail: teplopribors@i.ua

M. A. Ozheredova, Ph. D., associate professor,

e-mail: ozheredovama@ukr.net

E. I. Zubtsov, Ph. D., associate professor

e-mail: mining_07@i.ua

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

Severodonetsk, Ukraine

HIGH-EFFECTIVE TECHNOLOGY FOR THE NEUTRALIZATION OF Cr (VI)-CONTAINING WASHWATER OF ELECTROCHEMICAL PLANTS

The protection of aquatic environment from pollutions, the most dangerous of which is wastewater containing heavy and non-ferrous metals is one of the most important environmental issues.

The processes of electrochemical chromium plating are accompanied by the formation of sewage and washwater containing compounds of highly toxic Cr^{6+} .

However, chromium is of great value in industrial wastewater, and its extraction and reuse in manufacturing can have a significant economic impact.

The discharge of such water into surface water bodies without prior purification to the maximum permissible concentrations is prohibited.

At present, there are no universal methods of cleaning industrial wastewater from chromium. Various methods, such as: reagent, electro- and galvano-coagulation, ion-exchange, electrodialysis, sorption, membrane separation, biological ones, etc. are used for wastewater treatment. Each of these methods has its own advantages and disadvantages. The analysis of existing methods for the neutralization of chrome-containing spent solutions is described.

The work is devoted to the development of technology for the neutralization of Cr (VI)-containing washwater of electrochemical plants. Aqueous solution of barium (II) hydroxide as a precipitating reagent is proposed to be used. The temperature of the purification process and the excess reagent-precipitator to obtain a residual concentration of Cr (VI) in purified water at the level of MPC and the maximum rate of delamination of the suspension are experimentally substantiated.

Considering that the highest rates of suspension separation are observed in the temperature range 30÷50 °C, the temperature 25÷35 °C and the excess of precipitant 40÷50 % should be considered the most optimal regime for the process of purification of solutions from Cr⁶⁺ compounds.

Keywords: wastewater, Cr (VI), reagent neutralization, temperature, residual concentration, purified water, rate of separation

УДК 661.531

[0000-0002-1753-416X] **А. Л. Концевой, к.т.н., доцент,**
e-mail: kontsev@xtf.kpi.ua

[0000-0002-4523-2273] **С. А. Концевой, к.т.н., доцент**
e-mail: serkon157@ukr.net

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ДВОПОТОКОВОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ РОЗЧИНУ МОНОЕТАНОЛАМІНУ

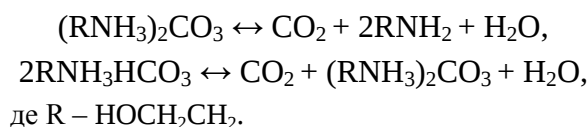
Надано алгоритм розрахунку матеріального і теплового балансів регенерації відпрацьованого розчину в середовищі Excel з варіюванням концентраційних параметрів по розчину.

Апроксимовано залежності рівноважного парціального тиску CO₂ над 20 %-ним розчином моноетаноламіну залежно від ступеня карбонізації та температури регенерації. Числовим інтегруванням розраховано двосекційний тарілчастий регенератор.

Ключові слова: технологічний газ, оксид карбону (IV), моноетаноламін, кінетика і термодинаміка десорбції, тарілчастий десорбер.

Вступ. Важливою стадією виробництва аміаку є очищення технологічного газу від оксиду карбону (IV) абсорбційними методами, насамперед, розчином моноетаноламіну або активованим гарячим розчином поташу. Особливості хімізму, апаратурного оформлення і показники очищення наведено в роботах [1-3]. Результати моделювання очищення газу активованим розчином метилдіетаноламіну нами надано в статтях [4, 5].

Високопродуктивні схеми виробництва аміаку використовують двопотокове очищення газу від CO₂ розчином моноетаноламіну (МЕА) з регенерацією відпрацьованого розчину у двох паралельно працюючих регенераторах-рекуператорах, з яких відводяться на абсорбцію два потоки – тонко і грубо регенованого розчинів [6-8]. Стаття є логічним продовженням запропонованого нами алгоритму розрахунку абсорбційного очищення технологічного газу [9]. Регенерація відпрацьованого розчину МЕА базується на перебігу наступних реакцій:



Карбонат і гідрокарбонат моноетаноламонію при підвищенні температури і зменшенні тиску легко дисоціюються, що дає змогу проводити глибоку регенерацію поглинального розчину.

Мета роботи: виконання матеріальних, теплових і конструктивних розрахунків за власним алгоритмом з його реалізацією в се-

редовищі Excel. Змінними параметрами, що впливають на технологічний режим, є температура, тиск, ступінь карбонізації розчину у різних точках десорбера.

Вихідні дані. Для двопотокової схеми очищення розраховано матеріальні, теплові баланси десорбції та тарілчастий десорбер з наступними вихідними даними. Продуктивність за аміаком – 1360 т/добу. Температура газу на виході із сепаратора $t = 40^\circ\text{C}$; тиск насиченої пари при $t = 40^\circ\text{C}$ $P_2^* = 0,07245$ атм; тиск на виході із сепаратора $P_2 = 1,7$ атм. Температура газу на виході з регенератора $t = 70^\circ\text{C}$; тиск насиченої пари при $t = 70^\circ\text{C}$ $P_3^* = 0,3$ атм; тиск на виході з регенератора $P_3 = 1,7$ атм.

Результати. Матеріальний баланс. Склад сухого газу на виході із сепаратора, в який він надходить з верхньої частини регенератора, визначається за даними матеріального балансу абсорбції [9] (таблиця 1): всі розчинені компоненти десорбуються при регенерації (враховується факт того, що частина CO₂ завжди залишається у розчині з відповідним ступенем карбонізації). Вологість газу на виході із сепаратора, частка:

$$N_2 = P_2^*/P_2 = V_2/(V_2 + V_g);$$

$$N_2 = 0,07245/1,7 = 0,0426,$$

звідки при відомому значенні витрати сухого газу ($V_g = 36211,47$ м³/год.) визначаємо витрату водяної пари на виході з сепаратора, м³/год. (таблиця 2):

$$V_2 = V_g \cdot N_2/(1 - N_2), V_2 = 1611,95.$$

Таблиця 1 – Склад сухого газу на виході із сепаратора

Компонент	нм ³ /год.	% об.	кг/год.	% мас.
H ₂	380,03	1,05	33,93	0,048
N ₂	76,89	0,21	96,12	0,137
CO ₂	35746,05	98,71	70212,56	99,801
CO	3,08	0,01	3,85	0,005
Ar	2,41	0,01	4,30	0,006
CH ₄	3,00	0,01	2,15	0,003
Всього	36211,47	100,00	70352,91	100,00

Таблиця 2 – Склад вологого газу на виході із сепаратора

Компонент:	м ³ /год.	% об.	кг/год.	% мас.
H ₂	380,03	1,00	33,93	0,047
N ₂	76,89	0,20	96,12	0,134
CO ₂	35746,05	94,51	70212,56	97,996
CO	3,08	0,01	3,85	0,005
Ar	2,41	0,01	4,30	0,006
CH ₄	3,00	0,01	2,15	0,003
H ₂ O	1611,95	4,26	1295,31	1,808
Всього:	37823,42	100,00	71648,22	100,00

Відносна вологість газу на виході з регенератора, частка:

$$N_3 = P_3^*/P_3 = V_3/(V_3 + V_g);$$

$$N_3 = 0,3/1,7 = 0,1765,$$

звідки визначаємо витрату води на підживлення для компенсації виносу водяної пари, м³/год:

$$V_3 = V_g \cdot N_3 / (1 - N_3),$$

$$V_3 = 7759,29.$$

Результати розрахунку надано у таблиці 3.

Об'єм (м³/год. водяної пари) та маса (кг/год.) флегми, відповідно:

$$V(H_2O) = V_3 - V_2;$$

$$V(H_2O) = 7759,29 - 1611,95 = 6147,34.$$

$$m_{\text{флегми}} = m_3 - m_2;$$

$$m_{\text{флегми}} = 6235,14 - 1295,31 = 4939,83.$$

Таблиця 3 – Склад вологого газу на виході з регенератора

Компонент:	м ³ /год.	% об.	кг/год.	% мас.
H ₂	380,04	0,864	33,93	0,044
N ₂	76,90	0,175	96,12	0,126
CO ₂	35744,57	81,294	70212,56	91,676
CO	3,08	0,007	3,85	0,005
Ar	2,41	0,005	4,30	0,006
CH ₄	3,00	0,007	2,15	0,003
H ₂ O	7759,29	17,647	6235,14	8,141
Всього:	43969,29	100	76588,0468	100

Тепловий баланс. Підігрів розчину проводять за рахунок теплоти неочищеного конвертованого газу, що подається у кип'ятильники МЕА. Мета розрахунку полягає у визначенні теплоти $Q_{\text{кг}}$, що надходить з конвертованим газом. Вихідні дані: витрати,

кг/год., відпрацьованого розчину у регенератор $m(\text{МЕА})_{\text{р-ну}} = 1193713$ [9, таблиця 5]; витрата двох потоків розчину з регенератора $m(\text{МЕА})_{\text{р-ну}}^* = L_2 + L = 1123717,1$ [9]; теплоємність розчину МЕА на вході $Cr_{\text{вх}} = 4,304$ кДж/(кг·°C); теплоємність розчи-

ну МЕА на виході $C_{p_{\text{вих}}} = 4$ кДж/(кг·°C); теплоємність вологого газу на виході з регенератора $C_{p_3} = 35$ кДж/(кмоль·°C); температура відпрацьованого розчину МЕА на вході в регенератор $t_{\text{вх}} = 62.2$ °C; температура регенованих розчинів МЕА і вологого газу на виході з регенератора, °C, $t_{\text{вих}} = 70$; температура конденсату (флегми) на виході сепаратора, °C, $t_4 = 40$; теплота десорбції CO_2 , кДж/кг CO_2 , $Q_{\text{CO}_2} = 1507$; теплота випаровування води в регенераторі, кДж/кг, $Q_{\text{вип}} = 2200$; втрати теплоти, частка, $W_{\text{втр}} = 0,05$.

Рівняння теплового балансу:

$$Q_1 + Q_4 + Q_{\text{кг}} = Q_3 + Q_5 + Q_6 + Q_{\text{втр}}.$$

Основними статтями приходу теплового балансу є:

– теплота, що вноситься з розчином МЕА, кДж/год:

$$Q_1 = m(\text{МЕА})_{\text{р-ну}} \cdot t_{\text{вх}} \cdot C_{p_{\text{вх}}};$$

$$Q_1 = 1193713 \cdot 62.2 \cdot 4,304 = 319567475;$$

– теплота конденсату (флегми), кДж/год:

$$Q_4 = m_{\text{флегми}} \cdot t_4 \cdot C_{p_{\text{води}}};$$

$$Q_4 = 5761,32 \cdot 40 \cdot 4,19 = 965597,$$

де $C_{p_{\text{води}}}$ – середня теплоємність води, кДж/(кг·°C): $C_{p_{\text{води}}} = 4,19$;

– теплота, що вноситься з теплоносієм (конвертованим газом), кДж/год:

$$Q_{\text{кг}} = (Q_3 + Q_5 + Q_6 - (1 - W_{\text{втр}}) \cdot Q_1 - (1 - W_{\text{втр}}) \cdot Q_4) / (1 - W_{\text{втр}}). \quad (1)$$

Основними статтями витрат теплового балансу є:

– теплота, що виноситься вологим газом з регенератора, кДж/год:

$$Q_3 = \Sigma V \cdot t_{\text{вих}} \cdot C_{p_3} / 22,4;$$

$$Q_3 = 44993,06 \cdot 70 \cdot 35 / 22,4 = 4921116;$$

– теплота реакції десорбції і випаровування, кДж/год:

$$Q_5 = Q_{\text{CO}_2} \cdot m(\text{CO}_2)_{\text{дес}} + Q_{\text{вип}} \cdot m_{\text{пари}};$$

$$Q_5 = 1507 \cdot 70212,56 + 2200 \cdot 7056,63 = 121334921;$$

– теплота, що виноситься регенованим розчином МЕА (прийнято, що при однаковій температурі тонко- і грубо регенований розчини мають приблизно ту саму теплоємність), кДж/год:

$$Q_6 = m(\text{МЕА})_{\text{р-ну}}^* \cdot t_{\text{вих}} \cdot C_{p_{\text{вих}}};$$

$$Q_6 = 1123717,1 \cdot 70 \cdot 4 = 314660369.$$

Отже, з рівняння (1):

$$Q_{\text{кг}} = 143589461 \text{ кДж/год.}$$

Втрати теплоти у доквілля, кДж/год:

$$Q_{\text{втр}} = (Q_1 + Q_4 + Q_{\text{кг}}) \cdot W_{\text{втр}} = 23206126,6.$$

Питома витрата теплоти на 1 м³ CO_2 , МДж/м³ CO_2 :

$$q_{\text{пит}} = Q_{\text{кг}} / (V(\text{CO}_2)_{\text{дес}} \cdot 1000);$$

$$q_{\text{пит}} = 143589461 / (35746,05 \cdot 1000) = 4,02.$$

Питома витрата теплоти на 1 т аміаку, МДж/т:

$$q_{\text{пит}}^* = 143589461 / 56,67 = 2533,8.$$

Порівняємо отримані дані за питомою витратою теплоти з літературними. Згідно з [1] ці витрати становлять 5,4 і 4,4 МДж/м³ CO_2 для багатопотокової схеми і схеми з регенератором-рекуператором, відповідно. Питомі витрати теплоти на 1 т аміаку дорівнюють 2976 МДж/т [5]. Таким чином, розрахункові дані мають однаковий порядок з промисловими.

Кінетичний розрахунок регенератора.

Розрахунок тарілчастого десорбера базується на обробці рівноважних і практичних даних з визначенням кількості теоретичних тарілок N_t числовим інтегруванням виразу

$$N_t = \int dP / (P^* - P),$$

де P і P^* – робочий і рівноважний тиск CO_2 , кПа. Табличні довідкові значення рівноважного тиску CO_2 над 20 %-ним розчином МЕА залежно від температури розчину T та ступеня карбонізації α [10] апроксимовані нами наступним чином. Для більшої точності апроксимації розбиваємо довідкові дані на дві ділянки за ступенем карбонізації. В результаті було отримані рівняння регресії для розрахунку P^* , кПа:

для $\alpha > 0,42$

$$P^* = \exp(25,85696 - 5292,15/T + 8,977071 \cdot \ln(\alpha) - 2,98796 \cdot \alpha^2), \quad (2)$$

при цьому середнє відхилення розрахункових даних від табличних становить 9,8 %;

для $\alpha < 0,42$

$$P^* = \exp(30,06715 - 9904,45/T + 2,024316 \cdot \ln(\alpha) + 7,52984 \cdot \alpha^2), \quad (3)$$

середнє відхилення розрахункових даних від табличних становить 4,76 %.

Парціальний тиск CO_2 у верхній частині регенератора, кПа:

$$P^B = P_3 \cdot N(\text{CO}_2) \cdot 101325 / 1000 / 100;$$

$$P^B = 1,7 \cdot 81,294 \cdot 101325 / 1000 / 100 = 140,032,$$

де $N(\text{CO}_2)$ – вміст CO_2 у вологому газі на виході з регенератора (з верхньої тарілки), % об., $N(\text{CO}_2) = 81,294$ (див. таблицю 3).

2. Коефіцієнт перерахунку рівноважного тиску у робочий:

$$K_{\text{пер}} = P^B/P^B_r;$$

$$K_{\text{пер}} = 140,032/242,63 = 0,5771,$$

де $P^B_r = 242,631$ – розрахункове значення рівноважного тиску CO_2 над розчином МЕА за рівнянням (2) при ступені карбонізації $\alpha_1 = 0,67$ кмоль CO_2 /кмоль МЕА і температурі на верхній тарілці 343 К. Зауважимо, що саме для верхньої тарілки відомі і рівноважні, і робочі парціальні тиски CO_2 над розчином МЕА. Завдяки коефіцієнту $K_{\text{пер}}$ буде здійснюватися розрахунок робочого парціального тиску на інших тарілках. Звісно, це певне наближення, але, при відсутності даних з концентрації CO_2 у парогазовій суміші по висоті регенератора, нами прийнято саме таке рішення.

Вихідні дані. Тиск вологого газу на виході з регенератора $P_3 = 1,7$ атм. Ступінь карбонізації розчину МЕА, кмоль/кмоль МЕА: відпрацьованого розчину на вході у регенератор $\alpha_0 = 0,67$; грубо регенерованого розчину $\alpha_1 = 0,35$; тонко регенерованого розчину $\alpha_2 = 0,1$. Температура: на верхній тарілці $T_0 = 343$ К (за рахунок нагріву відпрацьованого розчину після вводу у регенератор з 335,2 К); виводу грубо регенерованого розчину $T_1 = 388$ К; виводу тонко регенерованого розчину $T_2 = 398$ К (обидва потоки подаються на рекуперацію теплоти у верхню частину регенератора). Кількість кроків інтегрування $n = 100$.

Покроковий алгоритм розрахунку. Зміна ступеня карбонізації на один крок інтегрування

$$d\alpha = (\alpha_0 - \alpha_2)/n = (0,67 - 0,1)/100 = 0,0057.$$

Зміна температури розчину МЕА на один крок інтегрування (від $\alpha_0 = 0,67$ до $\alpha_1 = 0,35$ досягається на 56-му кроці інтегрування)

$$dT = (T_1 - T_0)/56 = (388 - 343)/56 = 0,8036.$$

Зміна температури розчину МЕА у нижній частині регенератора на один крок інтегрування (від $\alpha_1 = 0,35$ до $\alpha_2 = 0,1$ досягається на 100-му кроці інтегрування)

$$dT = (T_2 - T_1)/43 = (398 - 388)/(100 - 56) = 0,2273.$$

Температура розчину МЕА, К, $T_i = T_{i-1} + dT$.

Ступінь карбонізації розчину МЕА, кмоль/кмоль МЕА, $\alpha_i = \alpha_{i-1} + d\alpha$.

Рівноважний тиск CO_2 над розчином МЕА P^*_i у регенераторі від $\alpha_0 = 0,67$ до $\alpha = 0,42$ визначається за рівнянням (2), а від $\alpha = 0,42$ до $\alpha_2 = 0,1$ – за рівнянням (3).

Тиск CO_2 над розчином МЕА, кПа,

$$P_i = K_{\text{пер}} \cdot P^*_i.$$

Крок інтегрування за парціальним тиском CO_2 $\Delta P_i = (P_{i-1} - P_i)$.

Необхідна кількість теоретичних тарілок на один крок інтегрування

$$Nt_i = \Delta P/(P^*_i - P_i).$$

Коефіцієнт корисної дії тарілки регенератора залежно від ступеня карбонізації за даними [6], частка:

$$\eta_i = (7,48 + 57,49 \cdot \alpha_i - 31 \cdot \alpha_i^2)/100.$$

Враховуючи ККД тарілки, необхідна кількість тарілок на один крок інтегрування

$$Npr_i = Nt_i/\eta_i.$$

Практична кількість тарілок

$$Npr = \sum Npr_i.$$

За даними таблиці 4 кількість тарілок у верхній частині регенератора становить $Npr = 10,67$, у нижній – 22,55; загальна кількість дорівнює 33,22. У промисловості працюють регенератори-рекуператори, які мають 31 тарілку (22 тарілки у верхній частині і 9 тарілок у нижній). Для гарантованої якості регенерації використовують два апарати. Розбіжність розподілу тарілок між верхньою і нижньою частинами регенератора за нашим алгоритмом і промисловими даними може бути пояснена припущенням про лінійний профіль температур по висоті верхньої частини апарату (одночасна регенерація розчину і рекуперація теплоти) і застосуванням коефіцієнта $K_{\text{пер}}$ однаковим для обох частин регенератора. Зауважимо також, що у нижню частину надходить половина всього розчину МЕА, що в кінетичному розрахунку не враховується.

Висновки. Використання запропонованого методу розрахунку буде корисним для багатоваріантного аналізу роботи діючих виробництв, а також для студентів при навчальному проектуванні процесу регенерації відпрацьованого розчину МЕА. Алгоритм може бути легко перероблений для розрахунку більш простої однопотокової регенерації, яка розповсюджена на заводах зв'язаного азоту України.

Таблиця 4 – Розрахунок тарілчастого десорбера (фрагмент)

№	α	T	P*	P	ΔP	Nt	η	Npr
0	0,6700	343,000	242,629	140,032				
1	0,6643	343,804	238,322	134,417	2,429	0,025	0,3199	0,077
2	0,6586	344,607	233,852	131,896	2,521	0,026	0,3189	0,082
54	0,362	386,393	28,964	16,717	0,160	0,013	0,2424	0,054
55	0,356	387,196	28,683	16,554	0,162	0,013	0,2404	0,056
56	0,351	388,000	28,397	16,389	0,165	0,014	0,2383	0,058
					$\Sigma N_{\text{верх}}$	3,013		10,67
57	0,345	388,227	27,064	15,620	0,769	0,067	0,2363	0,285
58	0,339	388,455	25,792	14,885	0,735	0,067	0,2342	0,288
59	0,334	388,682	24,576	14,184	0,701	0,067	0,2321	0,291
98	0,111	397,545	2,234	1,290	0,131	0,138	0,1350	1,025
99	0,106	397,773	2,019	1,165	0,124	0,146	0,1321	1,103
100	0,100	398,000	1,814	1,047	0,118	0,154	0,1292	1,191
					$\Sigma N_{\text{нижн}}$	3,882		22,55

Список літератури

- [1] Т. А. Семенова, *Очистка технологических газов* / под ред. Т. А. Семеновой. Москва: Химия, 1977.
- [2] Ralph H. Weiland, Nathan A. Hatcher, and Jaime L. Nava, Post-combustion CO₂ capture with amino-acid salts. Optimized Gas Treating, Inc. Clarita, OK 74535, USA. [Online]. Available: https://www.protrete.com/files/publications/43/Manuscript_CO2_Capture_with_Amino_Acids.pdf
- [3] Аминовая очистка. Россия, 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gazsurf.com/ru/gazopererabotka/oborudovanie/modelnyj-ryad/item/aminovaya-ochistka>
- [4] А. Л. Концевой, Т. О. Лук'янчук, та С. А. Концевой, "Моделювання очищення газу від оксиду карбону (IV) розчином метилдіетаноламіну", *Інтернаука: міжнар. наук. журн.*, № 15 (55), с. 28-32, 2018.
- [5] А. Л. Концевой, Т. О. Лук'янчук, та С. А. Концевой, "Моделювання регенерації розчину метилдіетаноламіну". *Інтернаука: міжнар. наук. журн.*, № 16 (56), с. 32-36, 2018.
- [6] Э. Г. Вакк, Г. В. Шуклин, и И. Л. Лейтес, *Получение технологического газа для производства аммиака, метанола, водорода и высших углеводородов. Теоретические основы, технология, катализаторы, оборудование, системы управления: учеб. пособ.* Москва, 2011.

- [7] М. А. Янковський, І. М. Демиденко, Б. І. Мельников, О. Я. Лобойко, та Г. М. Корона. *Технологія аміаку*: навч. посіб. Дніпропетровськ: УДХТУ, 2004.
- [8] В. П. Семенов, *Производство аммиака* / под ред. В. П. Семенова. Москва: Химия, 1985.
- [9] А. Л. Концевой, та С. А. Концевой, "Моделювання двопотокового очищення газу від оксиду карбону (IV) розчином моноетаноламіну", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*, № 3, с. 68-75, 2019.
- [10] Справочник азотчика: Физико-химические свойства газов и жидкостей. Производство технологических газов. Очистка технологических газов. Синтез аммиака. 2-е изд., перераб., Москва: Химия, 1986.

References

- [1] T. A. Semenova, *Process gas cleaning*, T. A. Semenova, Ed. Moscow: Himiya, 1977. [in Russian].
- [2] Ralph H. Weiland, Nathan A. Hatcher, and Jaime L. Nava, Post-combustion CO₂ capture with amino-acid salts. Optimized Gas Treating, Inc. Clarita, OK 74535, USA. [Online]. Available: https://www.protrete.com/files/publications/43/Manuscript_CO2_Capture_with_Amino_Acids.pdf
- [3] Amine purification. Russia, 2017. [Online]. Available: <http://gazsurf.com/ru/>

- gazopererabotka/oborudovanie/modelnyj-ryad/item/aminovaya-ochistka/
- [4] A. L. Kontsevoi, T. O. Lukianchuk, and S. A. Kontsevoi, "Modeling of gas purification from carbon oxide (IV) with a solution of methyldiethanolamine", *Internauka: Int. sci. journ.*, no. 15 (55), pp. 28-32, 2018 [in Ukrainian].
- [5] A. L. Kontsevoi, T. O. Lukianchuk, and S. A. Kontsevoi, "Modeling of regeneration of methyldiethanolamine solution", *Internauka: Int. Sci. Journ.*, no. 16 (56), pp. 32-36, 2018 [in Ukrainian].
- [6] E. G. Vakk, G. V. Shuklin, and I. L. Leytes, *Production of process gas for the production of ammonia, methanol, hydrogen and higher hydrocarbons. Theoretical foundations, technology, catalysts, equipment, control systems: textbook*. Moscow, 2011 [in Russian].
- [7] M. A. Yankovskyi, I. M. Demydenko, B. I. Melnykov, O. Ya. Loboiko, and H. M. Korona, *Ammonia technology: textbook*. Dnipropetrovsk: UDKhTU, 2004. [in Ukrainian].
- [8] V. P. Semenov, *Ammonia production*, V. P. Semenova, Ed. Moscow: Himiya, 1985 [in Russian].
- [9] A. L. Kontsevoi, and S. A. Kontsevoi, "Modeling of two-stream gas purification from carbon oxide (IV) with monoethanolamine solution", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnolohichnogo universytetu*, no. 3, pp. 68-75, 2019 [in Ukrainian].
- [10] *Nitrogen Guide: Physico-chemical properties of gases and liquids. Production of process gases. Process gas cleaning. The synthesis of ammonia*. 2nd ed. Moscow: Himiya, 1986 [in Russian].

A. L. Kontsevoi, Ph. D., associate professor,
e-mail: kontsev@xtf.kpi.ua

S. A. Kontsevoi, Ph. D., associate professor
e-mail: serkon157@ukr.net

Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute
Peremogy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

MODELING OF TWO-FLOW REGENERATION OF MONOETHANOLAMINE SOLUTION

The simulation object is a two-flow scheme for gas purification from CO₂ with monoethanolamine (MEA) solution and with waste solution regeneration in two simultaneously-working recuperators, the productivity of ammonia is 1360 tons per day. Our algorithm considers the temperature fluctuations and component concentrations in liquid phases at different points of the desorber. The algorithm of material and thermal balances calculation is implemented in the Excel. The concentration of CO₂ at the outlet of the regenerator is 81.3 %. The specific heat consumption for the regeneration of 1 m³ of CO₂ is 4.02 MJ, which corresponds to industrial data. For kinetic calculation of the desorber, the reference dependences of the equilibrium partial pressure of CO₂ over the 20 % MEA solution are approximated, depending on the degree of carbonization and the temperature in the solution. The number of plates in two-section plate desorber is calculated by numerical integration. The control calculation is performed with the following initial data. Gas temperature – 313 K at the output of the separator; the separator output pressure – 1,7 atm. Gas temperature – 343 K at the output of the regenerator; the regenerator output pressure – 1,7 atm. The carbonization degree of the MEA solution, kmol per kmol MEA: waste solution – 0,67; roughly recovered solution – 0,35; finely recovered solution – 0,1. Temperature, K: on the top plate – 343; output of roughly regenerated solution – 388; output of finely regenerated solution – 398. The plates' quantity calculation gives 33. This algorithm can be used for analyzing productivity of existing plants, and also will be useful for students' learning of the gas purification process in schemes designing.

Key words: process gas, carbon oxide (IV), monoethanolamine, kinetics and thermodynamics of desorption, plate desorber.

УДК 621 (4.2)

[0000-0001-5287-3733]

Г. С. Столяренко, д.т.н., профессор

e-mail: radikal@ukr.net

Черкасский государственный технологический университет

б-р Шевченко, 460, г. Черкасы, 18006, Украина

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ОЗОНИРОВАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА И ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МАЛЫХ ДОЗ ОЗОНА НА РАБОТУ КАРБЮРАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ (ДВС)

В работе представлен процесс озонирования жидкого топлива и изучение влияния работы доз озона на работу двигателя. Приведены механизмы химических процессов интенсификации сжигания топлива, подавления образования токсичных соединений при дозировании озона. Экспериментально доказано влияние малых доз озона на процесс сжигания бензина в двигателях внутреннего сгорания. Исходя из результатов исследований названа краткая техническая характеристика двигателя и тормозного стенда. Описаны теоретические основы аналитического контроля процесса, снижение содержания оксида углерода, влияние озона на содержание сажи в отработавших газах, изменение режимных факторов при работе двигателя.

Ключевые слова: озонолиз олефиновых углеводородов, подготовка топлива к сжиганию, горение озонированных бензинов.

У статті представлено дослідження процесу озонування рідкого палива і вивчення впливу доз озону на роботу двигуна внутрішнього згорання при дозуванні окиснювача в повітря, що подається в карбюратор і в паливо. Досліджено хімізм процесу газозного озонолізу. Наведено механізми хімічних процесів інтенсифікації спалювання палива, придушення утворення токсичних сполук при дозуванні озону. Показано радикально-іонний механізм ланцюгових реакцій макровпливу окиснювача при його мікродобавках. Проведено експериментальну перевірку впливу малих доз озону на процес спалювання бензину в двигунах внутрішнього згорання. Дослідження щодо дозування озону в двигун внутрішнього згорання проводилися на стендовій установці. Витрати палива двигуном замірялися шляхом прямого визначення зміни маси палива в часі. Витрати повітря, споживаного двигуном внутрішнього згорання, заміряли за допомогою диференціального манометра. Температуру відпрацьованих газів вимірювали за допомогою термометри. Описано теоретичні основи аналітичного контролю процесу і отримані результати стосовно зниження вмісту оксиду вуглецю, а також впливу озону на вміст сажі у відпрацьованих газах, зміну режимних факторів при роботі двигуна. Вплив мікродозування озону вивчався при різних режимах роботи двигуна: на холостому ході й при малих навантаженнях (до 30 % від номінальної потужності тормозного стенда (генератора)). Схема озонного ініціювання роботи карбюраторного ДВЗ включає дві стадії: отримання озоно-повітряної суміші і її використання. Основні результати експериментального вивчення роботи двигуна внутрішнього згорання при введенні в карбюратор озоно-повітряної суміші показали, що при озонуванні спостерігається поліпшення підготовки паливноповітряної суміші до згорання, забезпечується рівномірність горіння у всьому фронті полум'я. Встановлено, що використання озонованого бензину покращує економічність двигуна і підвищує його потужність.

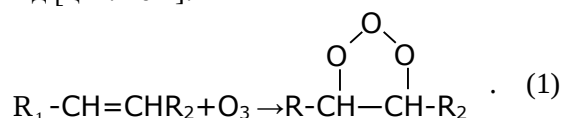
Ключові слова: озонолиз олефиновых углеводнів, подготовка палива до спалювання, горіння озонованих бензинів.

Способы подачи озона в основной воздушный поток перед карбюратором двигателя [1, 2], а также подготовки топлива к сжиганию [3] путем дозирования озона в бензин непосредственно перед подачей последнего на смешение с воздухом можно отнести к методам подавления образования токсичных примесей в отработавших газах на стадии горения. В первом случае это осуществляется за счет газозного окисления олефиновых углеводородов при изменении окислительной способности дутья, во втором – за счет синтеза кислородсодержащих в жидкой фазе, сжигание которой можно классифицировать как сжигание нетрадиционных видов топлива.

Цель исследования: изучить влияние малых доз озона на работу карбюраторного

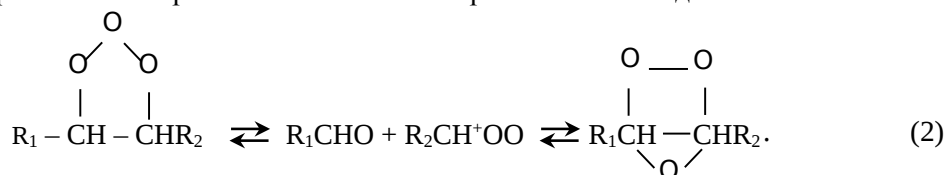
ДВС при дозировании окислителя в воздух, подаваемый в карбюратор, и в топливо.

Химизм процесса газозного озонолиза. Механизм реакций озонолиза олефиновых углеводородов изучен достаточно подробно, что в принципе даёт возможность теоретически проследить влияние синтезированных промежуточных соединений на процессы, протекающие при горении топливовоздушной смеси. Первичным продуктом в соответствии с механизмом Крите является малозонид [цит. по 4]:

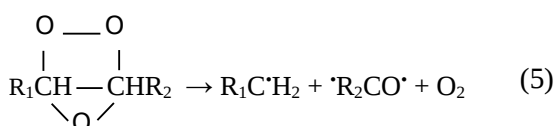
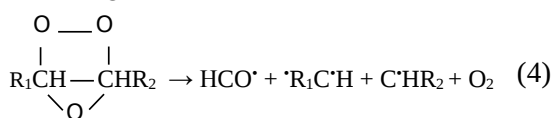
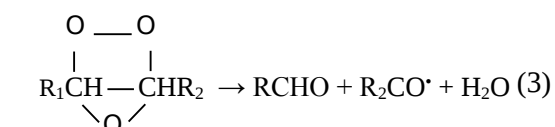


Малозонид нестойк, он быстро распадается, образуя биполярный ион и карбонильное

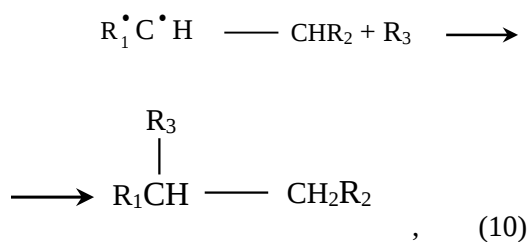
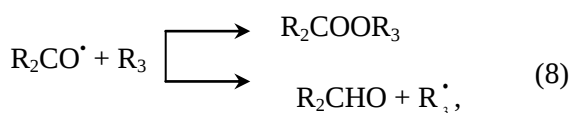
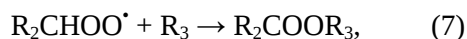
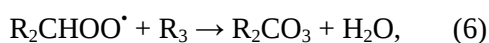
соединение, которые способны рекомбинировать в нормальный озонид



Реакции хемодеструкции озонидов приводят к образованию ряда радикалов:



Образующиеся радикалы могут частично вступать в реакции с углеводородами бензина, например, с парафиновыми. При этом возможно образование спиртов, альдегидов, кетонов и эфиров:



Возможно увеличение содержания углеводородов с боковой разветвленной цепью. Аналогичные реакции можно ожидать с ароматическими и нафтеновыми углеводородами. Реакции (1)-(11) протекают при низких температурах, как в газовой фазе (топливо-воздушной смеси), так и в жидкой фазе – при озонировании бензинов.

Для высокотемпературных процессов, когда «время жизни» элементарного объема топливовоздушной смеси и озона с момента его образования в карбюраторе до момента сгорания в цилиндре не превышает $1 \cdot 10^{-2}$ с, процесс газофазного озонлиза упрощается. Основываясь на современных представлениях о процессе горения предварительно перемешанной топливовоздушной смеси, по объему которой распространяется фронт пламени от точечного источника зажигания, можно априори охарактеризовать влияние дозирования озono-воздушной смеси. Рост концентрации кислородсодержащих радикалов будет сказываться на направлении ряда последовательно-параллельных цепных реакций, которые протекают в кинетической области непосредственно перед фронтом пламени, обеспечивая более полное сгорание топлива.

Озонирование бензинов. При обработке топлива озono-воздушной смесью:

- осуществляется гетерофазный хемосорбционный процесс взаимодействия высокоэффективного окислителя с несколькими реакционноспособными соединениями, находящимися в топливе. Процесс хемосорбции приводит к росту и равномерному распределению кислородсодержащих в объеме топлива;

- наблюдается растворение кислорода воздуха,

- возможен унос легколетучих.

Влияние последнего фактора в опытах было минимизировано, так как легколетучие фракции бензина – это наиболее высокооктановые углеводороды. Влияние микродозирования озono-воздушной смеси в топливо связано в основном с первым фактором – хемосорбцией озона и реакциями озонлиза в жидкой фазе.

Анализ реакционной способности углеводородов можно осуществить по константе скорости реакции озонлиза K_8 (л-моль $\cdot$ с $^{-1}$) [4], которая равна:

для парафиновых углеводородов:

$$1,5 \cdot 10^{-2} \dots 0,7 \cdot 10^0;$$

для нафтеновых углеводородов:

$$3,4 \cdot 10^{-1} \dots 5 \cdot 10^{-1};$$

для олефиновых углеводородов:
 $8,0 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^5$.

Таким образом, озонолizu будут подвергаться в основном наиболее реакционно-способные олефиновые углеводороды. Гетерофазный озонолiz олефиновых углеводородов, так же как и для газофазного процесса, будет протекать по реакциям (1)-(11). При этом наблюдается синтез и накопление в бензине спиртов, альдегидов, эфиров и кетонов, а также незначительное количество карбоновых кислот. Кроме того, в результате синтеза кислородсодержащих органических соединений (октановые числа которых составляют 120 ± 20) наблюдается рост октанового числа бензина. Снижение содержания олефиновых и замена их на кислородсодержащие органические соединения приводит к увеличению химической стабильности топлива, снижению его склонности образовывать отложения во впускной системе. Таким образом, присутствие в топливе альдегидов, спиртов и эфиров приводит к синтезу дополнительных радика-

лов Н•, ОН•, НО, О• в каждом элементарном объеме топливоздушной смеси в зоне, прилегающей к фронту пламени. Наблюдается улучшение подготовки топливоздушной смеси к сжиганию, равномерность горения во всем фронте пламени, когда протекание всех радикальных процессов ускоряется в несколько раз, приобретает лавинный характер и кинетика уже перестает быть фактором, контролирующим процесс окисления углеводородов. Озоно-радикальная подготовка топлива должна привести к более полному протеканию окислительных реакций в гомогенной диффузной смеси.

Экспериментальная часть. Исследования по дозированию озона в двигатель проводились на стендовой установке (рисунок 1), состоящей из карбюраторного двигателя «Урал-353 А» и обкаточно-тормозного стенда КИ-2139 Б (таблица 1). Двигатель соединялся с тормозным генератором при помощи соединительной муфты.

Таблица 1 – Краткая техническая характеристика карбюраторного двигателя «Урал-353 А» и обкаточно-тормозного стенда КИ-2139 Б

Краткая техническая характеристика	
двигателя «Урал-353 А»	тормозного стенда
Число цилиндров – 6 Диаметр поршня – 101,6 мм Рабочий объем – 5,55 л Ход поршня – 114,3 мм Степень сжатия – 6,0 Максимальная мощность – 69 кВт (95 л.с.) при 2600 об/мин Карбюратор К82М Распределитель Р-32 Генератор Г-250 Аккумуляторная батарея 60Т-190	Тип КИ-2139Б Тип электромашины АКБ 82-4 (балансирная, асинхронная с фазным ротором) Номинальная мощность – 55 кВт Синхронная частота вращения ротора – 1500 об/мин Диапазон работы электромашины в режиме генератора – 1700...3000 об/мин Максимальная тормозная мощность – 110 кВт Напряжение тока питания – 380 В Тип нагрузочного реостата – жидкостный с охлаждением бака проточной водой Емкость бака – 300 л



Рисунок 1 – Стендовая установка

Расход топлива двигателем замерялся путем прямого определения изменения массы топлива во времени. Расход воздуха, потребляемого двигателем, замеряли при по-

мощи дифференциального манометра. Температуру отработавших газов измеряли при помощи термопары, устанавливаемой в выпускном трубопроводе на расстоянии 0,4 м от выхлопного патрубка и миллиамперметра. Обороты двигателя определяли с помощью тахометра, расположенного на щите нагрузочного стенда. В процессе эксперимента контролировали температуру масла в двигателе и температуру охлаждающей воды. Нагрузка задавалась при помощи нагрузочного реостата путем введения его ножевых электродов в электролит. Основные параметры, характеризующие работу двигателя, определяли по следующим формулам:

коэффициент избытка воздуха, где $l_0 = 15$,

$$\alpha = \frac{G_B}{l_0 G_T}, \quad (12)$$

мощность двигателя (л.с.; кВт)

$$N_c = \frac{P \cdot n}{1000}, \quad (13)$$

$$N_c = \frac{P \cdot n}{1370}, \quad (14)$$

$$\text{крутящий момент (кгм)} \quad M = P \cdot 0,716 \text{ ч}, \quad (15)$$

$$\text{удельный расход топлива} \quad g_e = \frac{G_T \cdot 10^3}{N_c}. \quad (16)$$

Теплоту сгорания топливной смеси в двигателе определяли по количественному составу примесей в отработавших газах, анализ на озон проводили химическим и спектрофотометрическим методами, описанными ниже.

Изучение процесса дозирования озона в ДВС. Схема озонного инициирования работы карбюраторного ДВС включает две стадии: получение озono-воздушной смеси и ее использование. Стадия получения озono-воздушной смеси состоит из блока генерирования озона, блока питания озонатора высоким напряжением и системы очистки и сушки воздуха.

Напряжение, подаваемое на электрод озонаторных трубок, вырабатывалось высоковольтным блоком питания. Он состоит из высоковольтного масляного трансформатора и автотрансформатора, которым можно регулировать напряжение, подаваемое на озонатор. Блок питания подсоединяется к сети переменного тока напряжением 220 В частотой 50 Гц. Максимальная потребляемая блоком питания мощность – 1,2 кВт. Требуемая блоком озонаторов мощность не превышает 165 Вт.

Таблица 2 – Мощностные показатели работы блока озонаторов

U, кВ	I, мА	N, Вт	C ₀₃ , %	G ₀₃ , г/ч
5	3,2	16,0	0,5	4,0
10	5	50	1,0	7,92
15	11,0	165	1,45	11,5

Данные таблицы 2, характеризующие показатели работы блока озонаторов, приведены для расхода воздуха $(5,5 \pm 0,1)$ л·мин⁻¹, который является оптимальным для данной системы генерирования озона. Давление воздуха на входе в систему составляло $(1,1 - 0,05) \cdot 10^5$ Па.

Озоно-воздушная смесь подавалась или непосредственно в поток воздуха перед карбюратором, или в бензобак. В последнем случае отработанный воздух сбрасывался в дутье перед карбюратором.

Аналитический контроль. В отработавших газах двигателей внутреннего сгорания содержится более 250 компонентов. Основными из них, по которым можно определить полноту сгорания, являются оксид углерода, водород, метан и другие углеводороды, альдегиды, сажа и др. Для оценки токсичности выхлопных газов необходимо знать содержание 3,4-бенз(а)пирена, а также оксидов азота.

Перечисленные токсичные примеси (за исключением 3,4-бенз(а)пирена) определялись хроматографическим и линейно-колориметрическим методами, содержание озона – иодометрическим и спектрофотометрическим методами. Анализ отработавших газов на содержание водорода, оксида углерода, формальдегида, метана и углеводородов C₁-C₅ проводился на хроматографе «Газохром 3101».

Применялись два вида колонок с различными газами-носителями:

1) колонка длиной 3 м, диаметром 3 мм из фторопласта; насадка – активированный уголь AP-3 с размером частиц: 0,6-0,8 мм; газ-носитель – воздух; температура – 20 °С; расход – 60 мл/мин; детектор термохимический. Версия удерживания, с: водород – 20, азот и кислород – 80, оксид углерода – 125, метан – 140, этан – 155, пропан – 185, бутан – 280;

2) колонка длиной 1 м; газ-носитель – гелий; расход – 80 мл/мин. Время удерживания, с: водород – 20, азот и кислород – 90, оксид углерода – 135, метан – 160, этан – 177. Углеводороды C₅-C₁₀ анализировались на хроматографе «Цвет 500». Предварительно они улавливались нелетучим растворителем в системе из двух последовательно соединенных поглотителей с пористым стеклянным барботажным распылителем. Расход контролировался по газовому счетчику. В качестве растворителя использовался додециловый или октиловый спирт. Объем газовой пробы составлял $(3 \pm 0,1)$ дм³, расход газа при извлечении углеводородов – $(0,475 \pm 0,25)$ дм³/мин, объем растворителя – 10 см³.

Условия анализа на хроматографе: колонка длиной 3 м, диаметром 3 мм из фторопласта; насадка – 5 % силикона Е-30 на хро-

матоне А; газ-носитель – гелий; расход – 60 мл/мин; скорость роста температуры – 80°C/мин; детектор – катарометр ($I = 120$ мА). Время удерживания, с: $C_5 - 47$, $C_6 - 75$, $C_7 - 135$, $C_8 - 215$, $C_9 - 345$, $C_{10} - 470$, $C_{11} - 595$.

В таблицах 3, 4 приведены основные результаты экспериментального изучения работы двигателя внутреннего сгорания при введении в карбюратор озono-воздушной смеси. Влияние микродозирования озона изучалось при разных режимах работы двигателя:

на холостом ходу и при малых нагрузках. Нагрузки 9,5 и 15,5 кгм соответствуют 10,7 и 16,5 кВт, что составляет 25-27 % от номинальной мощности тормозного стенда (генератора). Повышение нагрузки свыше 30 % оказалось нежелательным, так как вода в системе охлаждения реостата не должна изменять свою температуру для поддержания постоянной мощности (при остальных постоянных технологических и режимных параметрах) в течение опыта.

Таблица 3 – Влияние газофазного дозирования озона на содержание токсичных примесей в отработавших газах карбюраторного двигателя

Расход, кг/ч		Коэф-т избытка воздуха, α	Температура, $t, ^\circ\text{C}$	Частота вращения, n , об/мин	Расход озона, g_{oz} , г/ч	Объемная доля токсичных примесей, % до (после) озонирования		
воздуха, G_B	топлива, G_T					оксида углерода C_{co}	оксида азота $C_{NOx} \cdot 10^{-3}$	углеводородов $C_{CnHm} \cdot 10^{-3}$
53,0	2,4	1,47	486	1600	1,06	0,9(0,5)	18,5(17,0)	0,21(0,21)
47,4	3,3	0,96	389	1440	1,09	5,5(4,9)	10(9,5)	0,12(0,10)
42,4	3,4	0,83	367	1480	1,06	6,5(5,3)	8,5(8)	0,16(0,13)
52,0	3,6	0,96	500	1660	1,08	5,9(5,0)	10(10)	0,14(0,13)
42,4	3,6	0,79	400	1540	1,06	6,0(5,0)	7,5(7)	0,16(0,14)
42,4	3,3	0,86	414	1500	1,06	6,0(5,0)	7,5(7,5)	0,15(0,12)
42,4	3,2	1,17	403	1410	1,08	2,8(1,5)	21,5(21,3)	0,14(0,14)
42,6	4,4	0,65	319	1340	1,06	8,0(6,3)	0,5(0,5)	0,22(0,16)
42,5	4,2	0,67	219	1200	1,06	8,0(6,4)	0,6(0,5)	0,21(0,19)
80,4	2,7	1,29	569	1640	1,02	0,13(0,08)	17(15)	0,18(0,17)
67,1	5,1	1,20	504	1430	1,07	0,15(0,09)	5,5(16)	0,14(0,12)
73,5	3,9	1,26	536	1440	1,02	0,08(0,08)	55(55)	-(-)
73,5	5,04	0,97	540	1420	1,10	0,6(0,4)	47(53)	0,09(0,06)
79,4	51	1,0	580	1680	1,06	0,3(0,1)	55(59)	0,08(0,06)
76,5	5,1	1,0	554	1540	1,10	0,28(0,10)	60(60)	0,08(0,05)
60,0	5,7	0,7	403	1300	1,06	1,6(0,7)	5,5(7,5)	0,13(0,10)
60,0	5,7	0,7	440	1300	1,06	1,4(0,7)	5,0(7,5)	0,13(0,10)
60,0	6,0	0,67	378	1300	1,10	2,1(1,1)	2,0(2,4)	0,15(0,14)
67,4	6,4	0,77	434	1330	1,10	1,5(0,4)	2,0(2,0)	0,13(0,11)
94,9	6,0	1,05	583	1460	1,01	0,25(0,1)	52(52)	-(-)
101,7	6,0	1,13	590	1520	1,10	0,2(0,05)	57(57)	0,12(0,09)
101,7	7,2	0,94	605	1600	1,01	0,4(0,2)	-(30)	0,10(0,08)
84,9	8,4	0,67	468	1420	1,02	1,4(1,0)	5,0(7,5)	0,18(0,16)
84,9	8,7	0,65	468	1400	1,10	1,5(0,7)	7,5(7,5)	0,18(0,16)
95,1	8,7	0,73	440	1420	1,02	1,4(1,2)	4,0(7,0)	0,17(0,13)

Таблица 4 – Влияние газофазного дозирования озона на режимные параметры работы карбюраторного двигателя на холостом ходу

α	g_{O_3}/G_T , г/кг	$\frac{g_{O_3}}{G_T + G_B}$, г/кг	n, об/мин	Δp	$t, ^\circ C$	Δt	ΔC_{CO_2} , %	ΔC_{NO_x} , %·10 ³	ΔC_{CnHm} , %·10 ³
1,47	0,44	0,020	1600	+40	486	+7	-0,4	-1,5	-
0,96	0,32	0,022	1400	+10	389	+11	-0,6	-0,5	-
0,83	0,31	0,024	1480	+10	367	+20	-1,2	-0,5	-
0,96	0,29	0,020	1660	0	500	-2	-0,9	0	-
0,79	0,29	0,024	1540	+10	400	+14	-1,0	-0,5	-
0,86	0,32	0,024	1500	+20	414	0	-1,0	0	-
1,17	0,25	0,024	1410	0	396	+7	-1,3	-0,2	-0,02
0,67	0,25	0,024	1200	0	219	0	-1,6	-0,1	-0,02
0,65	0,24	0,023	1340	0	319	0	-1,7	0	-0,06

Однако достигнутые режимы нагрузки и полученные экспериментальные данные дают полную характеристику влияния озона на работу двигателя. Единичные определения содержания в отработавших газах бенз(а)пирена, альдегидов и сажи показали, что их количество снижается соответственно на 20÷30, 15÷40 и 10÷80 %.

В таблице 5 приведены основные зависимости, обусловленные влиянием жидкофазного озонирования, т. е. при работе двигателя на озонированном этилированном бензине. Изучаемые параметры оставались те же, что и при газофазном озонировании. Количество озона, растворяемого в бензине, составляло 0÷1,2 г/кг топлива.

Таблица 5 – Изменение характеристик работы двигателя при работе на озонированном бензине (от различной дозы озона)

Характеристика	Доза озона, г/дм ³				
	0	0,345	0,690	1,035	0
Частота вращения, об/мин	1700	1700	1680	1670	1700
Температура отработавших газов, °C	445	44°6	435	440	455
Коэффициент избытка воздуха	1,13	1,20	1,27	1,18	1,14
Расход топлива, кг/ч	3,54	3,26	3,15	3,40	3,50
Объемная доля, %:					
оксида углерода	0,24	0,20	0,05	0,11	0,25
оксида азота	0,0014	0,0010	0,0010	0,0010	0,0014
углеводородов	0,08	0,08	0,05	0,06	0,07

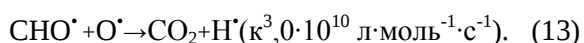
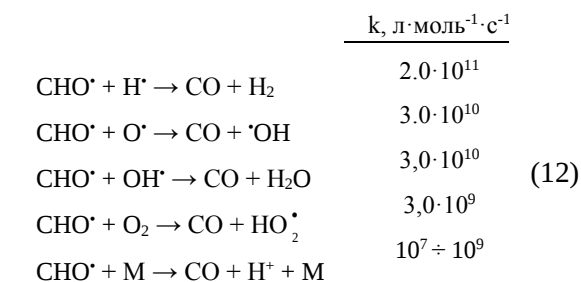
Использование озона как при газофазном, так и при жидкофазном дозировании увеличивает окислительную способность дутья за счет роста кислородсодержащих радикалов при химической подготовке топлива к воспламенению, облегчая эту подготовку, что дает положительные результаты. Рассмотрим влияние озона на изменение содержания токсичных примесей в отработавших газах.

Снижение содержания оксида углерода (II). В соответствии с предложенными механизмами окисления углеводородов в пламе-

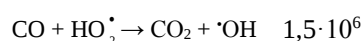
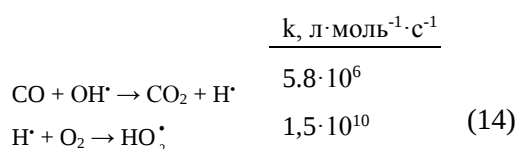
ни их термодеструкция осуществляется всегда через оксид углерода (II), т. е. причина образования CO – естественное состояние любого пламени (особенно в предпламенный период). Основной причиной появления CO являются реакции термодеструкции радикала CNO· и его взаимодействия с другими радикалами. В предпламенный период существует конкуренция между термическим распадом радикала CNO· и его реакциями с H·, O·, OH· и O₂.

Сравнительный анализ кинетических данных реакций (12) показывает, что CO син-

тезируется при высокоскоростных радикальных процессах из СНО на 90 %, так как радикал СНО^{*} может окисляться и до СО₂:



Механизм дожигания СО при озонировании основывается на следующих химических реакциях:



Вторичные процессы дожигания оксида углерода (II) медленнее реакций синтеза. Очень полезна реакция с радикалом кислорода, но она может протекать только при специфических условиях, например, в сухих пламенах СО. Даже незначительное содержание водородсодержащих молекул углеводорода полностью подавляет ее. Таким образом, наблюдаемое стабильное снижение содержания оксида углерода (II) при разных режимах работы двигателя и способах подачи озон-воздушной смеси необходимо связать только с ростом концентраций ОН^{*} и НО₂^{*}. Причем влияние радикальной реакции с НО₂^{*} наиболее реально, так как устойчивость радикала возрастает при повышенных температурах.

Другое объяснение полному подавлению образования СО при работе двигателя на обедненных смесях, когда замена обычного бензина озонированным приводит к постоянному снижению объемной доли СО на 0,5–0,8 %, найти трудно. ΔC_{co} колеблется в пределах от 0,3 до 2,5 % при дозах озона до 0,6 г на 1 кг топлива (газофазное дозирование). При жидкофазном озонировании ни в одном из опытов не наблюдалось повышение содержания оксида углерода (II) при дозах озона на

порядок ниже. На многих режимах достигнуто нулевое содержание СО в отработанных газах ДВС.

Влияние озона на содержание сажи в отработавших газах. Причиной образования сажи при работе двигателя на сильно обедненных смесях являются реакции дегидрогенизации и образования ацетилена. В связи с тем, что в бензине всегда присутствуют этиленовые и ароматические углеводороды, промежуточные концентрации ацетилена высоки даже при работе двигателя на обедненных смесях.

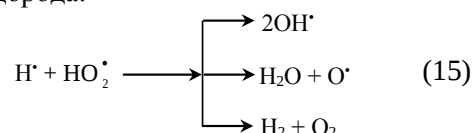
При сгорании обогащенных топливоз-воздушных смесей выход по реакции дегидрогенизации еще более возрастает, сгорание протекает с детонацией при недостатке кислорода, что приводит к росту содержания сажи в отработавших газах.

И в том, и в другом случае в процессе дегидратации этиленовых углеводородов в элементарном объеме наблюдается неравномерность распределения окислителя, что приводит к тушению пламени, а значит, к крекингу углеводородного топлива.

По другому механизму сажеобразования зародышем крекинга топлива считаются атомы водорода, которые при дефиците кислорода ускоряют процессы дегидрогенизации углеводородов.

При использовании озонированного топлива, а также при дозировании озона в дутье частично устраняются все эти причины: во-первых, при озонировании снижается содержание олефиновых углеводородов; во-вторых, равномерное распределение микродоз озона и кислорода по всему реакционному объему топливоз-воздушной смеси препятствует протеканию реакций по цепи C₂H₆ → C₂H₄ → C₂H₂ → С.

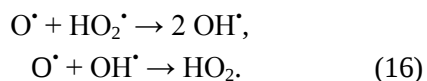
И, наконец, вновь синтезируемые радикалы НО₂^{*}, а также альдегиды, кетоны и эфиры регулируют текущую концентрацию радикалов водорода:



Таким образом, вместо очага сажеобразования возникает дополнительный элементарный объем с высокой окислительной способностью, позволяющий продолжить окислительные процессы углеводородных радикалов. Максимально низкое содержание сажи в отработавших газах – не более 0,02 г/м³ – дос-

тигнуто при низких концентрациях оксида углерода (II). При росте объемной доли CO выше 0,5 % озонирование практически не сказывалось на подавлении сажеобразования.

Содержание оксидов азота. Подавление образования оксидов азота ожидалось в связи с ростом текущей концентрации радикалов $\text{OH}^\bullet$ и $\text{HO}_2^\bullet$, образующихся по реакциям:



При газофазном дозировании озона в обедненные смеси в 30 % опытов при горении наблюдался незначительный рост содержания оксидов азота (на 10-20 %). В остальных опытах отмечено постоянство данного параметра.

Повышение содержания NO_x объясняется дополнительным связыванием атмосферного азота атомарным кислородом.

Незначительное снижение содержания оксидов азота (в среднем на 10-20 %) в опытах по жидкофазному дозированию озона, в основном, объясняется снижением температуры горения. Так, постоянство частоты вращения и мощности двигателя достигалось при горении топлива, в котором синтезировались спирты, альдегиды, эфиры (соединений с повышенным октановым числом). Дозирование озона в жидкую фазу ни в одном из опытов не приводило к росту содержания оксидов азота в отработавших газах.

Таким образом, газофазное озонирование незначительно влияет на содержание оксидов азота в отработавших газах, в то время как жидкофазное – дает устойчивый положительный эффект.

Изменение режимных факторов при работе двигателя. Основной задачей исследования являлись проблемы экологического плана. Однако интерес представляют и побочные результаты действия высокоэффективного окислителя.

Использование в качестве топлива озонированного бензина обеспечивает устойчивую работу двигателя при раннем и позднем зажигании, звук работающего двигателя становится более басовитым, при оптимальной дозе озона нет детонации в случае горения низкооктанового топлива, двигатель легко запускается в холодное время года. Все эти явления объясняются синтезом альдегидов и спиртов, а главное, эфиров в объеме бензина.

Данные соединения обладают высокой детонационной стойкостью, причем снижает-

ся неравномерность распределения детонационной стойкости бензина по фракциям, падает его склонность к нагарообразованию. Октановое число бензина при увеличении дозы озона проходит через максимум в области $0,6 + 0,8$ г окислителя на 1 кг топлива. Максимум повышения составляет 6-6,5 единицы.

Усредненные данные по газофазному дозированию озона свидетельствуют о росте температуры на $3-14^\circ\text{C}$; по жидкофазному – о ее снижении на $10-15^\circ\text{C}$. При постоянной мощности двигателя и расходе топлива частота вращения возрастает на 20-40 об/мин.

При постоянных частоте вращения, расходе топлива и воздуха отмечено незначительное повышение мощности двигателя (на 3-3,5 %) при газофазном дозировании озона. Во всех опытах по газофазному дозированию озона достигнута экономия топлива. В среднем при работе двигателя на холостом ходу и под нагрузками 9,5 кгм (10,7 кВт) и 15,5 кгм (16,5 кВт) она составляла соответственно 3,5; 2,11 и 1,75 %. Стабильная экономия (от 3,5 % до 11 %) наблюдалась при работе двигателя на озонированном бензине. Небезынтересен и тот факт, что получены постоянные характеристики двигателя при одном и том же удельном расходе топлива, но в зоне более высоких коэффициентов избытка воздуха.

Эти результаты можно объяснить только тем, что озоновая присадка (как при газофазном, так и при жидкофазном дозировании озона) выполняет антидетонационную роль, разрушая пероксидные соединения, которые образуются в предпламенный период в камере сгорания, увеличивая эффективность и полноту горения топлива.

Цепным механизмом (17) объясняется макровоздействие озона при его микродобавках в зону горения. Лишь ассимиляцией радикалов $\text{OH}^\bullet$ и $\text{HO}_2^\bullet$ можно объяснить неполное сгорание и при озонном методе интенсификации процесса горения.



Выводы:

1. Согласно современным представлениям о процессе горения топливовоздушной смеси, все токсичные соединения в отработавших газах двигателя внутреннего сгорания образуются в результате неполного сгорания топлива. Проникновение озона в структуру углеводородов бензина позволяет равномерно

распределить окислитель в объеме топливовоздушной смеси, что приводит к более полному ее сгоранию. Этим объясняется снижение концентрации токсичных соединений в отработанных газах.

2. Использование озонированного бензина улучшает такой эксплуатационный параметр двигателя, как экономичность (экономия топлива до 7 %) и повышает его мощность.

3. Озоновая добавка в топливо за счет образования в объеме топливовоздушной смеси радикалов $\text{HO} \cdot$; $\text{HO}^2 \cdot$; $\text{RO}^2 \cdot$ разрушает пероксидные соединения, которые являются главным источником детонационного сгорания бензина.

4. Эффективная озонная подготовка топливовоздушной смеси в предпламенный период положительно влияет не только на снижение токсичности выбросов, но и на режимные параметры работы двигателя.

Список литературы

- [1] В. А. Якоби, *Химия элементоорганических соединений*: сб. Горький: ГТУ, 1979, с. 104-106.
- [2] С. Д. Разумовский, и Г. Е. Заиков, *Изв. АН СССР. Сер. Хим.*, с. 322, 1971.
- [3] В. Ф. Кожин, *Озонирование воды*. Москва: Стройиздат, 1974.
- [4] Ю. Окамото, "Генератор озона для двигателя внутреннего сгорания", *Евр. патент МКИ СОІВ 13/11. № 83/04243*, Авг. 24, 1982.
- [5] А. Театтик, "Устройство по дозированию озонированного воздуха в двигатель внутреннего сгорания", *Патент ФРГ МКИ F 02 M 25/10. № 2540990*, 1997.
- [6] Г. С. Столяренко, "Способ питания двигателя внутреннего сгорания", *А.с. СССР МКИ F 02 M 25/10. № 1240943*, Март 11, 1984.
- [7] Г. С. Столяренко, "Інтенсифікація процесу горіння рідкого палива озоновим методом", *Експрес-новини: наука, техніка, виробництво*, № 7-8, с. 8-10, 1998.
- [8] Г. С. Столяренко, та А. В. Громико, "Інтенсифікація процесу горіння бензина у ДВЗ", *Хімічна промисловість України*, № 1, с. 23, 1996.
- [9] Г. С. Столяренко и др., "Диэлектрик с микрорельефом на его поверхности преимущественно для озонаторов", *Патент*

России МКИ В ОI D 53/16. № 2016840, Февр. 26, 1991.

- [10] Г. С. Столяренко и др., "Устройство для электронно-лучевой обработки объектов", *Патент России МКИ В ОI D 53/16. № 2023746*, Февр. 26, 1991.
- [11] Г. С. Столяренко и др., "Способ изготовления микрорельефа на диэлектрической поверхности", *Патент России МКИ В ОI D 55/16. № 1819250*, Февр. 26, 1991.
- [12] Г. С. Столяренко та ін., "Пристрій для живлення двигуна внутрішнього згорання озоновим паливом", *Патент України МКИ F 02 M 25/10. № 22004*, Січ. 09, 2003.

References

- [1] V. A. Jacobi, *Chemistry of Organoelement Compounds*: proc., Gorky: GTU, 1979, pp. 104-106 [in Russian].
- [2] S. D. Razumovsky, and G. E. Zaikov, *Izv. USSR Academy of Sciences. Ser. Chem.*, p. 322, 1971 [in Russian].
- [3] V. F. Kozhinov, *Water ozonation*. Moscow: Stroyizdat, 1974 [in Russian].
- [4] Yu. Okamoto, "Ozone generator for internal combustion engine", *Europ. Patent MКИ SOIV 13/11. No. 83/04243*, Aug. 24, 1982. [in Russian].
- [5] A. Teattic, "The device for dosing ozonated air into the internal combustion engine", *Germany Patent MКИ F 02 M 25/10. No. 2540990*, 1997 [in Russian].
- [6] G. S. Stolyarenko, "The method of the question of the internal combustion engine", *USSR certificate of authorship MКИ F 02 M 25/10. No. 1240943*, March 11, 1984.
- [7] H. S. Stolyarenko, "Intensification of the process of combustion of liquid fuel with ozone", *Ekspres-novyny: nauka, tekhnika, vyrobnytstvo*, no. 7-8, pp. 8-10, 1998 [in Ukrainian].
- [8] H. S. Stolyarenko, and A. V. Gromyko, "Intensification of gasoline combustion process in ICE", *Khimichna promyslovist Ukrainy*, no. 1, p. 23, 1996 [in Ukrainian].
- [9] G. S. Stolyarenko et al., "A dielectric with a microrelief on its surface mainly for ozonizers", *Rus. Patent MКИ V OI D 53/16. No. 2016840*, Feb. 26, 1991 [in Russian].
- [10] G. S. Stolyarenko et al., "Device for electron-beam processing of objects", *Rus. Pa-*

- tent MKI B OI D 53/16. No. 2023746, Feb. 26, 1991 [in Russian].
- [11] G. S. Stolyarenko et al., "A method of making microrelief on a dielectric surface", *Rus. Patent MKI B OI D 55/16. No. 1819250*, Feb. 26, 1991 [in Russian].
- [12] G. S. Stolyarenko et al., "The device for power supply of the internal combustion engine with ozone fuel", *Ukr. Patent MKI F 02 M 25/10. No. 22004*, Jan. 09, 2003 [in Ukrainian].

H. S. Stolyarenko, Dr. Tech. Sc., professor
e-mail: radikal@ukr.net
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

THEORETICAL BASES OF THE OZONING PROCESS OF LIQUID FUEL AND STUDY OF THE INFLUENCE OF OZONE SMALL DOSES ON THE WORK OF CARBURATOR INTERNAL COMBUSTION ENGINE (ICE)

Theoretical bases and chemistry of ozonation of the fuel during the introduction of the oxidant in both the gas and liquid phases are considered. The mechanisms of chemical processes of intensification of fuel combustion, suppression of the formation of toxic compounds during ozone dosing are presented. The radical-ion mechanism of the chain reactions of the oxidant macroactivity at its micro-additives is shown. The possibility of saving liquid fuel has been established. The experimental verification of the effect of ozone small doses on the process of combustion of gasoline in internal combustion engines is presented.

Due to the fact that this reaction mechanism is very well studied, this makes it possible to theoretically trace the effect of synthesized compounds. A number of experiments have been carried out, the results of which are presented. The brief technical characteristics of the engine and brake stand are named. Engine fuel consumption has been measured by directly determining the change in fuel mass over time. The flow rate of air consumed by the engine has been measured using a differential pressure gauge. The temperature of the exhaust gases has been measured using a thermocouple. Theoretical foundations of the analytical control of the process, the reduction of carbon monoxide, the effect of ozone on the soot content in the exhaust gases, the change in operational factors during engine operation are described. The use of ozonized gasoline improves such an engine operating parameter as efficiency (fuel economy up to 7 %) and increases its power. Ozone additive in fuel due to the formation of HO[•] radicals in the volume of the fuel-air mixture, radicals HO[•]; HO₂[•]; RO₂[•] destroys peroxide compounds, which are the main source of detonation combustion of gasoline. The effective ozone preparation of the fuel-air mixture in the pre-flame period positively affects not only the reduction of toxicity of emissions, but also the operating parameters of the engine.

Keywords: ozonolysis of olefinic hydrocarbons, preparation of fuel for combustion, burning of ozonated gasoline.

УДК 621.791.725

[0000-0002-8050-5580] **А. В. Бернацький**, к.т.н.,

[0000-0001-8153-6533] **В. Д. Шелягін**, к.т.н., с.н.с.,

[0000-0002-8498-4726] **В. М. Сидорець**, д.т.н., професор,

[0000-0001-9754-9478] **О. М. Берднікова**, к.т.н., с.н.с.,

[0000-0003-1927-790X] **О. В. Сіора**, наук. співробітник,

[0000-0002-9582-5763] **Т. М. Набок**, мол. наук. співробітник

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України
вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ, 02150, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ З РІЗНОРІДНИХ НЕРЖАВІЮЧИХ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ ПРОСТОРОВОМУ ПОЛОЖЕННІ

Проблема ремонту колекторів парогенераторів атомних електростанцій (АЕС) на сьогоднішній день стала вкрай актуальною. Шлях герметизації теплообмінних трубок за допомогою заглушок є перспективним за умови забезпечення високої якості з'єднання. Практичний досвід застосування зварювання для вирішення цієї проблеми показав необхідність пошуку технологічних рішень, пов'язаних зі збільшенням глибини провару та зменшенням зони термічного впливу. Метою роботи було визначення технологічних особливостей лазерного зварювання з'єднань з різномірних нержавіючих аустенітних сталей у вертикальному просторовому положенні з подальшим застосуванням результатів для вирішення вищезазначеної проблеми. Було запропоновано два технологічні варіанти вварювання заглушок з використанням стикових прямолінійних та кільцевих з'єднань у вертикальному положенні з різними коефіцієнтами форми шва. Було відпрацьовано режими лазерного зварювання та виготовлено зразки зварних з'єднань. За результатами аналізу даних механічних випробувань, візуального та радіографічного контролю, випробувань на непроникність і металографічних досліджень визначено доцільні режими лазерного зварювання заглушок для кожного з двох варіантів. Основним типом було кільцеве стикове зварне з'єднання типу «пластина-труба» зі сталей 10X18H10T (труба) і 10X17H13M3T (пластина), виконане у вертикальному положенні. Дані механічних випробувань на статичний розтяг свідчать, що для зварних з'єднань з коефіцієнтом форми шва, більшим одиниці, забезпечується значення зусилля руйнування приблизно на 11 % вище порівняно зі з'єднаннями з коефіцієнтом форми шва, меншим одиниці. Встановлено основні причини виникнення дефектів при лазерному зварюванні кільцевих зварних з'єднань з різномірних нержавіючих сталей та запропоновано методики їх усунення та запобігання їх утворенню. Розроблено базові технологічні прийоми лазерного зварювання кільцевих зварних з'єднань з різномірних сталей у різних просторових положеннях. На основі результатів проведених досліджень сформульовано технологічні рекомендації з лазерного зварювання заглушок у теплообмінні трубки колектору, що значно удосконалисть технології ремонту парогенераторів атомних електростанцій.

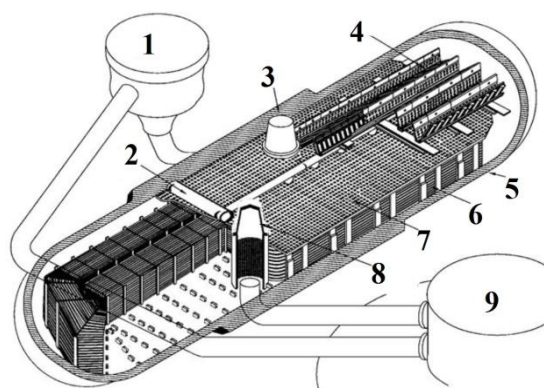
Ключові слова: лазерне зварювання, кільцеві стикові з'єднання, нержавіючі сталі, різномірні зварні з'єднання, просторе положення, парогенератор, АЕС, ремонт.

Вступ. В енергетиці (на атомних і теплових електростанціях), авіа- та ракетобудуванні, хімічній, харчовій та інших галузях промисловості широко застосовуються теплообмінні апарати [1-3], які призначені для обміну тепловою енергією між двома або кількома твердими, рідкими, газоподібними середовищами у різних комбінаціях [4-6]. У зв'язку з цим досить часто для одержання високих експлуатаційних властивостей тепло-

обмінних апаратів у їх конструкціях застосовують складові комбіновані вузли з різномірних металів [7-9]. У цьому випадку найбільш повно реалізуються переваги кожного з них. У той же час ускладнюється задача виготовлення і ремонту таких конструкцій у разі необхідності застосування технологій зварювання, адже зварювання різномірних металів є більш складним, ніж зварювання однорідних [10-12]. Прикладом необхідності виконання

такого зварювання є встановлення заглушок для герметизації теплообмінних труб у колекторах парогенераторів типу ПГВ-1000М для їх ремонту.

В Україні на чотирьох діючих атомних електростанціях експлуатується 15 атомних енергоблоків, з яких 13 – типу ВВЕР-1000 і два – ВВЕР-440, загальною встановленою потужністю 13 835 МВт [2]. Парогенератор горизонтального типу ПГВ-1000М (далі ПГ) є складовою частиною циркуляційного контуру АЕС з водо-водяним енергетичним реактором ВВЕР-1000 та призначений для вироблення насиченої пари у складі енергоблоку АЕС (рисунк 1) [13].



1 – головний центральний насос; 2 – підвід води; 3 – холодний колектор; 4 – жалюзійний сепаратор; 5 – корпус; 6 – трубний пучок; 7 – занурювальний лист; 8 – гарячий колектор; 9 – реактор

Рисунок 1 – Парогенератор ПГВ-1000М [13]

Нині на АЕС України експлуатуються 52 горизонтальні ПГ, напрацювання яких становить від 10 до 130 тис. годин [14]. Корпус ПГ у середній частині зварений з двома вертикальними колекторами першого контуру, призначеними для з'єднання з 11 000 теплообмінних труб (ТОТ), зігнутих в U-подібні змійовики [13]. Трубний пучок з елементами дистанціювання і кріплення займає близько 78 % площі частини поперечного перерізу корпусу парогенератора. ТОТ в пучках розміщені в шаховому порядку з кроками 19 мм по висоті і 23 мм по ширині [15], а мінімальна відстань між зовнішніми стінками ТОТ становить 6 мм (рисунк 2). Колектор парогенератора виготовлений зі сталі 10ГН2МФА. Внутрішня поверхня колекторів плакована антикорозійним аустенітним наплавленням (1-й шар – ЗІО-8, 2-й шар – ЭА 898/21Б), товщина кожного шару становить близько 3 мм.

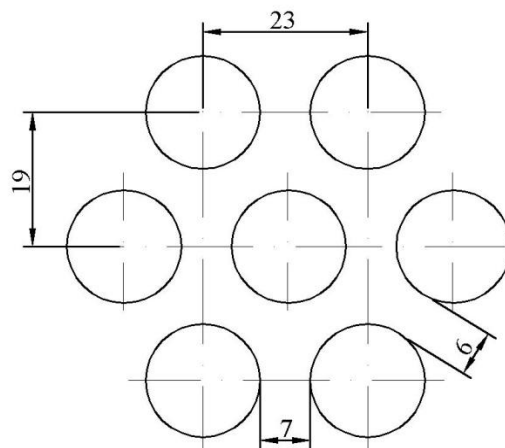


Рисунок 2 – Схема розташування теплообмінних трубок у ПГ

Кінці змійовиків на ПГ, виготовлених до 1990 року, закладалися в отвори колектору з подальшим вальцюванням на всю глибину закладення методом вибуху [15]. Кінці змійовиків на ПГ, виготовлених з 1990 року, вальцювалися після закладення в отворах колектору методом гідророздачі і механічного довальцювання вихідної ділянки. Торці змійовиків в обох варіантах були зварені з антикорозійним наплавленням колектору аргонодуговим способом.

В процесі експлуатації ПГ виявлялись різні випадки їх руйнування [13-16]. Однією з найважливіших умов безпечної експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР є відсутність протікання теплоносія з 1-го контуру в 2-й [16]. Теплообмінні трубки забезпечують передачу тепла від теплоносія першого контуру до другого контуру і є захисним бар'єром між ними. Пошкодження ТОТ може призвести до потрапляння радіоактивного теплоносія першого контуру в другий, що порушує безпеку ядерних енергоблоків.

Механізми пошкодження ТОТ ПГ детально описані в документі ІАЕА [17]. Показано, що головною причиною пошкоджень ТОТ є загальна корозія, пітінги, корозійне розтріскування під напруженням та поєднання пітінгів і корозійного розтріскування. В більшості випадків деградація починається з точкової корозії. Через деякий час, при одночасному збільшенні напружень, що розтягують труби у радіальному напрямку, на цю частину труби додатково починає впливати корозійне розтріскування. Саме зародження та інтенсивне зростання дефектів розтріскування в умовах нормальної експлуатації може призво-

дити до течій з першого контуру в другий. При виникненні такої ситуації блок зупиняють на позаплановий ремонт. Дефектні ТОТ герметизують встановленням заглушки (рис. 3), яка обварюється аргонодуговим способом. Збільшення заглушених ТОТ призводить як до значних фінансових втрат, так і до зниження ефективності експлуатації блоків через зменшення поверхні теплообміну.

Згідно зі схемою ремонту (рис. 3) стикове кільцеве зварне з'єднання заглушки з корпусом колектору ПГ повинно бути виконано у вертикальному просторовому положенні з неповним проваром (мінімальна глибина провару – від 1,5 мм) та локалізованою зоною плавлення.

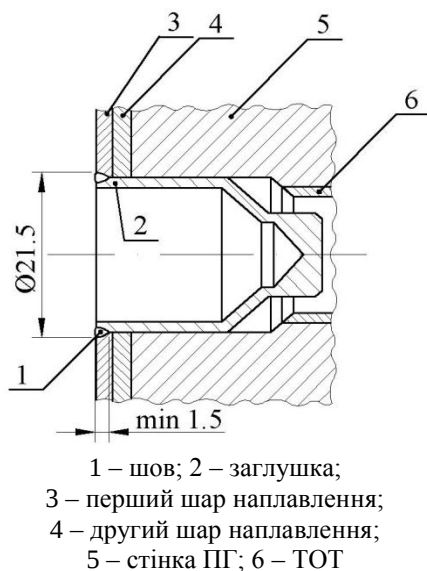


Рис. 3 – Схема вварювання заглушки

Аргонодугове зварювання [18-20], що нині використовується при ремонті, характеризується підвищеним тепловкладенням у зварювані деталі й недостатньою концентрацією теплового джерела порівняно з лазерним зварюванням [21-23]. Коефіцієнт форми шва K_f (відношення ширини шва до глибини провару) при аргонодуговому зварюванні становить 2...4. При виконанні умови забезпечення мінімальної глибини провару не менше 1,5 мм це призводить до збільшення діаметра кільцевого зварного з'єднання з заглушкою (рис. 4) [24]. В результаті цього відбувається перегрів деталей і негативний вплив на сусідні з'єднання, пов'язаний зі зростанням залишкових напружень. Область впливу приблизно збігається з зоною кольорів мінливості (див. рис. 4). Все це обмежує можливості за-

стосування аргонодугового зварювання для ремонту ПГ типу ПГВ-1000М.



Рис. 4 – Заглушка встановлена із застосуванням аргонодугового зварювання [24]

Актуальність роботи полягає в перспективі заміни технології аргонодугового зварювання. Нова технологія повинна забезпечити виконання вимоги досягнення необхідної глибини провару при зменшенні діаметра зварного з'єднання. Цього можливо досягнути при застосуванні локальних джерел нагріву, таких як лазерний або електронний промінь. Ідея авторів полягає у застосуванні для ремонту ПГ технології лазерного зварювання. Саме лазерний промінь як висококонцентроване джерело енергії може забезпечити вкрай малий локальний термічний вплив на конструкцію та більший експлуатаційний ресурс зварних з'єднань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі лазерні методи зварювання також не позбавлені недоліків. Вплив лазерного випромінювання на метал при зварюванні характеризується жорстким термічним циклом, що викликає небажані зміни в структурі матеріалу, появу напруженого стану і появу деформацій [25-27]. Все це призводить до виникнення дефектів (пор, тріщин), які значно погіршують механічні властивості, а отже, знижується надійність і довговічність. У зв'язку з цим виникає необхідність дослідити вплив параметрів лазерного зварювання на структуру та міцність зварних з'єднань.

Невирішеною залишається задача визначення технологічних особливостей лазерного зварювання з'єднань з різнорідних нержавіючих аустенітних сталей у вертикальному просторовому положенні.

Очікується, що при варіюванні температурно-часовими параметрами процесу лазер-

ного зварювання заглушок з нержавіючої сталі буде отримана дрібнозерниста структура шва, яка забезпечить близькі з основним металом (нержавіюча сталь іншого хімічного складу) характеристики по корозійній стійкості, міцності і пластичності.

Мета роботи – визначення технологічних особливостей лазерного зварювання з'єднань з різномірних нержавіючих аустенітних сталей у вертикальному просторовому положенні.

Методи та об'єкти дослідження. Об'єктом досліджень виступав процес лазерного зварювання стикових з'єднань з різномірних нержавіючих аустенітних сталей у вертикальному просторовому положенні.

Предметом дослідження були параметри технологічних режимів лазерного зварювання стикових з'єднань з нержавіючих аустенітних сталей у вертикальному просторовому положенні та їх вплив на структуру, якість та механічні характеристики зварних з'єднань.

Матеріали та методики дослідження. Матеріалами дослідження (таблиця 1) слугували нержавіючі аустенітні сталі 10X18H10T (з якої виготовляють заглушки) та 10X17H13M3T (наближена за своїм хімічним складом до першого шару наплавлення у ПГ).

Таблиця 1 – Хімічний склад сталей, що зварюються

Хімічний елемент	Склад, мас. %	
	10X18H10T	10X17H13M3T
C	< 0,1	< 0,1
Si	< 0,8	< 0,8
Mn	1...2	< 2
Ni	10...11	12...14
S	< 0,2	< 0,2
P	< 0,035	< 0,035
Cr	17-19	16-18
Ti	< 0,6	< 0,7
Fe	Решта	Решта

Для вирішення задачі одержання стикового з'єднання з неповним проваром авторами було запропоновано дослідити технологічні особливості процесу лазерного зварювання на режимах «кинджального» і «теплопровіднісного» проплавлення (рисунок 5). Відповідно, режим «кинджального проплавлення» забезпечував одержання зварних з'єднань з коефіцієнтом форми шва $K_f < 1$, але потребував

більш ретельної механічної підгонки крайок деталей, що зварюються. Зварювання у режимі «теплопровіднісного» проплавлення дає змогу одержати зварне з'єднання з коефіцієнтом форми шва $K_f \geq 1$, що характерний для аргонодугового зварювання. При цьому об'єм переплавленого металу більший, що дозволяє не підвищувати вимоги до підгонки крайок перед зварюванням.

Для визначення технологічних особливостей лазерного зварювання зварних з'єднань з різномірних нержавіючих аустенітних сталей у вертикальному просторовому положенні роботи виконували за наступною методикою:

1. З механічно підготовлених заготовок розміром 300×100 мм з листів товщиною по 3,0 мм зі сталей 10X18H10T (з границею міцності $\sigma_B = 520...550$ МПа) та 10X17H13M3T (з границею міцності $\sigma_B = 510...540$ МПа) зварювали такі контрольні стикові з'єднання у вертикальному просторовому положенні з неповним проваром по товщині: прямолінійне стикове з коефіцієнтом форми шва $K_f < 1$ (рисунок 5, а); прямолінійне стикове з коефіцієнтом форми шва $K_f \geq 1$ (рисунок 5, б).

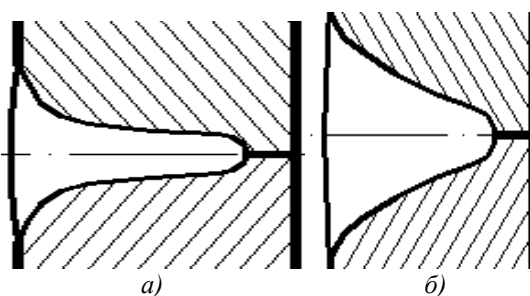


Рисунок 5 – Схематичне зображення стикових зварних з'єднань з коефіцієнтами форми шва $K_f < 1$ (а) та $K_f \geq 1$ (б)

2. Для кожного з одержаних стикових зварних з'єднань з різномірних сталей виконували візуальний та радіографічний контроль, металографічні дослідження та визначали їх мікротвердість.

3. На підставі аналізу результатів досліджень визначали параметри технологічних режимів зварювання кільцевих зварних з'єднань з різномірних сталей.

4. Зразки типу «пластина-труба» (рисунок 6), готували з заготовок із листової сталі 10X17H13M3T (товщиною 3 мм) розміром 100×100 мм з отвором діаметром 20 мм, які зварювали кільцевим швом із трубними заго-

товками довжиною 100 мм зі сталі 10X18H10T (із зовнішнім діаметром труби 20 мм і товщиною стінки 1,5 мм), при горизонтальному розташуванні труби, в результаті варіювання параметрів технологічних режимів одержували кільцеві стикові зварні з'єднання з неповним проваром труби з листом з коефіцієнтом форми шва $K_f < 1$ та $K_f \geq 1$.

5. Кожне з одержаних кільцевих зварних з'єднань типу «пластина-труба» тестували за п. 2.



Рисунок 6 – Фотографія з'єднання типу «пластина-труба» після лазерного зварювання

6. На підставі аналізу результатів досліджень визначали найбільш доцільні параметри технологічних режимів зварювання кільцевих зварних з'єднань з різномірних сталей для вварювання заглушок у теплообмінні трубки парогенераторів.

Роботи з визначення технологічних особливостей одержання кільцевих зварних з'єднань з нержавіючих сталей у вертикальному просторовому положенні виконували на лабораторному стенді (рисунок 7), з використанням Nd:YAG-лазера «DY044» виробництва фірми «ROFIN-SINAR» (Німеччина) з довжиною хвилі випромінювання 1,06 мкм.

Результати експериментальних досліджень. Параметри технологічних режимів лазерного зварювання контрольних прямолінійних стикових з'єднань з листових зразків, виконаних у вертикальному просторовому положенні, змінювали у таких діапазонах: швидкість зварювання – 17...100 мм/с; величина розфокусування – -1...+7 мм; потужність лазерного випромінювання – 1,65...4,4 кВт. У дослідженнях використовували лінзу з фокусною відстанню 300 мм та аргон як захисний газ з витратами 333 см³/с.

Для одержаних прямолінійних контрольних стикових з'єднань з листових зразків застосовували критерії оцінки якості, що задовольняють вимогам стандарту ДСТУ EN ISO

13919-1:2015 «Зварювання. З'єднання, виконані електронно-променевим та лазерним зварюванням. Настанова щодо оцінювання рівня якості залежно від дефектів. Частина 1. Сталь».



а)



б)

а) фото стенду;
б) з'єднання типу «пластина-труба» при зварюванні

Рисунок 7 – Лабораторний стенд для вивчення технологічних особливостей лазерного зварювання стикових прямолінійних та кільцевих зварних з'єднань у вертикальному положенні

Встановлено, що характерними дефектами, які утворюються при лазерному зварюванні прямолінійних контрольних стикових з'єднань листових зразків з нержавіючих сталей у вертикальному просторовому положенні, можуть бути подрізи, несплавлення, усадоч-

ні раковини та раковини у кратері, перевищення випуклості, поодинокі пори та порожнини або їхні ланцюжки (рисунк 8).



Рисунок 8 – Рентгенограма кільцевого стикового зварного з'єднання з дефектами у вигляді ланцюжків пор та порожнин

За результатами аналізу даних металографічних досліджень, візуального та радіографічного контролю контрольних стикових з'єднань листових зразків були обрані діапазони параметрів технологічних режимів лазерного зварювання, які давали можливість одержувати стикові зварні з'єднання категорії якості не нижче «С» згідно з ДСТУ EN ISO 13919-1:2015.

На цих режимах були виготовлені зварні з'єднання за запропонованими вище технологічними варіантами вварювання заглушок: кільцеві стикові з'єднання у вертикальному положенні з коефіцієнтом форми шва $K_f < 1$ та $K_f \geq 1$ з неповним проваром.

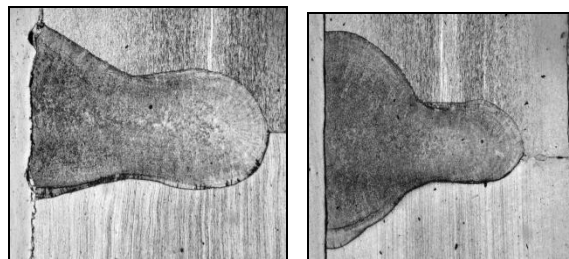
У ході проведення механічних випробувань на статичний одноосовий розтяг отримано наступні значення зміни зусилля руйнування при статичному розтягу кільцевих стикових зварних з'єднань типу «пластина-труба» зі сталей 10X18H10T (труба) і 10X17H13M3T (пластина):

- для зразків з коефіцієнтом форми шва $K_f \geq 1$ границя міцності $\sigma_B = 510...530$ МПа;
- для зразків з коефіцієнтом форми шва $K_f < 1$ границя міцності $\sigma_B = 460...475$ МПа.

На рисунку 9, а, зображено макрошліф, характерний для кільцевих стикових зварних з'єднань типу «пластина-труба» зі сталей 10X18H10T і 10X17H13M3T (товщиною по 3 мм), зварених з неповним проваром у вертикальному просторовому положенні, з коефіцієнтом форми шва $K_f < 1$ (згідно з варіантом № 1 вварювання заглушки).

Структура металу шва зварного з'єднання, зображеного на рисунку 9, а, дис-

персна лита та розділена на дві зони. В центральній частині шва по всій висоті спостерігається комірчасто-дендритна структура. В середній частині шва ближче до лінії сплавлення – зона тонких стовпчастих кристалітів, що ростуть у напрямку відводу тепла.



а) з'єднання з $K_f < 1$; б) з'єднання з $K_f \geq 1$

Рисунок 9 – Фото макрошліфів (x50) зварних з'єднань зі сталей 10X18H10T і 10X17H13M3T

Зони розділені лінією більш дрібних кристалітів (рисунк 9). Мікроструктура в центральній частині шва являє собою аустенітну матрицю з невеликою кількістю δ-фериту (1,5...1,7 %). Розмір комірок становить в основному 12...13 мкм. Твердість металу шва у центральній частині становить HV1 2950...3090 МПа. Є ділянки, де твердість підвищується до HV1 3200...3380 МПа. У нижній частині шва твердість досягає значень HV1 3320...3650 МПа. На лінії сплавлення мікроструктура також складається з аустеніту і δ-фериту, але структура дрібніша, ніж у центрі шва. Ширина кристалітів становить 2...9 мкм. Твердість металу на лінії сплавлення становить HV1 2990...3030 МПа, є окремі ділянки, де твердість підвищується до HV1 3160 МПа. У металі шва спостерігаються нітриди (у значній кількості). Зона термічного впливу (ЗТВ) не виражена, її структура складається з аустеніту і δ-фериту. Бал зерна в ЗТВ зварного з'єднання – № 6. Твердість ЗТВ становить HV1 2650...2840 МПа. У ЗТВ спостерігаються нітриди.

На рисунку 9, б зображено макрошліф, характерний для стикових зварних з'єднань зі сталі 10X18H10T (товщиною по 3 мм), зварених з неповним проваром у вертикальному просторовому положенні, з коефіцієнтом форми шва $K_f \geq 1$ (згідно з варіантом № 2 вварювання заглушки). У цьому зварному з'єднанні структура металу шва також дисперсна лита з аналогічним поділом на дві характерні зони: комірчасто-дендритну в центрі і тонких стов-

частих кристалітів в середині. Кількість δ -фериту зростає до 1,7...1,9 %. Розмір комірок змінюється до 13...17 мкм. Твердість металу шва цього зварного з'єднання у центральній частині становить HV1 2730...2870 МПа, є ділянки, де твердість підвищується до HV1 2920...3090 МПа, а в нижній частині шва твердість підвищується до HV1 3140...3320 МПа. Ширина кристалітів на лінії сплавлення становить 4...9 мкм. Твердість металу на лінії сплавлення знижується до HV1 2880...2990 МПа, але є окремі ділянки з підвищеною (до HV1 3040 МПа) твердістю. У металі шва спостерігаються нітриди (в значній кількості). Зона термічного впливу виражена слабо. Бал зерна у ЗТВ зварного з'єднання – № 7, а твердість – HV1 2600...2780 МПа.

За результатами механічних випробувань на статичний розтяг встановлено, що для кільцевих стикових зварних з'єднань типу «пластина-труба» з коефіцієнтом форми шва $K_f \geq 1$ зусилля руйнування приблизно на 11 % вище порівняно зі з'єднаннями з коефіцієнтом форми шва $K_f < 1$.

Порівняння даних показує, що зусилля руйнування для кільцевих стикових зварних з'єднань типу «пластина-труба» зі сталей 10X18H10T (труба) і 10X17H13M3T (пластина) становить не менше 80 % зусилля руйнування основного матеріалу труби (сталі 10X18H10T).

Обговорення результатів. З метою визначення впливу параметрів лазерного зварювання на характеристики одержаних з'єднань проведено аналіз результатів візуального та радіографічного контролю, металографічних досліджень, випробувань на статичний розтяг. Було одержано графічні залежності характеристик одержаних з'єднань від найбільш впливових факторів (параметрів технологічних режимів).

Встановлено, що при виконанні вварювання заглушки за технологічним варіантом № 1 ($K_f < 1$, див. рисунок 5, а) при збільшенні швидкості зварювання з 47 мм/с до 63...72 мм/с сумарна проекція пор (загальна площа пор, виявлена при радіографічному контролі) зменшується з 0,45 % (від загальної площі зварного з'єднання) до 0,14 % (рисунок 10).

Найменше значення сумарної кількості проекцій пор (0,14 %) зафіксовано при розфокусуванні –1 мм, що майже в 1,5 разу менше

порівняно зі зварюванням з аналогічними параметрами по швидкості та потужності лазерного випромінювання, але з величиною розфокусування +2 мм (рисунок 10).

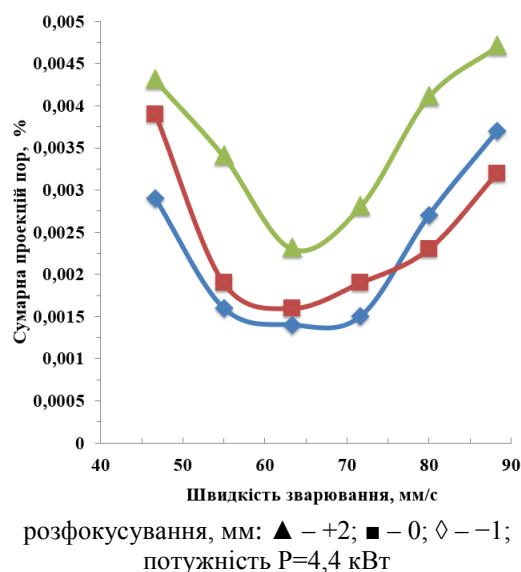


Рисунок 10 – Сумарна площа проекцій пор залежно від швидкості та величини розфокусування лазерного зварювання за технологічним варіантом № 1 ($K_f < 1$)

Окрім того, спостерігається більша стабільність у формуванні незначного підсилення (0,7...0,4 мм) верхнього валика шва зварного з'єднання при збільшенні швидкості лазерного зварювання з 47 мм/с до 88 мм/с, відповідно (рисунок 11).

При виконанні вварювання заглушки за технологічним варіантом № 2 ($K_f \geq 1$, див. рисунок 5, б), спостерігається зменшення сумарної проекції пор з 0,5 % до 0,09 % при збільшенні швидкості зварювання з 7,0 мм/с до 13...16 мм/с (рисунок 11).

Розфокусування на –1 мм відносно поверхні деталей, що зварюються, призводить до суттєвого зниження сумарної проекції пор (рисунок 12).

Порівняно зі зварюванням з аналогічними параметрами по швидкості та потужності лазерного випромінювання, але з величиною розфокусування +1 мм, одержані значення майже в 2,5 разу менші (рисунок 12).

Також розфокусування на –1 мм сприяє одержанню стабільного формування верхнього валика з підсиленням шва зварного з'єднання (0,7...0,2 мм) при збільшенні швидкості лазерного зварювання з 7 мм/с до 23 мм/с, відповідно (рисунок 13).

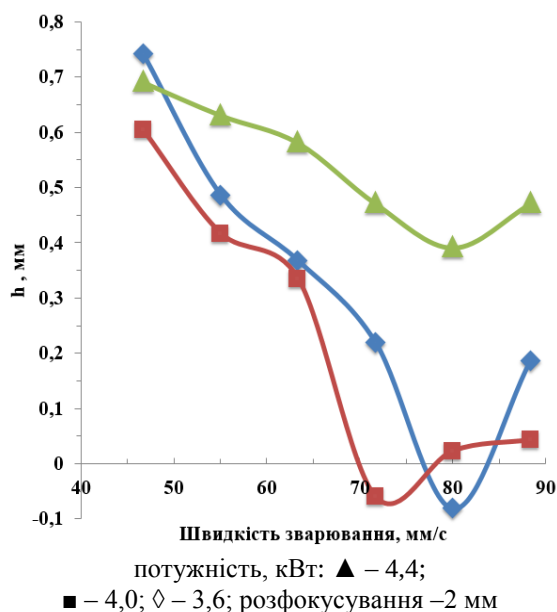


Рисунок 11 – Підсилення верхнього валика шва зварного з'єднання залежно від швидкості лазерного зварювання за технологічним варіантом № 1 ($K_{\phi} < 1$)

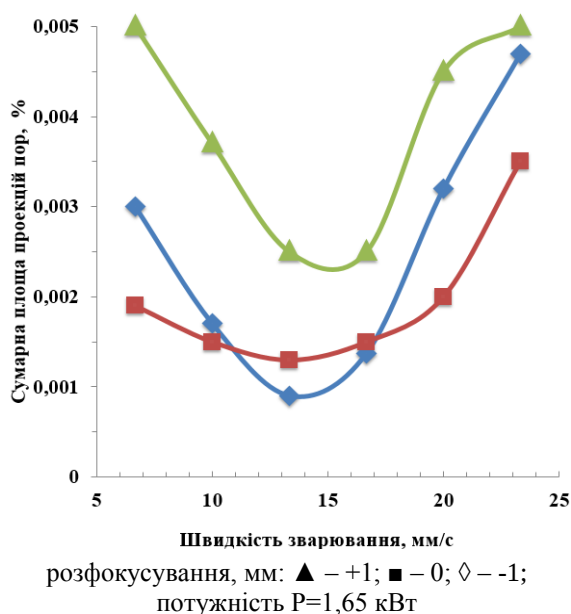


Рисунок 12 – Сумарна площа проєкцій пор залежно від швидкості лазерного зварювання за технологічним варіантом № 2 ($K_{\phi} \geq 1$)

Було виявлено всі види дефектів отриманих з'єднань. Розроблені й перевірені на практиці засоби усунення цих дефектів та їх запобігання наведено у таблиці 2.

Проведений комплексний аналіз результатів досліджень та випробувань дав змогу визначити для кожного з технологічних варіантів вварювання заглушок режими зва-

рювання. Критерієм відбору доцільних параметрів режимів лазерного зварювання кільцевих стикових зварних з'єднань служили умови відповідності вимогам категорії якості «високий В» стандарту ДСТУ EN ISO 13919-1:2015.

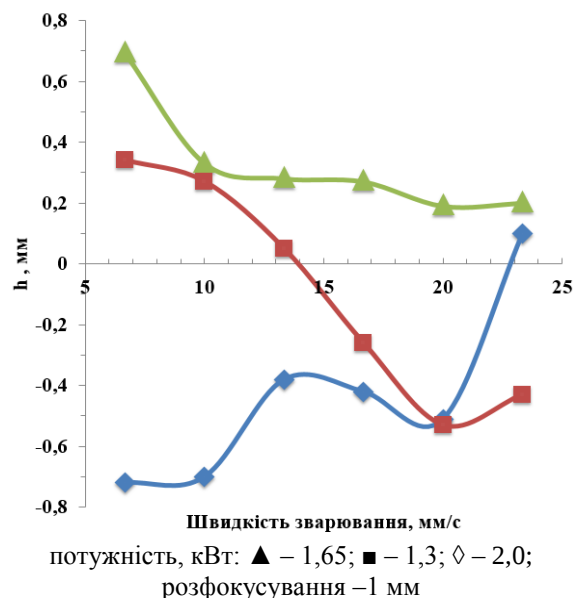


Рисунок 13 – Підсилення верхнього валика шва зварного з'єднання залежно від швидкості лазерного зварювання за технологічним варіантом № 2 ($K_{\phi} \geq 1$)

Таблиця 2 – Засоби усунення дефектів або їх запобігання

Дефекти	Усунення / запобігання
пори, ланцюжки пор, несплавлення, заниження шва, непровари	переварювання шва з додаванням присадкового матеріалу (за необхідністю) / -
усадочні раковини та раковини в кратері	- / програмне управління плавним наростанням і спаданням потужності лазерного променя на початку та в кінці шва
підрізи, перевищення випуклості	- / додаткове переплавлення розфокусованим променем
збільшення площі перерізу зварного з'єднання	- / розширення зони дії лазерного променя подільником лінзового об'єктива

Лазерне зварювання кільцевих стикових зварних з'єднань має наступні технологічні особливості:

1. Наявна ділянка наростання потужності лазерного випромінювання на початку зварювання та ділянка спадання в кінці для запобігання утворенню усадочних раковин та раковин у кратері.

2. Параметри технологічних режимів (потужність лазерного випромінювання; час та швидкість зварювання; розташування фокусу лінзи тощо) для ділянки наростання потужності лазерного випромінювання на початку зварювання та ділянки спадання в кінці повинні бути визначені емпірично для кожного варіанта.

3. Ділянки швів на початку та у кінці зварювання, які не відповідають умовам досягнення необхідної глибини 1,5 мм, потребують повторного переварювання для забезпечення заданої глибини провару.

4. На відміну від дугового зварювання, немає необхідності коригувати параметри (потужність лазерного випромінювання; час та швидкість зварювання) залежно від проходження ділянки умовного годинника, тому що після проходження ділянки з одночасним наростанням потужності лазерного випромінювання та швидкості зварювання процес стабілізується і на всіх ділянках зварювання умовного годинника («на спуск» з 12 до 6-ї години та напрямком за годинниковою стрілкою; «на підйом» з 6 до 12-ї години та напрямком за годинниковою стрілкою тощо) можливе досягнення заданої глибини провару.

5. Напрямок руху при зварюванні за годинниковою стрілкою умовного годинника чи проти неї не має значного впливу на структуру та характеристики зварного з'єднання при досягненні заданої глибини.

6. Місце початку зварювання впливає на розміри ділянки шва, на якій процес зварювання стабілізується та досягається задана глибина провару.

7. Для одержання рівня якості «В високий» рекомендується для зварних з'єднань з коефіцієнтом форми шва $K_f < 1$ місцем початку руху обирати «9 годин» умовного годинника, а напрямком руху – за годинниковою стрілкою.

8. Для одержання рівня якості «В високий» рекомендується для зварних з'єднань з коефіцієнтом форми шва $K_f \geq 1$ місцем початку руху обирати «3 години» умовного годинника, а напрямком руху – за годинниковою стрілкою.

Емпіричним шляхом визначено параметри зварювання, необхідні для одержання кільцевих стикових з'єднань зі сталей 10X18H10T

та 10X17H13M3T у вертикальному положенні з коефіцієнтом форми шва $K_f < 1$ з неповним проваром, що відповідають вимогам категорії якості «високий В» стандарту ДСТУ EN ISO 13919-1:2015.

Технологічні рекомендації з лазерного зварювання заглушок. На основі результатів досліджень, розроблених технологічних прийомів та визначених параметрів процесу зварювання сформульовано технологічні рекомендації з лазерного зварювання заглушок у теплообмінні трубки колектору парогенератора типу ПГВ-1000М при його ремонті.

Лазерне зварювання запропоновано виконувати з наступними технологічними параметрами (за режимом № 1331.2): потужність лазерного випромінювання – 4,4 кВт; швидкість зварювання – 63,3 мм/с; величина розфокусування – 1 мм; витрати захисного газу (аргон) – 333 см³/с; початок руху – з «9 годин» умовного годинника; напрямком руху – за годинниковою стрілкою. Під час виконання зварювання за режимом № 1331.2 механізм переміщення здійснює два повні оберти за годинниковою стрілкою, а потужність лазерного випромінювання змінюється програмою за циклом, зображеним на рисунку 14. Завдяки цьому забезпечуються етапи зростання глибини провару, її стабілізації та зменшення, а також відсутність дефектів у вигляді кратерів (рисунк 15).

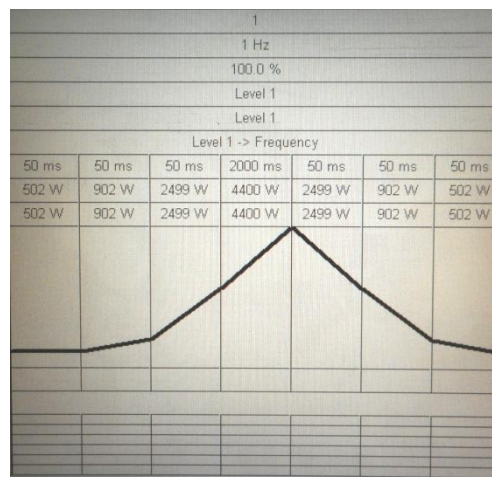


Рисунок 14 – Циклограма програми управління потужністю лазерного випромінювання при зварюванні за режимом № 1331.2

Для одержання кільцевих стикових з'єднань зі сталей 10X18H10T та 10X17H13M3T у вертикальному положенні з коефіцієнтом форми шва $K_f \geq 1$ з неповним

проваром, що відповідають вимогам категорії якості «високий В» стандарту ДСТУ EN ISO 13919-1:2015, лазерне зварювання запропоновано виконувати з наступними параметрами технологічних режимів: за режимом № 1330.1 потужність лазерного випромінювання – 1,65 кВт; швидкість зварювання – 13,3 мм/с; заглиблення фокусу на 1 мм; витрати захисного газу (аргон) – 333 см³/с; початок руху – з «3 годин» умовного годинника; напрямку руху – за годинниковою стрілкою.



Рисунок 15 – Зварне з'єднання, одержане на режимі № 1331.2

Під час виконання зварювання за вищевказаним режимом № 1330.1 механізм переміщення також здійснює два повні оберти за годинниковою стрілкою, а потужність лазерного випромінювання змінюється програмою за циклом, зображеним на рисунку 16. З'єднання, зварене на зазначеному режимі, зображено на рисунку 17.

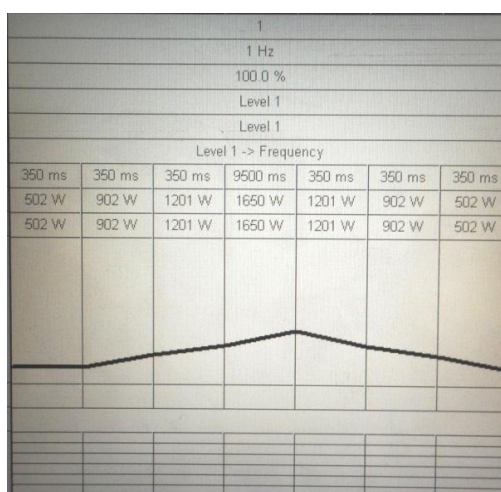


Рисунок 16 – Циклограма програми управління потужністю лазерного випромінювання при зварюванні за режимом № 1330.1



Рисунок 17 – Зварне з'єднання, одержане за режимом № 1330.1

Висновки:

1. Лазерне зварювання є перспективною технологією для заміни аргонодугового зварювання при ремонті теплообмінників парогенераторів на атомних і теплових електростанціях, про що свідчать результати проведених досліджень. Воно забезпечує вкрай локальний термічний вплив та підвищує експлуатаційний ресурс зварних з'єднань.

2. Для запропонованих зварних з'єднань заглушок з коефіцієнтами форми шва $K_f < 1$ та $K_f \geq 1$ можна вибрати технологічні параметри, для яких результати механічних випробувань, візуального та радіографічного контролю, випробувань на непроникність та металографічних досліджень свідчать про відповідність вимогам рівня якості «високий В» згідно зі стандартом ДСТУ EN ISO 13919-1:2015.

3. Аналіз основних причин виникнення дефектів при лазерному зварюванні кільцевих зварних з'єднань з різномірних нержавіючих сталей дав можливість запропонувати і перевірити на практиці заходи усунення цих дефектів та запобігання їх утворенню.

4. Технологічні рекомендації з лазерного зварювання заглушок у теплообмінні трубки при ремонті колектору парогенератора типу ПГВ-1000М можливо застосовувати також при ремонті інших енергетичних об'єктів.

Список літератури

- [1] B. Ge, and J. Zhang, "Modeling of main steam and two-phase heat exchanger for nuclear power unit," in *IEEE 2nd Int. Conf. Computing, Control and Industrial Engineering*, Wuhan, 2011, pp. 337-340. doi: 10.1109/CCIENG.2011.6008027
- [2] Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енер-

- гоатом», «Стратегічний план розвитку державного підприємства «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» на 2018-2022 роки», *Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом»*, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.energoatom.com.ua/files/file/strateg_chniy_plan_2018_2022_04042018.pdf. Дата звернення: Листоп. 19, 2019.
- [3] H. Bastida, C. E. Ugalde-Loo, M. Abeysekera, X. Xu, and M. Qadrdan, "Dynamic modelling and control of counter-flow heat exchangers for heating and cooling systems", in *54th Int. Universities Power Engineering Conf. (UPEC)*, Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-6.
doi: 10.1109/UPEC.2019.8893634
- [4] J. Xu, R. Z. Wang, and Y. Li, "A review of available technologies for seasonal thermal energy storage", *Solar Energy*, vol. 103, pp. 610-638, 2013.
- [5] L. Qoaidar, Q. Thabit, and S. Kiwan, "Performance assessment of a moving-bed heat exchanger with a sensible heat transfer medium for solar central receiver power plants", in *8th Int. Renewable Energy Congress (IREC)*, Amman, 2017, pp. 1-5.
doi: 10.1109/IREC.2017.7926051
- [6] T. Baumann, S. Zunft, and R. Tamme, "Moving bed heat exchangers for use with heat storage in concentrating solar plants: a multiphase model", *Heat Transfer Engineering*, vol. 35, pp. 224-231, 2013.
- [7] F. Middleton, "An all metal UHV flange seal for dissimilar materials", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 28, no. 3, pp. 3298-3299, June 1981.
doi: 10.1109/TNS.1981.4332084
- [8] Q. Yin, and Y. Li, "Straight wave UT technical for dissimilar metal weld of nozzle to safe-end in reactor pressure vessel", in *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing*, Chengdu, 2014, pp. 122-127.
doi: 10.1109/FENDT.2014.6928246
- [9] H. Chen, Z. Yu, W. Wang, G. Ma, and M. Hong, "Research on ultrasonic inspection of control rod drive mechanism housing weld in Chinese evolutionary pressurized reactor nuclear power plant," in *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing*, Chengdu, 2014, pp. 128-134.
doi: 10.1109/FENDT.2014.6928247
- [10] L. V. Petrushynets, I. V. Falchenko, A. I. Usatinov, O. O. Novomlynets, and S. M. Yushchenko, "Vacuum diffusion welding of intermetallic alloy γ -TiAl with high-temperature alloy EI437B through nanolayered interlayers", in *IEEE 2nd Ukr. Conf. Electr. and Comp. Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 542-546.
doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879918
- [11] J. Thamprajamjit, and P. Surin, "Dissimilar metal joining between stainless steel SUS304 and carbon steel SS400 using plasma arc welding process", in *2nd Int. Conf. Engineering Innovation (ICEI)*, Bangkok, 2018, pp. 42-45.
doi: 10.1109/ICEI18.2018.8448663
- [12] M. Cavallini, P. Veronesi, L. Lusvarghi, E. Colombini, R. Giovanardi, and L. Rigon, "Optimization of laser welding of dissimilar corrosion resistant alloys", in *IEEE 3rd Int. Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*, Modena, 2017, pp. 1-5.
doi: 10.1109/RTSI.2017.8065935
- [13] Парогенератор ПГВ-1000М. Описание и основные характеристики. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://desnogorskspktr.ru/aes/teoriya-aes/parogenerator-pgv-1000m-opisanie-i-osnovnye-harakteristiki.html>. Дата обращения: Нояб. 19, 2019.
- [14] О. П. Шугайло, "Напружено-деформований стан трубчатих елементів парогенераторів при аварійних ситуаціях", дис. канд. техн. наук, НАН України, Ін-т механіки ім. С. П. Тимошенка. Київ, 2019.
- [15] Т. Х. Маргулова, *Атомные электрические станции*. Москва: Высшая школа, 1984.
- [16] М. Н. Заразовский, М. В. Бородий, и В. Я. Козлов, "Риск-ориентированный подход к прогнозированию целостности и оптимизации контроля теплообменного оборудования с большой статистикой дефектов", *Ядерна та радіаційна безпека*, № 4, с. 32-38, 2016.
- [17] IAEA-TECDOC-1577. Strategy for Assessment of WWER Steam Generator Tube Integrity, Vienna: IAEA, 2007.
- [18] V. V. Müller, and V. N. Mitroshin, "Automatic system of shape weld stabilization with manual and mechanized argon-arc welding by non-consumable electrode", in

- Int. Rus. Automation Conf. (RusAutoCon)*, Sochi, 2018, pp. 1-5.
doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501708
- [19] M. Bodeau, "Mitigating potential hazards of TIG welding on spacecraft", in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 1, pp. 90-99, Feb. 2019.
doi: 10.1109/TEMPC.2018.2813331
- [20] A. R. Kohandehghan, S. Serajzadeh, and A. H. Kokabi, "A study on residual stresses in gas tungsten arc welding of AA5251", *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 25, pp. 1242-1250, 2010.
- [21] L. Markashova, O. Berdnikova, A. Bernatskyi, M. Iurzenko, and V. Sydorets, "Physical and mechanical properties of high-strength steel joints produced by laser welding", *IEEE Int. Young Scientists Forum on Appl. Physics and Engineering (YSF)*, Lviv, 2017, pp. 88-91.
doi: 10.1109/YSF.2017.8126596
- [22] S. Katayama, *Handbook of laser welding technologies*. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd., 2013.
- [23] A. Kurc-Lisiecka, A. Lisiecki, "Laser welding of the new grade of advanced high-strength steel DOMEX 960", *Materiali in tehnologije / Materials and technology*, vol. 51, no. 7, pp. 199-204, 2017.
- [24] Technologies for non-destructive testing and repair of NPP components NUSIM 2008 VUJE. [Online]. Available: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/124/43124116.pdf
- [25] L. Markashova, O. Berdnikova, A. Bernatskyi, V. Sydorets, and O. Bushma, "Crack resistance of 14KhGN2MDAFB high-strength steel joints manufactured by laser welding", *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, vol. 224, iss. 1, p. 012013, 2019.
doi:10.1088/1755-1315/224/1/012013
- [26] H. Vemanaboina, S. Akella, R. K. Buddu, and E. Gundabattini, "Distortion validation of laser beam welded SS316LN steel plates", *8th Int. Conf. Modeling Simulation and Appl. Optimization (ICMSAO)*, Manama, Bahrain, 2019, pp. 1-5.
doi: 10.1109/ICMSAO.2019.8880444
- [27] H. Murakawa, "Residual stress and distortion in laser welding", in *Handbook of Laser Welding Technologies*, Cambridge, Woodhead Publishing Ltd., 2013, pp. 374-400.
- ### References
- [1] B. Ge, and J. Zhang, "Modeling of main steam and two-phase heat exchanger for nuclear power unit," in *IEEE 2nd Int. Conf. Computing, Control and Industrial Engineering*, Wuhan, 2011, pp. 337-340.
doi: 10.1109/CCIENG.2011.6008027
- [2] State enterprise "National atomic energy generating company "Energoatom", "Strategic development plan of the state enterprise "National atomic energy generating company "Energoatom" for 2018-2022," *State enterprise "National atomic energy generating company "Energoatom"*, 2018. [Online]. Available: http://www.energoatom.com.ua/files/file/strateg_chniy_plan_2018_2022_04042018.pdf. Accessed on: Nov. 19, 2019.
- [3] H. Bastida, C. E. Ugalde-Loo, M. Abeysekera, X. Xu, and M. Qadrdan, "Dynamic modelling and control of counter-flow heat exchangers for heating and cooling systems", in *54th Int. Universities Power Engineering Conf. (UPEC)*, Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-6.
doi: 10.1109/UPEC.2019.8893634
- [4] J. Xu, R. Z. Wang, and Y. Li, "A review of available technologies for seasonal thermal energy storage", *Solar Energy*, vol. 103, pp. 610-638, 2013.
- [5] L. Qoaider, Q. Thabit, and S. Kiwan, "Performance assessment of a moving-bed heat exchanger with a sensible heat transfer medium for solar central receiver power plants", in *8th Int. Renewable Energy Congress (IREC)*, Amman, 2017, pp. 1-5.
doi: 10.1109/IREC.2017.7926051
- [6] T. Baumann, S. Zunft, and R. Tamme, "Moving bed heat exchangers for use with heat storage in concentrating solar plants: a multiphase model", *Heat Transfer Engineering*, vol. 35, pp. 224-231, 2013.
- [7] F. Middleton, "An all metal UHV flange seal for dissimilar materials", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 28, no. 3, pp. 3298-3299, June 1981.
doi: 10.1109/TNS.1981.4332084
- [8] Q. Yin, and Y. Li, "Straight wave UT technical for dissimilar metal weld of nozzle to safe-end in reactor pressure vessel", in *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing*, Chengdu, 2014, pp. 122-127.
doi: 10.1109/FENDT.2014.6928246

- [9] H. Chen, Z. Yu, W. Wang, G. Ma, and M. Hong, "Research on ultrasonic inspection of control rod drive mechanism housing weld in Chinese evolutionary pressurized reactor nuclear power plant," in *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing*, Chengdu, 2014, pp. 128-134. doi: 10.1109/FENDT.2014.6928247
- [10] L. V. Petrushynets, I. V. Falchenko, A. I. Ustinov, O. O. Novomlynets, and S. M. Yushchenko, "Vacuum diffusion welding of intermetallic alloy γ -TiAl with high-temperature alloy EI437B through nanolayered interlayers", in *IEEE 2nd Ukr. Conf. Electr. and Comp. Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 542-546. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879918
- [11] J. Thamprajamjit, and P. Surin, "Dissimilar metal joining between stainless steel SUS304 and carbon steel SS400 using plasma arc welding process", in *2nd Int. Conf. Engineering Innovation (ICEI)*, Bangkok, 2018, pp. 42-45. doi: 10.1109/ICEI18.2018.8448663
- [12] M. Cavallini, P. Veronesi, L. Lusvarghi, E. Colombini, R. Giovanardi, and L. Rigon, "Optimization of laser welding of dissimilar corrosion resistant alloys", in *IEEE 3rd Int. Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*, Modena, 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/RTSI.2017.8065935
- [13] PGV-1000M steam generator. Description and main features. [Online]. Available: <http://desnogorskyspektr.ru/aes/teoriya-aes/parogenerator-pgv-1000m-opisanie-i-osnovnye-harakteristiki.html>. Accessed on: Nov. 19, 2019.
- [14] O. P. Shugaylo, "Stress-strain state of tubular elements of steam generators in emergency situations", Ph.D. dissertation, NAS of Ukraine, S. P. Tymoshenko Institute of Mechanics. Kyiv, 2019 [in Ukrainian].
- [15] T. Kh. Margulova, *Nuclear power plants*. Moscow: Vysshaya shkola, 1984 [in Russian].
- [16] M. Kh. Zarazovskii, M. V. Borodii, and V. Ja. Kozlov, "Risk-oriented approach to the prediction of integrity and optimization of the control of heat exchange equipment with high defect statistics", *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, vol. 4, pp. 32-38, 2016 [in Russian].
- [17] IAEA-TECDOC-1577. Strategy for Assessment of WWER Steam Generator Tube Integrity, Vienna: IAEA, 2007.
- [18] V. V. Müller, and V. N. Mitroshin, "Automatic system of shape weld stabilization with manual and mechanized argon-arc welding by non-consumable electrode", in *Int. Rus. Automation Conf. (RusAutoCon)*, Sochi, 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501708
- [19] M. Bodeau, "Mitigating potential hazards of TIG welding on spacecraft", in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 1, pp. 90-99, Feb. 2019. doi: 10.1109/TEMPC.2018.2813331
- [20] A. R. Kohandehghan, S. Serajzadeh, and A. H. Kokabi, "A study on residual stresses in gas tungsten arc welding of AA5251", *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 25, pp. 1242-1250, 2010.
- [21] L. Markashova, O. Berdnikova, A. Bernatskyi, M. Iurzhenko, and V. Sydorets, "Physical and mechanical properties of high-strength steel joints produced by laser welding", *IEEE Int. Young Scientists Forum on Appl. Physics and Engineering (YSF)*, Lviv, 2017, pp. 88-91. doi: 10.1109/YSF.2017.8126596
- [22] S. Katayama, *Handbook of laser welding technologies*. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd., 2013.
- [23] A. Kurc-Lisiecka, A. Lisiecki, "Laser welding of the new grade of advanced high-strength steel DOMEX 960", *Materiali in tehnologije / Materials and technology*, vol. 51, no. 7, pp. 199-204, 2017.
- [24] Technologies for non-destructive testing and repair of NPP components NUSIM 2008 VUJE. [Online]. Available: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/124/43124116.pdf
- [25] L. Markashova, O. Berdnikova, A. Bernatskyi, V. Sydorets, and O. Bushma, "Crack resistance of 14KhGN2MDAFB high-strength steel joints manufactured by laser welding", *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, vol. 224, iss. 1, p. 012013, 2019. doi:10.1088/1755-1315/224/1/012013
- [26] H. Vemanaboina, S. Akella, R. K. Buddu, and E. Gundabattini, "Distortion validation of laser beam welded SS316LN steel

plates", *8th Int. Conf. Modeling Simulation and Appl. Optimization (ICMSAO)*, Manama, Bahrain, 2019, pp. 1-5.
doi: 10.1109/ICMSAO. 2019.8880444

[27] H. Murakawa, "Residual stress and distortion in laser welding", in *Handbook of Laser Welding Technologies*, Cambridge, Woodhead Publishing Ltd., 2013, pp. 374-400.

A. V. Bernatskyi, Ph. D.,

V. D. Sheliagin, Ph. D., senior researcher,

V. M. Sydorets, D. Tech. Sc., professor,

O. M. Berdnikova, Ph. D., senior researcher,

O. V. Siora, researcher,

T. M. Nabok, junior researcher

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine

K. Malevycha str., 11, Kyiv, 03150, Ukraine

DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL FEATURES OF LASER WELDING OF BUTT JOINTS OF DIFFERENT STAINLESS AUSTENITIC STEELS IN VERTICAL SPATIAL POSITION

The problem of repair of collectors of steam generators of nuclear power plants (NPPs) has become extremely urgent today. The way of pressurization of heat exchange tubes by plugs is promising, provided the quality of the joints is high. Practical experience in the use of welding to solve this problem has shown the need to find technological solutions related to increasing the depth of penetration and reducing the thermal impact area. The purpose of the work was to determine technological features of laser welding of joints of heterogeneous stainless austenitic steels in vertical spatial position with subsequent application of the results to solve the above problem. Two technological options for plugs welding in using rectilinear and annular butt joints in vertical position with different weld shape factors have been proposed. Laser welding modes have been worked out and samples of welded joints have been made. According to the results of the analysis of the data of mechanical tests, visual and radiographic control, tightness tests and metallographic studies, the appropriate modes of laser welding of plugs for each of the two options have been determined. The annular butt welded joint of the type "plate-pipe" of 10X18H10T (pipe) and 10X17H13M3T (plate) steels, made in vertical position, was the main type. Static tensile test data indicate that for welds with a joint ratio of greater than one, a fracture force of about 11% higher is achieved compared to joints of less than one. The main causes of defects in laser welding of annular welded joints of heterogeneous stainless steels are revealed and the ways of their elimination and prevention of their appearance are offered. Principal technological techniques of laser welding of annular welded joints of heterogeneous steels in different spatial positions have been developed. On the basis of the results of the conducted researches technological recommendations on laser welding of plugs in heat exchange tubes of the collector have been formulated, which will significantly improve the technology of repair of steam generators of nuclear power plants.

Keywords: laser welding, annular butt joints, stainless steels, heterogeneous welded joints, spatial position, steam generator, nuclear power plant, repair.

[0000-0002-2166-7766] **В. І. Осипенко**, д.т.н., професор,
e-mail: osip5906@gmail.com

[0000-0002-5055-1068] **А. В. Кондаков**, аспірант,
e-mail: kondakov.chdtu@gmail.com

[0000-0001-8637-8741] **О. В. Тімченко**, асистент
e-mail: alec.timchenko@gmail.com

Черкаський державний технологічний університет,
б-р Шевченка, 460, Черкаси, 18006, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУГ В ІНСТРУМЕНТАЛЬНІЙ СТАЛІ У7А ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ДРОТЯНОГО ВИРІЗАННЯ

Розглянуто питання визначення залишкової напруги в тонкій пластині зі сталі У7А, робоча поверхня якої в різних технологічних випадках формувалася за різними технологіями, а саме: електроерозійним дротяним вирізанням (ЕЕДВ) повного зйому (пз), додатковими проходками (дп) з різною енергією одиничного іскрового розряду, послідовним пошировим зніманням матеріалу зони термічного впливу (ЗТВ) на високоточних контрольованих режимах електрохімічної розмірної обробки (ЕХРО). Залишкові напруги вперше визначалися шляхом механічного вимірювання залишкових деформацій пластини безпосередньо в робочій ванні верстата (без зняття отриманих зразків) та розрахунків напружень за відомим рівнянням, що описує зв'язок між кривизною зразка та залишковою напругою для одновимірного напруженого випадку. Отримана база даних за розрахунками залишкових напружень у ЗТВ сталі У7А після ЕЕДВ добре корелює з результатами робіт провідних дослідників у царині електроерозійних технологій та процесів взаємодії плазми електричного розряду з металами. Результати дали змогу визначити рівні виникаючих залишкових напруг у ЗТВ сталі У7А після ЕЕДВ і встановити їх залежність від енергії одиничного іскрового розряду. Для конкретного технологічного випадку виявлено, що максимальні значення залишкових напруг релаксують у часі і падають зі зменшенням товщини ЗТВ. Ціком усувати залишкові напруги можливо лише при повному видаленні ЗТВ за технологією нетермічної ЕХРО, тому що режими ЕЕДВ, навіть з мінімальними енергіями розрядів, формують ЗТВ і відповідні залишкові напруги. Отримані в роботі результати можуть бути використані при проектуванні високоточних режимів електроерозійної і комбінованої послідовної електроерозійної та електрохімічної обробки незмінним дротяним електродом. Окрім того, отримано додаткове підтвердження можливостей новітньої комбінованої послідовної електроерозійної та електрохімічної технології керовано не тільки формувати мікрогеометрію поверхонь, але й залишати в поверхневих шарах необхідний рівень залишкових напруг або повністю позбавлятися від них.

Ключові слова: електроерозійне дротяне вирізання, електрохімічна розмірна обробка, залишкова напруга, зона термічного впливу, одиничний іскровий розряд.

Постановка проблеми. Відомо, що електроерозійна обробка спричиняє залишкові напруження розтягу, що утворюються у верхньому шарі оброблюваної поверхні за рахунок термічного формування суттєвих змін у структурі матеріалу деталі у так званій ЗТВ [1].

Функціональна ефективність широкого класу інструментів і деталей суттєво визначається властивостями поверхневих шарів, а також характером розподілу та величиною залишкових напружень поблизу робочих поверхонь. Внаслідок особливостей формування залишкові термонапруги при ЕЕДВ є напругами 1-го роду, тобто вони наявні в макроскопічних масштабах і проходять поперек зерна [2]. Рівень і характер розподілу залишкових термонапруг впливають на стабільність

розмірів, параметри втомної міцності та схильність оброблених поверхонь до корозії. При цьому у деяких випадках після дротяної електроерозії на чорнових режимах (різання повного зйому) спостерігаються великі деформації окремих частин деталі, що робить подальшу обробку неможливою [3]. Тому знання величини та характеру розподілу залишкових напружень є важливою сполучною ланкою між проектуванням технологічного процесу, виробничим процесом і кінцевою якістю заготовки.

Мета. Підвищення ефективності проектування технологічних процесів електроерозійного дротяного вирізання шляхом врахування впливу залишкових термонапруг, які виникають завдяки наявності ЗТВ.

Задачі:

1. Запропонувати схему експерименту по визначенню та розрахунку залишкових термонапруг при використанні електроерозійного вирізного верстата СЕЛД-02М, укомплектованого системою для ЕХРО.

2. Провести серію експериментів і сформувати базу даних для розрахунку залишкових термонапруг у сталі У7А при формуванні поверхні електроерозійним дротяним вирізанням з різною енергією одиничного іскрового розряду з послідовним пошаровим зніманням матеріалу зони термічного впливу на високоточних контрольованих режимах ЕХРО.

3. Встановити закономірності розподілу термонапруг у ЗТВ сталі У7А залежно від енергетичних параметрів режимів ЕЕДВ.

Аналіз останніх досліджень. Незважаючи на значне поширення електроерозійної обробки в сучасному виробництві, робіт, присвячених проблемам залишкових термонапруг, досить мало, особливо стосовно технологій електроерозійного дротяного вирізання. В роботі [4] автори встановили негативний вплив залишкових напружень, спричинених електроерозійною технологією формування поверхонь, на втомну міцність деталей медичної апаратури. Клінк та ін. [5] вивчали розподіл залишкової напруги в поверхневих шарах інструментальної сталі ASP 23, отриманих за технологією ЕЕДВ. При дослідженнях використовувалися точні, але дорогі методи дифракції рентгенівських променів та нейтронної дифракції. Ці прямі методи дають можливість виміряти залишкові напруги 1-го роду і 2-го роду. Отримані результати показали високу зону залишкової напруги в межах 30 мкм від верхньої поверхні. Антар та ін. [6] виявили подібні тенденції. В роботі [7] також показано, що деталі після ЕЕДВ мали високі залишкові напруження в ЗТВ. Їх термін експлуатації за показниками втомної міцності суттєво поступався аналогічним деталям, виготовленим класичним фрезеруванням, які мали у поверхневих шарах стискаючі напруги. В роботі [8] запропоновано математичну модель формування залишкових напруг у ЗТВ при масовій дії високочастотних розрядів. Результати чисельних експериментів задовільно узгоджуються з експериментальними даними. При цьому для зменшення максимальних значень залишкових напружень автори пропонують використовувати розряди з мінімальною енергією, що на практиці, з різних міркувань, складно реалізувати. Таким чином, дослідження напруг, що виникають у ЗТВ сталевих деталей, при використанні енергетичних режимів

різання, характерних для вітчизняних генераторів електроерозійних вирізних верстатів, як і можливості ЕХРО для їх усунення, є сучасними актуальними науковими задачами.

Виклад основного матеріалу. Ця робота – спроба оцінити залишкові термонапруги в сталі У7А залежно від глибини зони структурних змін при електроерозійному дротяному вирізанні шляхом механічного вимірювання залишкових деформацій і розрахунків напружень за відомим рівнянням (1), що описує зв'язок між кривизною зразка та залишковою напругою для одновимірного напруженого випадку. Схему виконання експерименту зображено на рисунку 1. Уявлення про поведінку обробленої пластини можна отримати з рисунка 2.

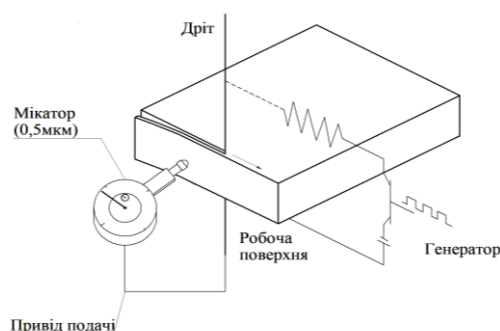


Рисунок 1 – Схема різання та вимірювання деформації зразків у робочій ванні електроерозійного верстата СЕЛД-02М

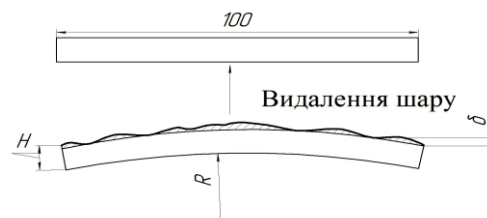


Рисунок 2 – Зміна вигину оброблюваної пластини при видаленні зони термічного впливу

У пластині зі сталі У7А товщиною 20 мм виконувалися пластинчаті надрізи шириною $H=0.5$ мм і довжиною 100 мм як різанням повного зйому, так і додатковими проходками на енергетичних режимах різання, що наведені в таблиці 1. Електричні параметри розрядів на кожному режимі записувалися на цифровий осцилограф, дані з якого оброблялися в системі автоматизованого проектування (САПР) AutoCAD 2010 (рисунок 3). Після кожного проходу за допомогою мікатора (рисунок 1) визначалися величини відхилення в заданих координатах бічної поверхні пластини надрізу від прямолінійного положення.

Отримані дані вносилися в AutoCAD 2010, за допомогою якого визначався реальний радіус кривизни пластини. Після електроерозії установка перемикалася в режим електрохімічної обробки поверхні [9] в електроліті (водний розчин хлориду натрію, NaCl 15 %) і виконувалося пошарове знімання матеріалу ЗТВ на високоточних контрольованих режимах.

Таблиця 1 – Електричні параметри генератора технологічного струму ГКІ 300-200 для різання повного зйому (пз) і додаткових проходів (дп)

Параметри	Режими				
	№1 пз 22 кГц	№2 дп 22 кГц	№3 дп 88 кГц	№4 дп 200 кГц	№5 дп 200 кГц
τ_U , мкс	7,48	7,32	1,7	1,26	1,1
τ_I , мкс	9,48	7,32	2,44	1,1	0,95
τ_{xx} , мкс	9,2	5,22	1,99	1,22	1,1
$U_{пр}$, В	51,8	52,5	41,6	41,7	38,5
U_D , В	66,5	65,3	50,65	43,1	40,2
U_{xx} , В	158,2	108,2	108,1	60,3	55,7
I , А	111,1	84,7	29,7	12,12	9,8
$E_{макс}$, МДж	3,3	2,18	0,70	0,434	0,28

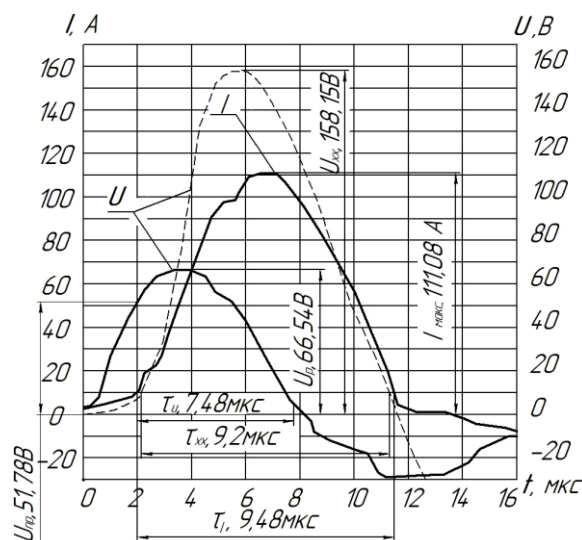


Рисунок 3 – Осцилограми струму (I) та напруги (U) одиничного розряду режиму №1 пз (таблиця 1)

$$\sigma = -\frac{1}{6} \cdot E \cdot (H - \delta)^2 \cdot \frac{dC(\delta)}{d\delta} + \frac{2}{3} \cdot E \cdot (H - \delta) \cdot C(\delta) + \frac{1}{3} E \cdot C(\delta_{\max}) \cdot (3 \cdot \delta - 2 \cdot H) - \frac{1}{3} E \cdot \int_0^{\delta} C(\delta) \cdot d\delta, (1)$$

де σ – залишкова напруга;

H – товщина пластини;

δ – глибина ЗТВ;

E – модуль пружності сталі У7А;

$C = 1/R$ (R – радіус кривизни пластини).

За один технологічний прохід знімався 15^{+3} мкм структурно зміненого шару, після чого кожного разу знову контролювався реальний залишковий прогин деталі. В кожному технологічному випадку (як після різання повного зйому, так і після додаткових проходів) процес продовжувався до повного видалення ЗТВ. Використовуючи отриману базу даних, за рівнянням (1) розраховувалися напруження в конкретній зоні структурно зміненого шару. На рисунку 4 показано розраховані напруження в ЗТВ відразу після різання повного зйому.

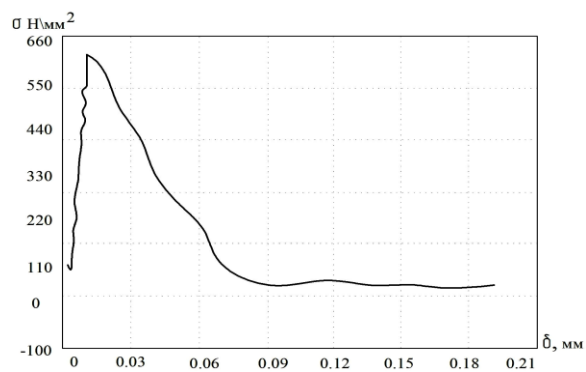
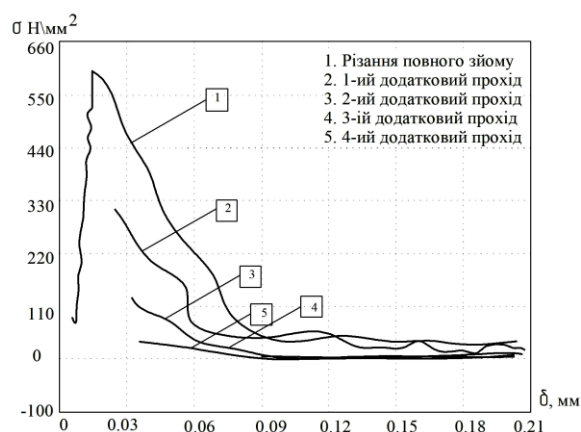
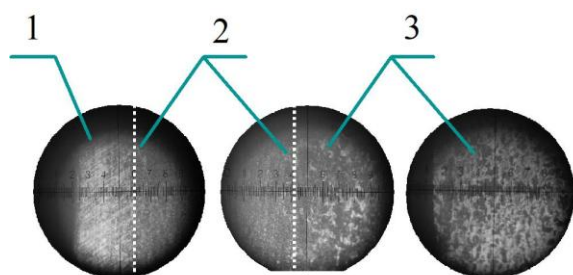


Рисунок 4 – Профіль залишкових напруг після різання повного зйому

На рисунку 5 показано напруження після різання повного зйому і чотирьох додаткових проходів. Як і слід було очікувати, в обох випадках залишкові напруги розтягнення наявні в шарі ЗТВ. Для чорнової обробки пік напруження не перебуває на поверхні, а знаходиться трохи нижче. Це можна пояснити тим, що білий шар має багато пустот і мікротріщин, які викликають розслаблення залишкових напружень. Після досягнення піку напруги розтягуюча напруга зменшується практично до нуля за межами ЗТВ. Отримані результати задовільно узгоджуються з даними по структурі поверхневих шарів сталі, які отримані за допомогою мікрослїфів (рисунк 6).



Рисунк 5 – Профілі залишкових напруг для різання повного зйому та наступних проходів на режимах, наведених у таблиці 1



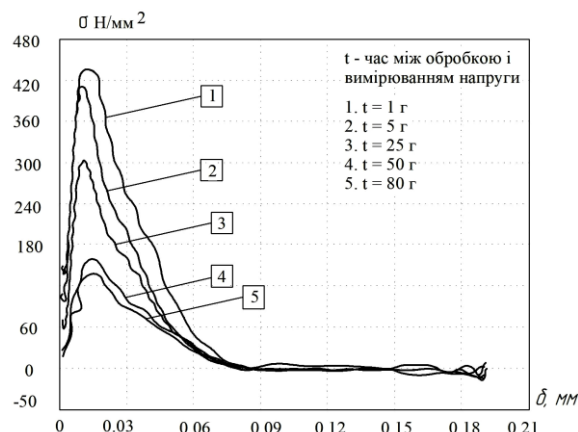
1 – поверхневий (білий) шар ~ 20 мкм;
2 – перехідний (структурно змінений шар) ~ 0,054 мм; 3 – основний матеріал після повного видалення ЗТВ за технологією EXPO

Рисунк 6 – Мікрослїфи зразків після різання повного зйому та EXPO

Після чотирьох додаткових проходів залишкова напруга значно нижча, а наявність розтягуючих напруг обмежується меншою глибиною (рисунк 5). Проте максимальна

напруга розтягу спостерігається на верхній поверхні, сформованій конкретним проходом. Там немає ніяких ознак релаксації.

На рисунку 7 показано профілі напруг для зразків після чорнового різання зі змінним часом між фактичною обробкою електроерозією і вимірюванням деформацій та розрахунків напруги. Максимальна напруга знижується в часі, в той час як глибина максимального напруження і глибина проникнення розтягуючої напруги залишаються такими ж.



Рисунк 7 – Релаксація залишкових напруг в ЗТВ у часі після чорнової обробки

Висновки:

1. Розроблено та адаптовано методику визначення напруг у ЗТВ після електроерозійного дротяного різання у відомих простих технологічних схемах.

2. Вимірювання залишкової напруги в ЗТВ сталі У7А після дротяного електроерозійного різання повного зйому та додаткових проходів показали, що максимальна напруга розтягу скорочується зі збільшенням кількості додаткових проходів.

3. Для чорнової електроерозії спостерігається релаксація залишкових напружень у часі, що зменшує максимальне залишкове напруження розтягу.

4. Підтверджено технологічні можливості EXPO керувати формуванням не тільки мікрогеометрії поверхонь, але й залишати в поверхневих шарах необхідний рівень залишкових напруг або повністю позбавлятися від них.

Список літератури

- [1] Н. К. Фотеев, *Технология электроэрозионной обработки*. Москва: Машиностроение, 1980.

- [2] E. Macherauch, "Introduction to residual stress", in *Advances in surface treatments: 4. Residual stresses*, Pergamon Oxford, 1987, pp. 1-35.
- [3] E. Macherauch, and K. H. Kloos, "Origin, measurement and evaluation of residual stresses. Residual stresses in science and technology", in *Int. Conf. on Residual Stresses*, 1986, Garmisch-Partenkirchen, E. Macherauch and V. Hauk, Eds. Germany, 1987, pp. 3-26.
- [4] J. Liu, L. Li, and Y. Guo, "Surface integrity evolution from main cut mode to finish trim cut mode in W-EDM of shape memory alloy", *Applied Surface Science*, 308, pp. 253-260, 2014.
- [5] A. Klink, Y. B. Guo, and F. Klocke, "Surface integrity evolution of powder metallurgical tool steel by main cut and finishing trim cuts in wire-edm", *Procedia Engineering*, 19, pp. 178-183, 2011.
- [6] M. Antar, S. Soo, D. Aspinwall, M. Cuttall, R. Perez, and A. Winn, "WEDM of aerospace alloys using 'CleanCut' generator technology", *ISEM XVI*, Shanghai, pp. 285-290, 2010.
- [7] M. T. Antar et al., "Fatigue response of Udimet 720 following minimum damage WEDM", *Materials & Design*, 42, pp. 295-300, 2012.
- [8] J. F. Liu, and Y. B. Guo, "Residual stress modeling in electric discharge machining (EDM) by incorporating massive random discharges", in *3rd CIRP Conf. Surface Integrity (CIRP CSI). Procedia CIRP*, 45, pp. 299-302, 2016.
- [9] А. В. Билан, В. И. Осипенко, Д. О. Ступак, и Я. Д. Король, "Особенности формирования микрогеометрии и физических свойств поверхностных слоев стали при электроэрозионной вырезной обработке и последовательной электроэрозионной и электрохимической обработке проволоочным электродом", *Уральский научный вестник*, № 12 (48), с. 27-34, 2012.
- [10] А. В. Билан, В. И. Осипенко, и А. П. Плахотный, "Исследование процессов съема материала при электрохимической размерной обработке проволоочным электродом", *Вісник СевНТУ. Серія «Машинобудування та транспорт»*: зб. наук. праць (Севастополь), вип. 118, с. 107-112, 2011.
- ### References
- [1] N. K. Foteev, *Electrical discharge technology*. Moscow: Mashinostroenie, 1980 [in Russian].
- [2] E. Macherauch, "Introduction to residual stress", in *Advances in surface treatments: 4. Residual stresses*, Pergamon Oxford, 1987, pp. 1-35.
- [3] E. Macherauch, and K. H. Kloos, "Origin, measurement and evaluation of residual stresses. Residual stresses in science and technology", in *Int. Conf. on Residual Stresses*, 1986, Garmisch-Partenkirchen, E. Macherauch and V. Hauk, Eds. Germany, 1987, pp. 3-26.
- [4] J. Liu, L. Li, and Y. Guo, "Surface integrity evolution from main cut mode to finish trim cut mode in W-EDM of shape memory alloy", *Applied Surface Science*, 308, pp. 253-260, 2014.
- [5] A. Klink, Y. B. Guo, and F. Klocke, "Surface integrity evolution of powder metallurgical tool steel by main cut and finishing trim cuts in wire-edm", *Procedia Engineering*, 19, pp. 178-183, 2011.
- [6] M. Antar, S. Soo, D. Aspinwall, M. Cuttall, R. Perez, and A. Winn, "WEDM of aerospace alloys using 'CleanCut' generator technology", *ISEM XVI*, Shanghai, pp. 285-290, 2010.
- [7] M. T. Antar et al., "Fatigue response of Udimet 720 following minimum damage WEDM", *Materials & Design*, 42, pp. 295-300, 2012.
- [8] J. F. Liu, and Y. B. Guo, "Residual stress modeling in electric discharge machining (EDM) by incorporating massive random discharges", in *3rd CIRP Conf. Surface Integrity (CIRP CSI). Procedia CIRP*, 45, pp. 299-302, 2016.
- [9] A. V. Bilan, V. I. Osypenko, D. O. Stupak, and J. D. Korol, "Features of the formation of microgeometry and physical properties of the surface layers of steel during electrical discharge machining and sequential electrical discharge and electrochemical processing with a wire electrode", *Uralskii nauchnyi vestnik*, no. 12 (48), pp. 27-34, 2012 [in Russian].
- [10] A. V. Bilan, V. I. Osypenko, and O. P. Plakhotnyi, "Study of the processes of material removal during electrochemical dimensional processing with a wire

electrode", *Visnyk SevNTU. Ser. Mashynoprystrobovuvannya ta transport*: col. of

sci. works (Sevastopol), vol. 118, pp. 107-112, 2011 [in Russian].

V. I. Osypenko, *D.Tech.Sc., professor*,
e-mail: osip5906@gmail.com

A. V. Kondakov, *postgraduate*,
e-mail: kondakov.chdtu@gmail.com

O. Timchenko, *assistant lecturer*
e-mail: alec.timchenko@gmail.com

Cherkasy State Technological University,
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN U7A INSTRUMENTAL STEEL AFTER ELECTROEROUSIVE WIRE CUTTING

The article deals with residual stresses in thin plate of U7A steel, the working surface of which in different technological cases has been formed by different technologies, namely: main cut by wire electrical discharge machining (WEDM), additional passages with different energy of single spark discharge, sequential layer-by-layer removal of heat affected zone (HAZ) material using high-precision controlled electrochemical modes. Residual stresses were first determined by mechanical measuring of residual plate deformations directly in the machine's working bath (without removing the obtained samples) and calculating the stresses by a known equation which describes the relationship between the sample curvature and the residual stress for a one-dimensional stressed case. The obtained database after the calculations of residual stresses in U7A steel after WEDM correlates well with the results of work of leading researchers in the field of erosion technologies and processes of interaction of electric discharge plasma with metals. The results make it possible to determine the residual stress levels in the HAZ of U7A steel after WEDM and to determine their dependence on the energy of a single spark discharge. For the specific technological case, it is found that the maximum residual stresses relax over time and decrease with decreasing the thickness of the HAZ. It is possible to completely eliminate residual stresses only with the complete removal of the HAZ by non-thermal electrochemical technology, since WEDM modes, even with minimum discharge energies, form the HAZ and corresponding residual stresses. The results obtained can be used in the design of high-precision modes of electrical discharge and combined sequential WEDM and electrochemical machining with the same wire electrode. Besides, additional confirmation of the capabilities of the latest combined sequential WEDM and electrochemical technology not only to form the microgeometry of the surfaces, but also to obtain in the surface layers the required level of residual stresses or to completely eliminate them is obtained.

Keywords: wire electrical discharge machining, electrochemical dimensional processing, residual stress, heat affected zone, single spark discharge.