

НАУКОВІ ВІСТІ КПІ

Міжнародний науково-технічний журнал

№ 1–2 (135)

2022

Започаткований у вересні 1997 року

Головний редактор
М. З. Згуровський, акад. НАН України

Заступник головного редактора
М. Ю. Ільченко, акад. НАН України

Відповідальний секретар
П. П. Маслянко, канд. техн. наук, доц.

У номері:

Енергетика та нові
енергогенеруючі технології

Електроніка

Інформаційні технології,
системний аналіз
та керування

Матеріалознавство
та машинобудування

Прикладна математика

Приладобудування
та інформаційно-вимірювальна
техніка

Хімічні технології
та інженерія

Адреса редакції:
КПІ ім. Ігоря Сікорського
просп. Перемоги, 37,
Київ, 03056, Україна

Тел. (+38 044) 204-91-23
E-mail: n.visti@kpi.ua
<http://scinews.kpi.ua>

Засновник – Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Свідоцтво про державну реєстрацію журналу – серія КВ № 23144-12984ПР, видане 7 серпня 2017 року

Згідно з наказами МОН України № 1643 від 28.12.2019 та № 409 від 17.03.2020 журнал включено до категорії “Б” Переліку наукових фахових видань України з технічних наук (спеціальності — 113 Прикладна математика, 121 Інженерія програмного забезпечення, 122 Комп’ютерні науки та інформаційні технології, 123 Комп’ютерна інженерія, 124 Системний аналіз, 131 Прикладна механіка, 132 Матеріалознавство, 133 Галузеве машинобудування, 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка, 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 142 Енергетичне машинобудування, 143 Атомна енергетика, 144 Теплоенергетика, 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології, 161 Хімічні технології та інженерія, 171 Електроніка, 172 Телекомунікації та радіотехніка)

Рекомендовано Вченою радою Національного технічного університету України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, протокол № 4 від 27.06.2022 р.

Члени редакційної колегії

М. І. Бобир,	д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України
Є. Бондарев,	PhD, проф., Нідерланди
Х. Валеро,	PhD, проф., Іспанія
І. А. Дичка,	д-р техн. наук, проф., Україна
П. І. Лобода,	д-р техн. наук, проф., акад. НАН України
Г. С. Тимчик,	д-р техн. наук, проф., Україна
П. Хенаф,	д-р, проф., Франція
О. Е. Чигиринець,	д-р техн. наук, проф., Україна

Секретар редакції Т. Г. Кулікова

Редактор Н. В. Мурашова

Комп’ютерна верстка С. А. Бобров

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р., просп. Перемоги, 37, Київ, 03056

Підп. до друку 25.09.2022. Формат 60×84¹/₈. Папір офс. Гарнітура UkrainianTimesET.
Спосіб друку – електрографічний. Ум. друк. арк. 11,16. Обл.-вид. арк. 19,04. Наклад 50 пр. Зам. № 19-027.

Видавництво “Політехніка” КПІ ім. Ігоря Сікорського
вул. Політехнічна, 14, корп. 15, Київ, 03056
тел. (044) 204-81-78

KPI SCIENCE NEWS

International research journal

№ 1–2 (135)

2022

Founded in September, 1997

Editor-in-chief

M. Z. Zgurovsky, Academician of NASU

Deputy editor-in-chief

M. Yu. Ilchenko, Academician of NASU

Executive editor

P. P. Maslyanko, Assoc. Prof., PhD

In the issue:

Energy and new
energy-generating technologies

Electronics

Applied mathematics

Information technologies,
system analysis and control

Science of materials and
mechanical engineering

Instrument-making and
information-measuring equipment

Chemical technologies and
engineering

Editorial office:

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,
building 1, Ave. Peremogy, 37,
Kyiv, 03056, Ukraine

E-mail: n.visti@kpi.ua

<http://scinews.kpi.ua>

Founder – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Registration Certificate – KB No 23144-12984ПП

*According to the order of MES of Ukraine from 28.12.2019 no. 1643 is a specialized journal on technical sciences
(specialities – 113, 121, 122, 123, 124, 141, 142, 143, 144, 151, 161, 171, 172)*

Advised by the Academic Council of the National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, protocol No 3 on 27.06.2022.

Editorial Board

Mykola Bobyr,	Prof., Correspondent member of NASU, Ukraine
Egor Bondarau,	Prof., Netherlands
Olena Chyhyrynets,	Prof., Ukraine
Ivan Dychka,	Prof., Ukraine
Patrick Henaff,	Prof., France
Petro Loboda,	Prof., Academician of NASU, Ukraine
Grygorii Tymchik,	Prof., Ukraine
José Valero,	Prof., Spain

Editorial secretary T.G. Kulikova

Editor N.V. Murashova

Desktop publishing S. A. Bobrov

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Registration Certificate – ДК № 5354 on 25.05.2017, Ave. Peremogy, 37, Kyiv, 03056

Signed for printing on 25.09.2022. Format 60×84¹/₈. Text-weight paper. Font UkrainianTimesET.
Print. tech. – electrographic. Convent. printed sheets 11,16. Published sheets 19,04. Edition of 50 copies. Order No 19-027.

Publishing House “Politehnika”, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Politekhnichna Str., 14, building 15, Kyiv, 03056
Tel.: (044) 204-81-78

З М І С Т

Енергетика та нові енергогенеруючі технології

- Кондратюк В.А.*. Адаптація результатів експериментальної кваліфікації пасивних систем безпеки ядерних енергоустановок..... 7
- Алексеїк Є.С., Алексеїк О.С.* Конструкції теплообмінних апаратів на двофазних теплопередавальних елементах для утилізації теплоти повітря у вентиляційних системах: огляд 11

Електроніка

- Найдьонов А.О., Коваль В. М.* Сенсори на основі нанощелюзи для біорозкладної, гнучкої, одноразової і носимої електроніки 26
- Павлов Л.М., Яганов П.О.* Модель термометричної характеристики діодного сенсора температури 42
- Бомба А.Я., Мороз І.П.* Моделювання дифузійно-дрейфових процесів в електронно-дірковій плазмі активної області *p-i-n*-діодів в умовах проникаючої в плазму нвч-хвилі методами теорії збурень..... 51

Інформаційні технології, системний аналіз та керування

- Бурчак П.В., Олещенко Л.М.* Аналіз програмних методів оптимізації керування локальним станом даних веб застосунків..... 65

Матеріалознавство та машинобудування

- Копилов В.І., Кузін О.А., Кузін М.* Застосування моделей структури поверхонь поділу в сталях під час отримання виробів із заданим життєвим циклом..... 76

Прикладна математика

- Чертов О.Р., Жук І.С.* Імітаційна модель футбольного сезону з матчами з фіксованим результатом... 82

Приладобудування та інформаційно-вимірювальна техніка

- Тумчик Grigoriy S., Podolian Oleksandr O., Serhiienko Kateryna S.* Technology of repairing the active main pipeline using braze-welded couplings 95
- Sokurenko V.M., Sokurenko O.M.* Automated design of zoom riflescope with extended parameters..... 102

Хімічні технології та інженерія

- Ущатовський Д.Ю., Кушмирук А.І., Васильєв Г.С., Лінючева О.В., Редько Р.М., Лінючев О.Г., Підващевський Г.Ю., Куроченко Т.О.* Корозійна стійкість гальванічних нікелевих осадів й електрохімічна активність продуктів їх корозії..... 110
- Автори номера..... 118

CONTENTS

Energy and new energy-generating technologies

- Kondratyk Vadim A.* Adaptations of results of experimental qualification of passive safety systems of nuclear power plants..... 7
- Alekseik Ye., Alekseik O.* Designs of heat exchangers for heat waste utilization in ventilation systems based on two phase heat transfer elements: a review 11

Electronics

- Naidonov A.O., Koval V.M.* Sensors based on nanocellulose for biodegradable, flexible, disposable and wearable electronics..... 26
- Pavlov L.M., Yahanov P.O.* Model of the thermometric characteristics of the diode temperature sensor..... 42
- Bomba Ya., Moroz I.P.* Simulation of diffusion-drift processes in the electron-hole plasma of the p-i-n-diodes active region under the conditions of a mw penetrating in the plasma by the perturbation theory methods 51

Information technologies, system analysis and control

- Burchak P.V., Oleshchenko L.M.* Software methods analysis of optimizing the local state of data web applications management 65

Science of materials and mechanical engineering

- Viacheslav I. Kopylov, Oleg A. Kuzin, Mykola O. Kuzin.* Application of models of the structure of separation surfaces in steels when obtaining products with a given life cycle 76

Applied mathematics

- Chertov O.R., Zhuk I.S.* Soccer season simulation with fixed matches 82

Instrument-making and information-measuring equipment

- Tymchik Grigoriy S., Podolian Oleksandr O., Serhiienko Kateryna S.* Application of models of the structure of separation surfaces in steels when obtaining products with a given life cycle 95
- Sokurenko V.M., Sokurenko O.M.* Automated design of zoom riflescope with extended parameters..... 102

Chemical technologies and engineering

- Ushchapovskyi D.Yu., Kushmyruk A.I., Vasiliev G.S., Linyucheva O.V., Redko R.M., Linyuchev O.G., Pidvashetsky G.Yu., Kurochenko T.A.* Corrosion resistance of galvanic nickel deposits and electrochemical activity of their corrosion products..... 110
- Contributors to the issue 118

ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.20535/kpissn.2022.1-2.270364

УДК 629.031

В.А. Кондратюк

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

*corresponding author: prorector-agr@kpi.ua

АДАПТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ КВАЛІФІКАЦІЇ ПАСИВНИХ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК

Проблематика. Актуальним питанням забезпечення безпеки ядерних енергоустановок (ЯЕУ) є адаптація результатів експериментальної кваліфікації арматури пасивних систем безпеки на однофазному середовищі до аварійних умов двофазних потоків. Для більшості обладнання систем, важливих для безпеки атомних електростанцій, не існує принципової можливості кваліфікації за допомогою прямих випробувань в аварійних умовах. Досвід експлуатації атомних електростанцій, а також результати моделювання після проектних аварій визначили можливу невідповідність умов роботи арматури в аварійних ситуаціях і в режимах експлуатаційних випробувань з однофазним парогазовим середовищем. Таким чином, треба адаптувати результати експериментальної кваліфікації арматури систем аварійного видалення пари і газу в однофазному середовищі до аварійних умов двофазних потоків.

Мета дослідження. Метою цієї статті є достатнє обґрунтування адаптації результатів випробувань на однофазному середовищі до умов аварійних процесів із двофазним середовищем.

Методика реалізації. Для досягнення цілей дослідження було використано детерміністичне моделювання умов і критеріїв функціонування/випробувань клапанів систем аварійного видалення пари і газу.

Результати дослідження. Виконано аналіз обґрунтованості результатів експериментальної кваліфікації для динамічного напору тиску на замикаючий пристрій у режимі випробувань (однофазний режим течії) і динамічного напору тиску на замикаючий пристрій в аварійному режимі (двофазний режим течії). Виконання адаптації результатів експериментальної кваліфікації на закриття на однофазному середовищі клапанів систем аварійного видалення пари й газу до аварійних умов двофазних потоків проводилось за умов дозвукових та надзвукових режимів течії.

Висновки. Обґрунтовано адаптацію результатів експериментальної кваліфікації на закриття клапанів систем аварійного видалення пари і газу до аварійних умов дозвукових і трансзвукових течій двофазного потоку в проточній частині клапанів. Критеріями кваліфікації вважаються динамічний напір на замикаючий пристрій клапана в однофазних потоках експлуатаційних випробувань та динамічний напір у двофазних потоках аварійних режимів.

Ключові слова: кваліфікація, система безпеки, арматура, ядерна енергоустановка.

Вступ

Зважаючи на аналіз причин аварії на атомній електростанції Фукусіми, встановлено, що значну увагу треба приділяти обґрунтуванню надійності пасивних систем безпеки реакторних установок, зокрема їх елементів. Це має здійснюватися за допомогою їх кваліфікації.

Згідно з рекомендаціями МАГАТЕ під кваліфікацією систем/обладнання ЯЕУ маємо

на увазі розрахункове, експериментальне або розрахунково-експериментальне обґрунтування (підтвердження) працездатності й надійності у проектних та аварійних режимах [1].

До однієї з таких пасивних систем належить система аварійного видалення пари і газу (САП) ЯЕУ з водо-водяним енергетичним реактором (ВВЕР). Ця систем призначена для роботи з однофазними потоками, але в аварійних ситуаціях можливий перехід на роботу із двофазними потоками

Пропозиція для цитування цієї статті: В.А. Кондратюк, «Адаптація результатів експериментальної кваліфікації пасивних систем безпеки ядерних енергостановок», Наукові вісті КПП, № 1–2, с. 7–10, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.270364

Offer a citation for this article: Vadim A. Kondratyuk, “Adaptations of results of experimental qualification of passive safety systems of nuclear power plants”, *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 7–10, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.270364

Під час проведення кваліфікації елементів цієї системи слід враховувати саме такий аварійний перехід, зважаючи на особливості роботи елементів системи в умовах двофазних потоків [2].

Аналіз літературних джерел

До САП ЯЕУ з ВВЕР належать запобіжні клапани компенсатора тиску реактора та парогенератора (ЗК КТ/ПГ), швидкодіючі редуційні установки скидання парогазового середовища до конденсатора або атмосфери (ШРУ-К/ШРУ-А) та інші. Основне призначення САП – короткочасне відкриття з наступним закриттям клапанів для зниження тиску в системах, важливих для безпеки ЯЕУ, та управління (у разі необхідності) аварійними процесами.

Для підтвердження надійності і працездатності клапанів САП фахівці періодично проводять експлуатаційні випробування на однофазному парогазовому середовищі. Однак багаторічний досвід експлуатації ЯЕУ, а також результати моделювання запроєктних аварій визначили можливу невідповідність умов спрацьовування клапанів в аварійних ситуаціях та в режимах експлуатаційних випробувань. Так, наприклад, аварійне закриття ЗК-реактора у процесі ядерної (важкої) аварії на АЕС ТМІ-2 (США) у 1979 р. відбувалося в режимі двофазної течії теплоносія [3]. В аварійному інциденті на Рівненській АЕС у 2009 р. після відмови на закриття ЗК КТ у процесі випробувань у режимі «гарячої» зупинки реактора також виник режим двофазної течії в незакритому клапані [3]. Результати розрахункового моделювання запроєктних аварій з відносно великими міжконтурними течами на ЯЕУ з ВВЕР також визначив можливість потрапляння двофазного середовища до ЗК ПГ, ШРУ-А та ШРУ-К [4].

Тому для кваліфікації клапанів САП необхідним є достатнє обґрунтування адаптації результатів випробувань на однофазному середовищі для умов аварійних процесів із двофазним середовищем. Вирішення цього питання визначає актуальність, цілі та задачі цієї роботи.

Постановка задачі

Метою цієї статті є достатнє обґрунтування адаптації результатів випробувань арматури пасивних систем безпеки на однофазному середовищі до умов аварійних процесів із двофазним середовищем.

Адаптація результатів випробувань і аварійних умов

Для досягнення цілей дослідження було використано детерміністичне моделювання умов і критеріїв функціонування/випробувань клапанів САП.

Аналіз обґрунтованості результатів експериментальної кваліфікації розглядається для двох параметрів: динамічного напору тиску на замикаючий пристрій (ЗП) в режимі випробувань (однофазний режим течії) і динамічного напору тиску на ЗП в аварійному режимі (двофазний режим течії).

Динамічний напір тиску на ЗП клапана в умовах однофазного потоку [3]:

$$\Delta P_{te} = \Delta P_{te0} + \frac{G_{te}^2}{\rho_{te} F_m^2}, \quad (1)$$

де F_m – площа прохідного перерізу клапана в зоні ЗП;

G_{te} – масова витрата в режимі випробувань;

ρ_{te} – щільність однофазного парогазового середовища в режимі випробувань;

ΔP_{te} – перепад статичного тиску на клапані в режимі випробувань.

Динамічний напір тиску на ЗП в аварійному режимі, за умови наявності в зоні ЗП двофазного потоку [3]:

$$\Delta P_{as} = \Delta P_{as0} + \frac{G_{as}^2}{\rho_{as} F_m^2}, \quad (2)$$

де G_{as} – масова витрата в аварійному режимі;

ρ_{as} – щільність двофазного потоку в зоні ЗП;

ΔP_{as} – перепад статичного тиску на клапані в аварійному режимі.

Обґрунтованість адаптації результатів експлуатаційних випробувань і аварійних умов можна визначити рівнянням

$$\Delta P_{as} \leq \Delta P_{te}. \quad (3)$$

Невідомі параметри ρ_{as} і G_{as} можна оцінити на основі моделювання теплогідродинамічних процесів у проточній частині клапана САП.

Рівняння руху і теплового балансу двофазного потоку в гомогенному, квазістаціонарному та ізотермічному наближеннях [5; 6]:

$$P_{as0} + \frac{G_{as}^2}{\rho_{as}(\phi_0)F_0^2} - P_{asm} - \frac{G_{as}^2}{\rho_{as}(\phi_m)F_m^2} = \xi \frac{G_{as}^2}{\rho_{as}(\phi_0)F_0^2}, \quad (4)$$

$$h_{as}(P_0, P_{as0}) = h_{as}(P_m, P_{asm}), \quad (5)$$

де P_{as0} , P_{asm} – статичний тиск на вході та виході клапана відповідно;

F_0 – площа прохідного перерізу на вході клапана;

$$\rho_{as}(P_0) = \rho_v P_0 + \rho_l (1 - P_0);$$

$$\rho_{as}(P_m) = \rho_v P_m + \rho_l (1 - P_m);$$

$$h_{as}(P_0, P_{as0}) = h_v(P_{as0})P_0 + h_l(P_{as0})(1 - P_0);$$

$$h_{as}(P_m, P_{asm}) = h_v(P_{asm})(1 - P_m) + h_l(P_{asm})(1 - P_m);$$

h_v , h_l – питома ентальпія пари та рідини відповідно;

ρ_v , ρ_l – щільність пари та рідини відповідно;

φ_0 , φ_m – паровміст на вході та в зоні ЗП відповідно;

ξ – коефіцієнт гідравлічного опору клапана.

За умов дозвукових режимів течії в зоні ЗП клапана критерій Маху визначають, розв'язавши рівняння

$$M = \frac{G_{as}}{\rho_{as}(\varphi_m) F_m a(\varphi_m)} < 1, \quad (6)$$

де швидкість звуку у двофазному потоці [5; 6]

$$a(\varphi_m) = \sqrt{[a_v^{-2} \varphi_m + a_l^{-2} (1 - \varphi_m)]^{-1}}; \quad (7)$$

a_v , a_l – швидкість звуку за тиску P_{asm} в парі та рідині відповідно.

За умов дозвукового режиму параметри G_{as} , φ_m і ΔP_{as} визначають з розв'язків рівнянь (2), (4) і (5).

За умов звукових режимів течії ($M = 1$):

$$G_{as} = \rho_{as}(\varphi_m) F_m a_{as}(\varphi_m). \quad (8)$$

За умов надзвукових режимів ($M > 1$) виникає конденсаційний імпульс тиску гальмування потоку з максимальною амплітудою [6; 7]:

$$\Delta P_m = \rho_{as}(\varphi_m) a_{as}^2(\varphi_m) a_l^{2i-1}. \quad (9)$$

Умовою адаптації результатів випробувань і аварійних режимів за $M \geq 1$ буде рівняння, яке показує, що кваліфікація прийнятна, коли динамічний напір в експериментальних умовах не менший, ніж в аварійному режимі:

$$\Delta P_{as0} + \Delta P_m \leq \Delta P_{te}. \quad (10)$$

Використання рівняння (10) дає можливість обґрунтувати надійність і працездатність розглянутих систем у разі виникнення аварійних ситуацій без залучення недопустимих випробувань в аварійних умовах.

Висновки

1. Адаптація результатів експериментальної кваліфікації клапанів систем аварійного видалення пари і газу на однофазному середовищі до аварійних умов двофазних потоків є необхідним і актуальним заходом, якій потрібно проводити для забезпечення безпеки ЯЕУ.

2. Подано аналіз адаптації результатів експериментальної кваліфікації на закриття на однофазному середовищі клапанів систем аварійного видалення пари і газу до аварійних умов двофазних потоків.

3. Параметрами кваліфікації вважаємо динамічний напір на замикаючий пристрій клапана в однофазних потоках експлуатаційних випробувань та динамічний напір у двофазних потоках аварійних режимів.

4. Визначено умови адаптації результатів експериментальної кваліфікації на закриття клапанів систем аварійного видалення пари та газу до аварійних умов дозвукових і трансзвукових течій двофазного потоку у проточній частині клапанів.

Список використаної літератури

- [1] IAEA-EBR-WWER-05. Safety Issues and Their Ranking for WWER-1000 Model 320 Nuclear Power Plants. A Publication of the Extrabudgetary Programme on the Safety of WWER and RBMK Nuclear Power Plants. Vienna: IAEA, 1997. 223 p.
- [2] Королев А.В. Анализ и моделирование теплоэнергетического оборудования, работающего с двухфазными течениями. Одесса: «Астропринт», 2010, 456 с.
- [3] Науково-технічні основи заходів підвищення безпеки АЕС з ВВЕР. Інститут проблем безпеки АЕС НАН України. Під редакцією О.О. Ключникова, Чорнобиль: 2012, 296 с.
- [4] Деменков В.М., Шугайло О.П., Мустафін М.А., Макаренко М.В. Оцінка цілісності обладнання та трубопроводів АС на основі пов'язаних розрахунків в ANSYS і RELAPCODE. Ядерна та радіаційна безпека №3(87) (2020). С. 46–54.
- [5] Skalozubov V., Kozlov I., Chulkin O., Komarov Yu., Piontkovskiy O. Analysis of reliability-critical hydraulic impact conditions at WWER-1000 NPP active safety systems. *Nuclear & Radiation Safety*. 2019. No. 1(81). P. 42–45.
- [6] Antonyuk N., Gerliga V., Skalozubov V. Excitation of thermoacoustic oscillations in a heated channel. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1990. V. 59, Iss. 4. P. 1323–1328.

- [7] Skalozubov V., Bilous N., Pirkovskiy D., Kozlov I., Komarov Yu., Chulkin O. Water hammers in transonic modes of steam-liquid flows in NPP equipment. *Nuclear & Radiation Safety*. 2019. No. 2(82). P. 46–49.

V. A. Kondratyk

ADAPTATIONS OF RESULTS OF EXPERIMENTAL QUALIFICATION OF PASSIVE SAFETY SYSTEMS OF NUCLEAR POWER PLANTS

Problems. An urgent issue of ensuring the safety of nuclear power plants is the adaptation of the results of experimental qualification of the fittings of passive safety systems in a single-phase environment to emergency conditions of two-phase flows. For most of the equipment of systems important for the safety of nuclear power plants, there is no principled possibility of qualification through direct tests in emergency conditions. The experience of operating nuclear power plants, as well as the results of simulations after design accidents, determined the possible inconsistency of the operating conditions of the fittings in emergency situations and in the modes of operational tests with a single-phase steam-gas environment. Thus, it is necessary to adapt the results of the experimental qualification of the fittings of the emergency steam and gas removal systems in a single-phase environment to the emergency conditions of two-phase flows.

The aim of the study. The purpose of this article is sufficient justification of the adaptation of test results on a single-phase environment to the conditions of emergency processes with a two-phase environment.

Methodology of implementation. To achieve the goals of the study, deterministic modeling of the conditions and criteria of operation/testing of valves of emergency steam and gas removal systems was used.

Research results. An analysis of the validity of the results of the experimental qualification was performed for the dynamic pressure pressure on the closing device in the test mode (single-phase flow mode) and the dynamic pressure pressure on the closing device in the emergency mode (two-phase flow mode). The adaptation of the results of the experimental qualification for closing the valves of the emergency steam and gas removal systems in a single-phase environment to the emergency conditions of two-phase flows was carried out under the conditions of subsonic and supersonic flow regimes.

Conclusions. The conditions for adapting the results of the experimental qualification for closing the valves of the emergency vapor gas removal systems to the emergency conditions of subsonic and transonic flows of two-phase flow in the flow part of the valves have been determined. The dynamic pressure on the closing device of the valve in single-phase flows of operational tests and the dynamic pressure in two-phase flows of emergency modes are considered qualification criteria.

Key words: qualification, safety system, nuclear power plant

Рекомендована Радою
інституту атомної та теплової енергетики
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
12 січня 2022 року

Прийнята до публікації
27 червня 2022 року

DOI: 10.20535/kpissn.2022.1-2.264595

УДК 536.246, 536.248.2

Є.С. Алексеїк*, О.С. Алексеїк

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*Відповідальний автор: alexeik_kpi@ukr.net

КОНСТРУКЦІЇ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ НА ДВОФАЗНИХ ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТАХ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ПОВІТРЯ У ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМАХ: ОГЛЯД

Проблематика. Теплообмінники-утилізатори теплоти викидного вентиляційного повітря широко використовують для підвищення енергоефективності будівель. Для підвищення ефективності передачі теплоти від гарячого повітря до холодного в таких теплообмінниках в якості основних теплопередавальних елементів використовують двофазні пристрої, зокрема: термосифони, теплові труби та пульсаційні теплові труби. Проте такі теплообмінники повинні мати високу температурну, ентальпійну та енергетичну ефективність за низького аеродинамічного опору. Крім того, специфіка роботи у вентиляційних системах, зокрема, відносно низькі робочі температури та малі перепади температур гарячого та холодного повітря, створює певні складнощі під час вибору теплоносіїв для двофазних елементів. Таким чином, для створення ефективних теплообмінників-утилізаторів на двофазних елементах необхідно вирішити низку складних задач.

Мега дослідження. Виявити не вирішені та малодосліджені питання в конструюванні теплообмінників-утилізаторів на двофазних теплопередавальних елементах для вентиляційних систем.

Методика реалізації. Аналіз описаних у літературі конструкцій, їх характеристик та результатів досліджень.

Результати дослідження. В результаті аналізу літературних джерел було виявлено як загальні риси конструкцій теплообмінників-утилізаторів на двофазних теплопередавальних пристроях, так і низку питань, що потребують досліджень.

Висновки. Теплообмінні апарати на двофазних теплопередавальних елементах мають широкі перспективи використання та забезпечують повну теплову ефективність до 85 %, при цьому є низка невирішених питань, що стосуються оптимізації конструкції двофазних пристроїв та теплообмінників загалом, оптимізації об'єкту дослідження коефіцієнтів тепловіддачі та теплопередачі, втрат тиску, відведення конденсату.

Ключові слова: утилізація теплоти, вентиляційні системи, теплообмінник, термосифон, теплова труба, пульсаційна теплова труба.

Вступ

У сучасному світі спостерігається тенденція до зменшення споживання енергоносіїв у формі викопного палива. Основними причинами її виникнення є погіршення екологічної ситуації, пов'язане із викидом в атмосферу газоподібних продуктів спалювання викопного палива, та обмеженість його запасів.

Одним із способів зменшення споживання енергоносіїв є підвищення енергоефективності будівель завдяки зменшенню тепловтрат. Зокрема, тепловтрати через вентиляційну систему можуть сягати 45 % загальних теплових втрат

будівлі [1]. Тому для запобігання цьому явищу і підвищення енергоефективності будівель необхідно утилізувати теплоту викидного повітря, наприклад, для попереднього підігріву припливного повітря. Застосування систем теплоутилізації у вентиляції дозволяє знизити втрати теплоти з вентиляційним повітрям у загальному тепловому балансі будівлі до 15 % [1] та підвищити енергоефективність з 10 % до 50 % [2]. Таким чином, створення нових систем утилізації теплоти вентиляційного повітря є актуальною задачею.

Зазвичай, в якості таких систем застосовують теплообмінні апарати (ТОА), які забезпе-

Пропозиція для цитування цієї статті: Є.С. Алексеїк, О.С. Алексеїк, “Конструкції теплообмінних апаратів на двофазних теплопередавальних елементах для утилізації теплоти повітря у вентиляційних системах: огляд”, *Наукові вісті КПІ*, № 1–2, с. 11–25, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.268688

Offer a citation for this article: Ye. Alekseiik, O. Alekseiik, “Designs of heat exchangers for heat waste utilization in ventilation systems based on two phase heat transfer elements: a review”, *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 11–25, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.268688

чують обмін теплотою між викидним повітрям (гарячий теплоносіє) та свіжим (припливним) повітрям (холодний теплоносіє). Переважно використовують ТОА рекуперативного та регенеративного типу. В обох згаданих типах ТОА теплопередача між теплоносіями відбувається через певну поверхню теплообміну. Останнім часом дослідники приділяють увагу зниженню термічного опору теплопередачі завдяки використанню новітніх матеріалів для виготовлення поверхонь теплообміну, наприклад, полімерних плівок у рекуперативних ТОА [1, 3–7] або пакетів листів, сіток [8] чи пористих матеріалів [9, 10] в якості теплоакumuлюючих насадок у регенеративних ТОА. Одним із перспективних способів зменшення опору теплопередачі є також застосування в якості теплопередавальних елементів ТОА двофазних пристроїв, таких як термосифони (ТС) та теплові труби (ТТ) [9–31], оскільки вони мають низький термічний опір, що складає 0,03–0,5 К/Вт [32, 33–36]. З іншого боку, робота за відносно низьких температур (від -10 до $+25$ °С) та малих різниць вхідних температур гарячого та холодного теплоносіїв (4 – 8 °С) ускладнює задачу підбору теплоносія для самих двофазних пристроїв. Крім того, для інтенсифікації тепловіддачі між поверхнею двофазного пристрою та повітряними потоками необхідно використовувати оребрення поверхонь, що може збільшувати аеродинамічний опір ТОА. Також необхідно забезпечити високий коефіцієнт ефективності ТОА (відношення фактичної теплової потужності апарату до теоретично можливої максимальної теплової потужності в ідеальному ТОА з протитечією та безкінечно великою поверхнею теплообміну), причому високим має бути як температурний коефіцієнт (розраховується лише за явною теплотою), так і ентальпійний (розраховується за повною теплотою, тобто враховується явна теплота повітря та прихована теплота водяної пари) [1]. До того ж ТОА-утилізатор повинен мати високу енергетичну ефективність, що визначається як відношення теплоти, переданої холодному теплоносію, до енергії, витраченої на подолання аеродинамічного опору ТОА [7]. Таким чином, створення ефективного ТОА-утилізатора на двофазних теплопередавальних елементах вимагає вирішення значної кількості питань.

Постановка задачі

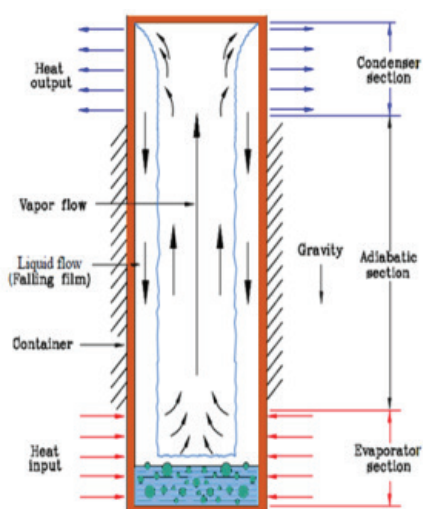
Метою цієї роботи є виявлення невирішених та малодосліджених питань у конструюванні ТОА-утилізаторів на двофазних теплопередавальних елементах для вентиляційних систем за допомогою аналізу описаних у літературі конструкцій та результатів їх досліджень.

1. Загальні відомості про двофазні теплопередавальні пристрої

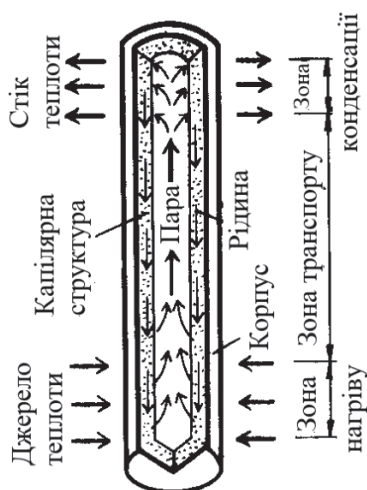
У ТОА для утилізації теплоти вентиляційного повітря використовуються такі типи двофазних теплопередавальних пристроїв: термосифони (ТС), теплові труби з капілярною структурою (ТТ з КС), пульсаційні теплові труби (ПТТ) (рис. 1) [14].

Термосифон (рис. 1, *а*) є герметизованою, вакуумованою трубою, частково заповненою рідким теплоносієм. Конструкція ПТТ (рис. 1, *в*) схожа на конструкцію термосифона, але в якості корпусу замість труби використовують капіляр. Через це на рідкий теплоносіє всередині ПТТ діють капілярні сили, в результаті чого з нього формуються рідинні снаряди. Конструкція ТТ (рис. 1, *б*) повністю аналогічна конструкції термосифона, але внутрішня поверхня труби вкрита капілярною структурою, в якій міститься теплоносіє. На відміну від термосифона, капілярні сили, що діють у КС, забезпечують рух рідкого теплоносія всередині ТТ незалежно від дії сил гравітації.

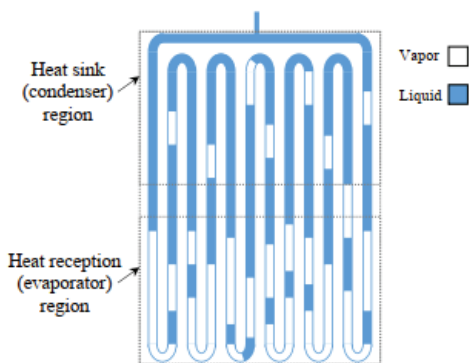
Зазвичай теплоту підводять до одного кінця цих пристроїв, що зветься зоною нагріву (ЗН), а відводять від протилежного – зони конденсації (ЗК). Таким чином двофазний пристрій забезпечує передачу теплоти від ЗН до ЗК. Між цими зонами може також існувати зона транспорту (ЗТ) або адіабатна зона, в якій немає теплообміну між зовнішньою поверхнею пристрою та навколишнім середовищем. Усі описані вище двофазні теплопередавальні пристрої забезпечують високоефективну передачу теплової енергії завдяки роботі по замкненому випарно-конденсаційному циклу, до якого, у випадку ПТТ, ще додається перенесення теплоти рідинними та паровими снарядами без зміни фазового стану. Більш детальну інформацію щодо конструктивних особливостей та принципу роботи цих пристроїв можна знайти в [32–37].



a



б



в

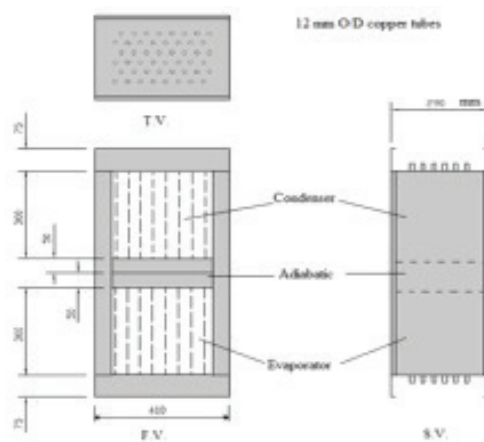
2. Теплообмінні апарати на термосифонах

В [14] описано теплообмінник на ТС для утилізації теплоти в пекарнях. Він являє собою вертикальний корпус розділений на верхню та нижню секції трубою дошкою. В трубою дошку встановлено термосифони так, щоб у нижній секції розміщувались ЗН термосифонів, а у верхній – ЗК. Відповідно через нижню секцію пропускається гаряче повітря. Воно віддає своє тепло ТС, а вони передають його до верхньої секції, через яку пропускається холодне повітря, що нагрівається внаслідок теплообміну з ТС. Такий принцип роботи характерний для всіх теплообмінників на ТС, ТТ або ПТТ.

Цей ТОА досліджували з трьома варіантами ТС: два були виконані зі сталі й один з міді. Характеристики ТС та параметри ТОА наведено в табл. 1.

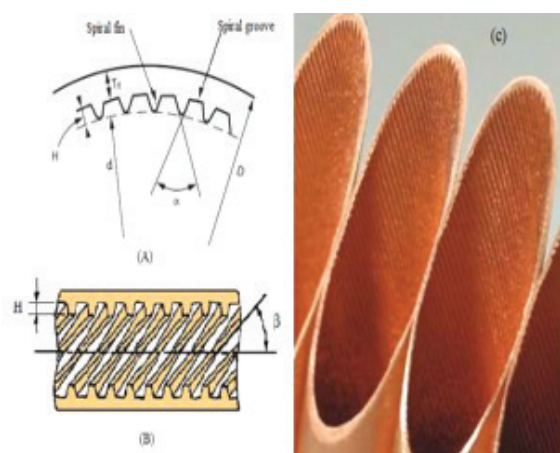
У результаті досліджень цей ТОА показав ефективність до 63 % [14].

В [15] описано та досліджено ТОА конструктивно схожий на описаний вище (рис. 2, а).



a

Рис. 1. Типи теплових труб, які застосовуються в теплообмінниках-утилізаторах: а – термосифон [15]; б – тепла труба [32]; в – пульсаційна тепла труба [16]



б

Рис. 2. Теплообмінник на термосифонах [15]: *a* – конструкція та зовнішній вигляд; *б* – внутрішня структура канавчатого термосифона

Особливістю цього теплообмінника є використання ТС зі спіральними канавками на внутрішній поверхні корпуса (рис. 2, б). Ці канавки не виконують транспортну роль, а призначені лише для інтенсифікації процесів теплообміну всередині ТС. У [15] було досліджено та порівняно два ТОА: в одному було використано ТС з гладкою внутрішньою поверхнею, а в іншому – з канавчатою. Характеристики ТС та параметри ТОА наведено в табл. 1.

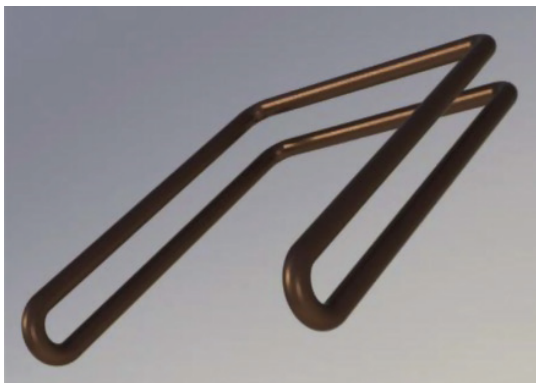
За результатами досліджень [15] максимальна як температурна, так і ентальпійна ефективність ТОА на канавчатих ТС становила приблизно 55 %, а для ТОА на ТС з гладкою поверхнею максимальна температурна ефективність була отримана на рівні 50 %, а ентальпійна – 48 %. Загалом ж за твердженням авторів [15] використання канавчатих ТС дає змогу збільшити ефективність ТОА на 10–35 % порівняно з ТОА на гладких ТС.

Таблиця 1. Характеристики термосифонів та параметри теплообмінних апаратів

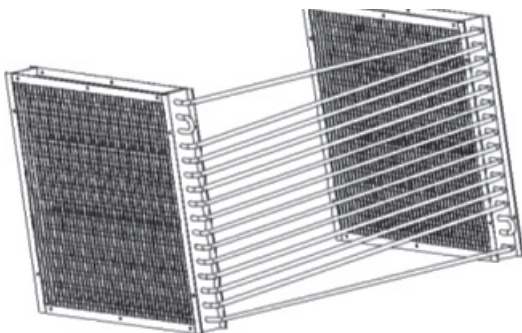
Джерело	Srimuang W. et al. [14]	Muhsen M. et al. [15]	Ramos J. et al. [17]	Jouhara H. et al. [18]	Jouhara H. et al. [21]
Характеристики термосифонів					
Матеріал корпуса	сталь, мідь	мідь	сталь	мідь	мідь
Діаметр корпуса, мм	15,88; 20; 26,27	12	28	12	12,7
Загальна довжина, мм	–	–	2000	–	281
Довжина ЗН, мм	300	300	600	–	180
Довжина ЗТ, мм	150	100	1200	–	22
Довжина ЗК, мм	300	300	200–	–	79
Теплоносії	вода	R134a	вода	вода, R134a	вода
КЗ, %	60	60	100	–	–
Тип оребрення	1. Поперечне; 2. Спіральне	–	відсутнє	поперечне	відсутнє
Матеріал ребер	1. Мідь (ЗН), алюміній (ЗК); 2. Сталь	алюміній	–	алюміній	–
Товщина ребер, мм	1. 0,162; 2. 0,8	0,15	–	0,15	–
Крок ребер, мм	1. 2,1; 2. 3,2	2,1	–	2,1	–
Параметри теплообмінного апарату					
Кількість ТС, шт	24 (сталеві), 10 (мідні)	48	6	–	51
Компоновка	–	шахова	шахова	–	шахова
Кількість рядів	–	6	2	1, 2	6
Кількість ходів	1	1	2	–	1, 2, 3, 4, 5
Гарячий теплоносії	повітря	повітря	повітря	повітря	повітря
Вхідна температура, °С	100–300	30–60	50–330	46,2–47,4	101,1–102,7
Швидкість/Витрата	0,5–5,5 м/с	1–2,5 м/с	0,05–0,17 кг/с	2,3; 2,5 м/с	6,7–9,7 г/с
Холодний теплоносії	повітря	повітря	вода	повітря	вода
Вхідна температура, °С	20	22–23	7–10	–	14,1–17
Швидкість/Витрата	0,5–5,5 м/с	1,5 м/с	0,08 кг/с	2,56; 2,6 м/с	10–20 г/с

В [17] описано та досліджено ТОА на ТС, що утилізує теплоту високотемпературного викидного повітря на підігрів води. Характеристики ТС та параметри ТОА наведено в табл. 1. Найвища передана теплова потужність ТОА становила 5400 Вт і була досягнута за вхідної температури гарячого повітря 300 °С та його витраті 0,14–0,17 кг/с. Найнижчий термічний опір ТОА становив 0,05–0,1 К/Вт і був досягнутий за вхідної температури гарячого повітря 300 °С. Найвища ефективність ТОА становила 16 %. Вона відповідала вхідній температурі гарячого повітря 300 °С та його витраті 0,05 кг/с. Таку низьку ефективність можна пояснити відсутністю оребрення на зовнішній поверхні ТС, що не дало змоги організувати ефективний теплообмін між ТС та зовнішніми теплоносіями [17].

На відміну від всіх описаних вище конструкцій ТОА на ТС, у більшості з яких було застосовано ТС класичної конструкції, в теплообміннику, описаному та дослідженому авторами [18], використано контурні ТС (рис. 3, а).



а



б

Рис. 3. Теплообмінник на контурних термосифонах [18]: а – контурний термосифон; б – конструкція теплообмінника

На відміну від класичного ТС, контурний виконано у вигляді замкненого контуру. Зони нагріву та конденсації контурного ТС розміщені горизонтально, причому ЗК розміщується вище за ЗН. ЗН та ЗК з'єднані трубами-перемичками, які фактично є зоною транспорту, оскільки однією з них рухається пара із ЗН до ЗК, а іншою конденсат повертається до ЗН під дією сил гравітації.

ТОА на контурних ТС показано на рис. 3, б. На їх внутрішній поверхні були наявні канавки, призначені для інтенсифікації теплообміну всередині ТС. Характеристики ТС та параметри ТОА наведено в табл. 1.

Метою авторів [18] була перевірка можливості використання води в якості теплоносія в ТС для систем вентиляції і кондиціонування та порівняння ефективності ТОА на ТС з водою та фреоном. Через високе значення теплоти пароутворення, температури насичення та можливості замерзання за низьких температур вода використовується в утилізаторах викидів, які мають температуру 100 °С і вище. Водночас для утилізації теплоти в вентиляційних системах застосовують ТС, заправлені фреонами, завдяки їх низькій температурі насичення. Однак вода є доступнішим, дешевшим та екологічно безпечнішим теплоносієм, ніж фреони, і, до того ж, має кращі теплотранспортні властивості.

Було досліджено два варіанти ТОА: з одним та з двома рядами ТС, при цьому ТОА на контурних ТС був допоміжним елементом, призначеним для попереднього підігріву та охолодження повітря з метою підвищення ефективності та зниження споживання енергії системи. Тому дослідження цього ТОА проводилось у двох режимах: підігріву та охолодження повітря. В режимі підігріву між ЗН та ЗК термосифонів встановлювався нагрівач, а повітря спочатку пропускалось через ЗК, потім нагрівач, потім ЗН. У режимі охолодження між зонами ТС встановлювався холодильник, а повітря пропускалось у зворотному напрямку, тобто ЗН – холодильник – ЗК. У режимі нагрівання ефективність ТОА на ТС з водою становила 19,61–20,14 %, при цьому ефективність ТОА на фреоні – 13,25–13,76 %. За твердженням авторів [18] ефективність ТОА на ТС з водою була на 46–48 % вища, ніж на фреоні. В режимі охолодження ефективність ТОА з ТС на воді становила 16,9 %, а на фреоні – 14,3 %, при чому в обох режимах зі збільшенням швидкості повітря ефективність ТОА зменшувалась незалежно від того, який теплоносієм було застосовано в ТС.

Також вагомим результатом, отриманим у [18], є те, що автори показали можливість використання води в якості теплоносія в ТС для систем вентиляції та кондиціювання, а також те, що ТОА на ТС з водою можуть бути ефективніші в таких системах, ніж ТОА на ТС з фреоном. Проте враховуючи вузький діапазон швидкостей повітря в дослідженні [18] та специфіку дослідженої системи загалом, ці результати не можна екстраполювати на інші системи, і тому питання використання води потребує додаткових досліджень.

У [21] досліджено ТОА на ТС, призначений для підігрівання води гарячими промисловими повітряними викидами (рис. 4, *a*).

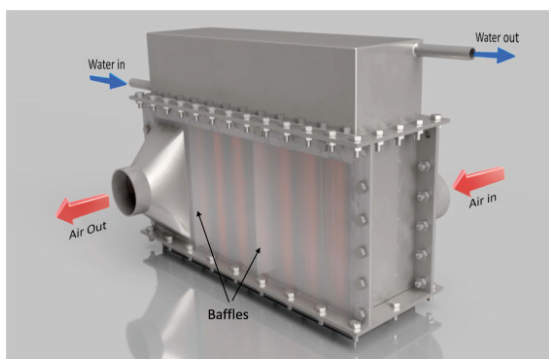
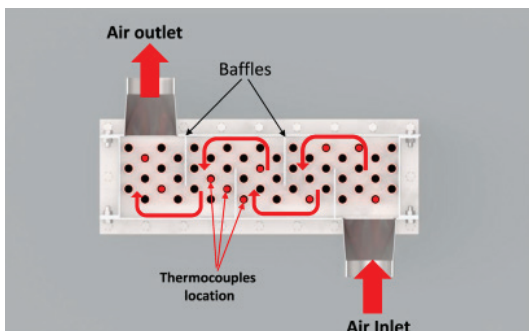
*a**б*

Рис. 4. Багатоходовий теплообмінник повітря-вода на термосифонах [21]: *a* – загальний вигляд; *б* – схема розміщення ходів та руху повітря

У нижній частині теплообмінника (рис. 4, *a*) розміщено 3Н термосифонів, і через неї пропускають гаряче повітря. У верхній частині розміщено 3К термосифонів, і через неї пропускають холодну воду. Особливістю конструкції цього ТОА є те, що він багатоходовий (рис. 4, *б*). Метою авторів [21] було дослідити вплив кількості ходів на характеристики ТОА. Тому було

досліджено ТОА з 1, 2, 3, 4 та 5 ходами. Характеристики ТС та ТОА наведено в табл. 1.

Згідно з отриманими в [21] результатами найкращі характеристики мав ТОА з 5 ходами. Він дозволив утилізувати 459 Вт теплової енергії та мав ефективність 67 %. Крім того, збільшення ходів від 1 до 5 дозволило знизити на 70 % термічний опір теплопередачі конвекцією між гарячим повітрям та 3Н термосифонів. Приблизно на стільки ж знизився і термічний опір ТОА загалом. Також автори [21] з'ясували, що значно більший вплив на теплопередавальні характеристики цього ТОА здійснюють параметри гарячого теплоносія, ніж холодного.

3. Теплообмінні апарати на теплових трубах

У [9, 10, 13, 14] описано ТОА на ТТ, призначений для утилізації теплоти в системах кондиціювання (рис. 5).

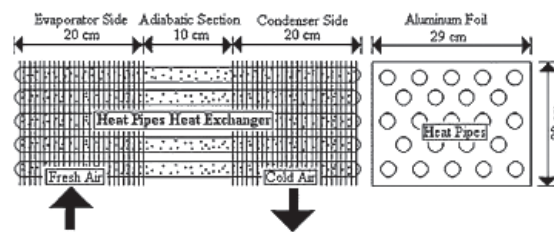


Рис. 5. Теплообмінник на теплових трубах для системи кондиціювання [9]

Як видно з рис. 5, ТОА є пакетом ТТ, розміщених у шаховому порядку. Основні параметри ТТ та ТОА подано в табл. 2. Під час випробувань цього теплообмінника температура холодного повітря на виході з ТОА становила 25 °С, а ефективність сягнула 85 % [13].

Авторами [19] запропоновано конструкцію та проведено CFD-моделювання ТОА на ТТ, призначеного для використання теплових викидів будівлі для підігріву води чи припливного вентиляційного повітря (рис. 6). Цей ТОА сконструйовано за принципом кожухо-трубного теплообмінника, але із застосуванням ТТ. Основні параметри ТТ та ТОА подано в табл. 2. У результаті моделювання було отримано значення температури холодного теплоносія на виході з ТОА від 38,2 до 59,6 °С, причому зі збільшенням витрати холодного теплоносія, його температура на виході зменшувалась. На думку авторів [19] такі результати свідчать про ефективну роботу цього ТОА

Таблиця 2. Характеристики теплових труб та параметри теплообмінних апаратів

Джерело	Srimuang W. et al. [14]	Burlacu A. et al. [19]	Imansyah Ibnu Hakim et al. [20]	Diao Y.H. et al. [24]	Remeli M.F. et al. [25]
Характеристики теплових труб					
Матеріал корпусу	мідь	мідь	мідь	–	мідь
Діаметр корпусу, мм	12,7	10	10	плоско-овал 80x3	–
Загальна довжина, мм	500	1000	710	–	–
Довжина ЗН, мм	200	–	160	138	–
Довжина ЗТ, мм	100	–	360	0	–
Довжина ЗК, мм	200	–	190	138	–
Матеріал КС	латунь	–	мідь	–	–
Тип КС	сітка	–	порошкова	мікроканали	–
Теплоносій	R11, R123	вода	вода	–	–
Тип оребрення	поперечне	відсутнє	хвилясте	гофроване	поперечне
Матеріал ребер	алюміній	–	алюміній	–	алюміній
Товщина ребер, мм	0,5	–	0,105	–	–
Крок ребер, мм	–	–	2	3	–
Параметри теплообмінного апарату					
Кількість ТТ, шт	25	14	12	14, 21, 28	4
Компоновка	шахова	кругова	шахова	коридорна	коридорна
Кількість рядів	5	–	3	2, 3, 4	8
Кількість ходів	1	1	1	1	1
Гарячий теплоносій	повітря	вода	повітря	повітря	повітря
Вхідна температура, °С	26–45	60, 70	28–45	18, 25	82
Швидкість/Витрата	50–160 м ³ /год	10 л/хв	1,5–2,5 м/с	60–150 м ³ /год	1,1–1,6 м/с
Холодний теплоносій	повітря	вода	повітря	повітря	повітря
Вхідна температура, °С	26	10	–	8–16, 11–23	28
Швидкість/Витрата	50–160 м ³ /год	6–30 л/хв	–	60–150 м ³ /год	1,1–1,6 м/с

Авторами [20] було досліджено ТОА на ТТ, призначений для попереднього підігріву чи охолодження вентиляційного повітря перед основним контуром системи кондиціонування. Основною метою його використання є підвищення ефективності всієї системи загалом та зменшення споживання енергії.

ТОА складався з трьох однакових модулів. Взагалі, автори [20] досліджували конфігурації з 1, 2 та 3 модулів, щоб виявити, яка з них виявиться ефективнішою. Кожен модуль складався з 12 мідних ТТ, розміщених у шаховому порядку. Основні параметри ТТ та одного модуля ТОА подано в табл. 2.

Авторами [20] було отримано такі результати: максимальна ефективність 40,25 % була отримана за вхідної температури гарячого повітря 45 °С, його швидкості 1,5 м/с та використання 3 модулів. Найбільша кількість утилізованої теплової енергії становила 400,54 Вт і була досягнута за вхідної температури гарячого повітря 40 °С, його швидкості 2,5 м/с та використан-

ня 3 модулів. Зі збільшенням кількості модулів та вхідної температури гарячого повітря ефективність зростала, а зі збільшенням швидкості повітря – зменшувалась. Кількість утилізованої енергії збільшувалась зі збільшенням кількості модулів, температури та швидкості гарячого повітря. Авторами [20] також було проведено техніко-економічний аналіз використання такого ТОА: найбільшої економії коштів на електроенергії буде досягнуто у разі використання 3 модулів за вхідної температури гарячого повітря 40 °С та його швидкості 2,5 м/с. Термін окупності в цьому випадку становитиме 3 роки, при цьому термін окупності ТОА з 1 або 2 модулями менший, проте і їх ефективність нижча.

У [22] було продовжено дослідження цього ТОА. Метою дослідження було з'ясувати вплив кількості рядів ТТ на теплопередавальні характеристики ТОА. Тому досліджувались ТОА з 3, 6 та 9 рядами. На відміну від [20], у [22] вказано точні параметри компоновки ТТ (рис. 7).

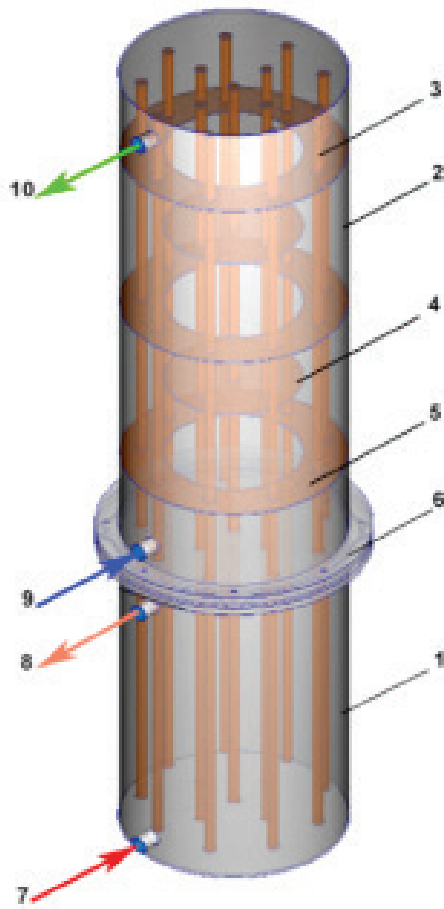


Рис. 6. Теплообмінник на теплових трубах для утилізації еплових викидів будівлі [19]: 1 – зона нагріву; 2 – зона конденсації; 3 – теплові труби; 4, 5 – кільця; 6 – фланець; 7, 8 – вхід та вихід гарячого теплоносія відповідно; 9, 10 – вхід та вихід холодного теплоносія відповідно

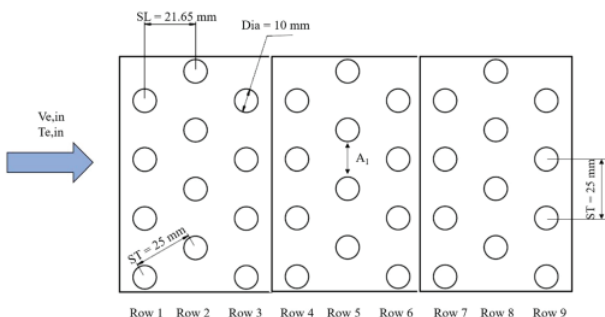


Рис. 7. Компонівка теплових труб у теплообміннику [22]

Умови дослідження ТОА в [22] були повністю аналогічні [20]. Згідно з отриманими результатами [22], найвищу ефективність, переданий тепловий потік та найнижчий термічний опір ТОА

було отримано з 9 рядами ТТ. Найвища ефективність становила 62,6 %, і була отримана за вхідної температури гарячого повітря 45 °С та його швидкості 1,5 м/с. Найвища передана потужність становила 931,6 Вт, а найнижчий термічний опір за цієї потужності 0,0007 К/Вт. Обидва параметри отримані за такої самої температури повітря, але за його швидкості 2,5 м/с. Цими ж авторами, але в роботі [23] було проаналізовано зменшення навантаження основного кондиціонера системи кондиціювання повітря в результаті встановлення перед ним цього ТОА в якості попереднього охолоджувача. Було з'ясовано, що навантаження може бути зменшене на 10–57 % залежно від кількості рядів ТТ у ТОА та параметрів гарячого повітря на вході.

Серед різних типів ТТ виділяють мікро-ТТ (МТТ) – це ТТ настільки малого розміру, що транспортування рідини в них відбувається завдяки капілярним силам, що діють на неї всередині корпусу ТТ, а КС, зазвичай, відсутня. В [9, 12, 24] описано оригінальну конструкцію ТОА на основі плоских МТТ (рис. 8).

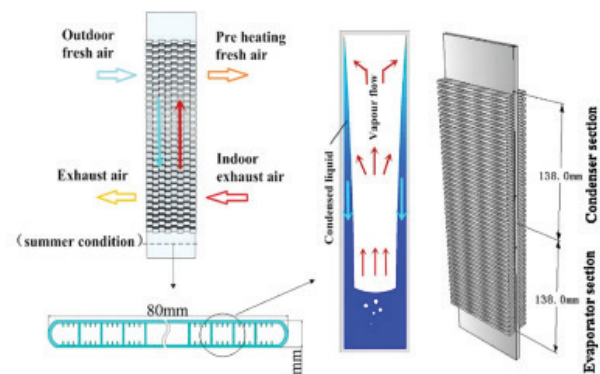


Рис. 8. Плоска мікротеплова труба для теплообмінника-утилізатора [9]

Основним елементом ТОА є плоска МТТ (рис. 8) завширшки 80 мм та завтовшки 3 мм. На внутрішній поверхні корпусу ТТ виконано мікроканали, які покращують транспортування конденсату із ЗК до ЗН. На зовнішній поверхні труби встановлено оребрення, виконане із металевих гофрованих стрічок, приварених до поверхні МТТ. Гофри утворювали прямокутні канали завширшки 3 мм та заввишки 12 мм, причому оребрення організовано таким чином, що канали розміщувались у шаховому порядку. Основні параметри ТТ та ТОА подано в табл. 2.

У результаті проведених досліджень авторами [24] було отримано такі результати. Збільшення

кількості рядів МТТ та різниці вхідних температур гарячого та холодного теплоносіїв призводить до збільшення температурної ефективності ТОА. Водночас збільшення витрати повітря призводить до зниження ефективності. Максимальну ефективність ТОА було отримано для 4 рядів, і вона становила 77–78 %. Збільшення кількості рядів та витрати повітря призводить до збільшення втрат тиску в ТОА. Максимальні втрати тиску становили 31 Па. Водночас збільшення кількості рядів призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії (ККД) ТОА, який визначають як відношення кількості теплової енергії, утилізованої ТОА, до кількості електроенергії, витраченої на прокачування теплоносіїв через нього. ККД досліджуваного ТОА становив від 3,3 до 91,9 %. Тому з погляду балансу між ККД та ефективністю автори [24] рекомендують використовувати ТОА з 3 рядами МТТ. Кількість утилізованої теплової енергії збільшується зі збільшенням кількості рядів, витрати повітря та різниці вхідних температур гарячого та холодного повітря. Максимальна кількість утилізованої теплоти для досліджуваного ТОА становила приблизно 420 Вт. Крім того, використання цього ТОА з 3 рядами МТТ у кліматичних умовах Пекіну дозволяє заощадити 46,17 кВт·год електроенергії в літній період та 44,4 м³ газу в зимовий період у приміщенні, де мешкає родина з трьох осіб.

Деякі дослідники намагаються використовувати теплоту витяжного повітря не лише для підігріву припливного, але і для вироблення електричної енергії. Наприклад, у [25] було досліджено пристрій, в якому сумісне використання ТТ та термоелектричних генераторів (ТЕГ) дозволяло використовувати теплоту промислових викидів для реалізації цих двох задач. Один модуль пристрою складається з восьми ТТ та встановленого між ними ТЕГ. ЗН чотирьох з ТТ розміщені в каналі з гарячим повітрям, а до їх ЗК приєднано ТЕГ. Вони відбирають теплоту від гарячого повітря і передають його на ТЕГ. У інших чотирьох теплових труб ЗН приєднані до ТЕГ, а ЗК розміщені в каналі з холодним повітрям, тобто ці ТТ відводять теплоту від ТЕГ до холодного повітря. Таким чином, за рахунок роботи ТТ на ТЕГ створюється різниця температур, яка завдяки ефекту Зеебека спричиняє генерацію електричного струму. Крім того, здійснюється теплообмін між гарячим та холодним повітрям. Всього досліджувана система налічувала 8 таких модулів. Основні

параметри одного модуля, пристрою загалом та умови дослідження подано в табл. 2.

Авторами [25] було отримано такі результати: ефективність ТОА, вироблена електрична потужність та утилізована кількість теплоти зменшуються зі збільшенням швидкості повітря (останній результат суперечить більшості описаних вище результатів, де щодо утилізованої кількості теплоти спостерігались обернені результати). Найвищу ефективність 41 %, найвищу утилізовану теплову потужність 1079 Вт та найвищу вироблену електричну потужність 7 Вт було отримано за швидкості повітря 1,1 м/с.

4. Теплообмінні апарати на пульсаційних теплових трубах

У [14] описано дві конструкції ТОА на ПТТ різних типів: незамкненій та замкненій з регулюючими клапанами. Основні параметри ПТТ та ТОА наведено в табл. 3. Слід зазначити, що зазвичай у ПТТ під КЗ мають на увазі відношення об'єму заправленої рідини до загального об'єму ПТТ, однак для конструкцій, розглянутих у [14], заправка вказана відносно об'єму ЗН.

Ефективність ТОА на незамкненій ПТТ досягла 54 %, а ТОА на замкненій ПТТ – 76 % [14].

Авторами [26] було запропоновано ТОА, конструкцію якого показано на рис. 9, а, а компоновку ПТТ у ТОА – на рис. 9, б. Основні параметри ПТТ та ТОА наведено в табл. 3.

ПТТ у ТОА було розміщено в шаховому порядку із поперечним кроком (S_y на рис. 9, б) 2,18 см, та поздовжнім (S_z) 1 см.

Авторами [26] було проведено розрахунковий аналіз роботи цього ТОА та отримано такі результати: передана теплова енергія 10,76 кВт, при цьому ефективність ТОА становить приблизно 48 %, а втрати тиску 36,4–39,8 Па. Крім того було з'ясовано, що використання цього ТОА в комерційних будівлях регіонів США, що належать до різних кліматичних зон (від континентального клімату до пустельного) дозволяє зменшити їх енергоспоживання на 16–20 % на рік.

Тими самими авторами в роботі [16] було експериментально досліджено ПТТ, призначену для утилізації теплоти у вентиляційних системах. Її основні характеристики та умови дослідження наведено в табл. 3. Як теплоносієм використовувався n-пентан, який було обрано не лише через його теплофізичні характеристики, але і через те, що він є нетоксичним та безпечним для озонного шару [16].

Таблиця 3. Характеристики пульсаційних теплових труб та параметри теплообмінних апаратів

Джерело	Srimuang W. et al. [14]	Mahajan G. et al. [26]	Mahajan G. et al. [16]	Mahajan G. et al. [27]	Yang H. et al. [28]
Характеристики пульсаційних теплових труб					
Тип ПТТ	незамкнена, замкнена з регулюючими клапанами	замкнена	замкнена	замкнена	незамкнена
Матеріал корпусу	мідь	мідь	мідь	мідь	мідь
Зовнішній/внутрішній діаметр корпусу, мм	–/2	3,18/1,65	3,18/1,65	3,18/1,65	3/2
Загальна довжина, мм	600, 388	–	620	1346	540
Довжина ЗН, мм	190	610	300	635	240
Довжина ЗТ, мм	–, 8	–	20	76	60
Довжина ЗК, мм	190	610	300	635	240
Кількість витків	8, 20	20	9	9	40
Теплоносій	вода, R143a	ацетон	n-пентан	n-пентан	R143a
КЗ, %	50	–	60, 70	70	50
Тип оребрення	відсутнє	лопаткове	відсутнє	спіральне	відсутнє
Матеріал ребер	–	алюміній	–	мідь	–
Товщина ребер, мм	–	0,397	–	0,381	–
Крок ребер, мм	–	8	–	2,1	–
Параметри теплообмінного апарату					
Кількість ПТТ, шт	32, 2, 5	15	1	1	40
Кількість ходів	1	1	1	1	1
Гарячий теплоносій	гази, повітря	повітря	повітря	повітря	повітря
Вхідна температура, °C	60–80, 50–70	37,78	45		30–45
Швидкість/Витрата	3,3; 0,5–1 м/с	1,18 м ³ /с	0,19 м ³ /с	0,19 м ³ /с	1–3,5 м/с
Холодний теплоносій	повітря	повітря	повітря	повітря	повітря
Вхідна температура, °C	30	21,11	–6	10	26
Швидкість/Витрата	–	1,18 м ³ /с	0,19 м ³ /с	0,19 м ³ /с	1–3,5 м/с

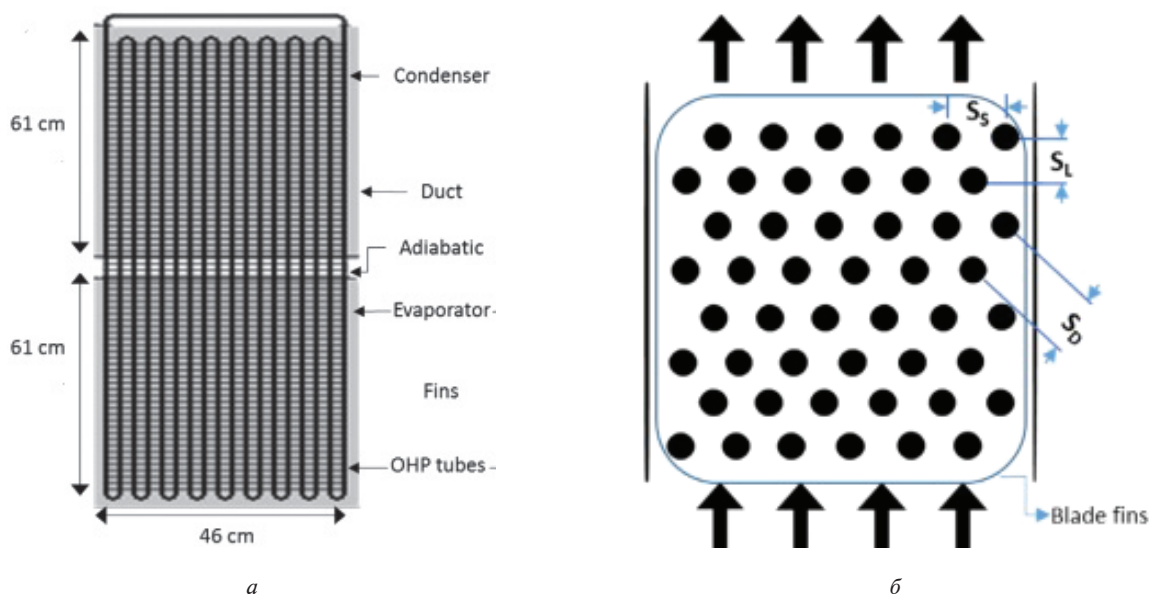


Рис. 9. Конструкція пульсаційної теплової труби (а) та їх компоновка в теплообміннику (б) [26]

За результатами досліджень [16] втрати тиску на ПТТ становили 62 Па, однак слід враховувати, що це сумарні втрати ПТТ, конфузора і дифузора, що використовувались для підведення до неї повітряного потоку. Кращі теплопередавальні характеристики ПТТ мала з КЗ 70 %, а саме: переданий тепловий потік 225 Вт, термічний опір 0,11 К/Вт, ефективність 5 %. Таку низьку ефективність можна пояснити тим, що використовувалась одинична ПТТ та ще й з неоребреною зовнішньою поверхнею. Проте значна передана тепла потужність та низький термічний опір демонструють потенціал використання ПТТ для утилізації теплоти у вентиляційних системах.

Тими самими авторами в [27] було досліджено ПТТ зі спіральним оребренням (рис. 10). Основні характеристики та умови дослідження наведено в табл. 3. Щоб оцінити ефект від оребрення, автори [27] дослідили в однакових умовах дві однакові ПТТ, але одна з них була з оребренням, а інша – без.

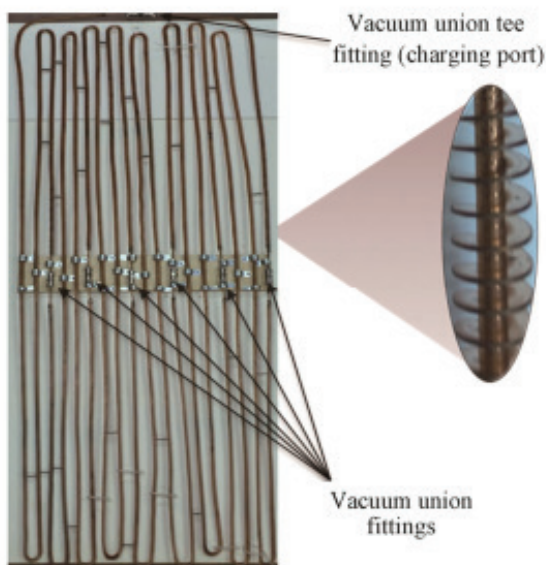


Рис. 10. Пульсаційна тепла труба зі спіральним оребренням [27]

Було отримано такі результати [27]: для неоребреної ПТТ – максимальна потужність, що передається, 210 Вт, мінімальний термічний опір 0,06 К/Вт, втрати тиску повітря 3,7 Па; для оребреної ПТТ – максимальна потужність, що передається, 400 Вт, мінімальний термічний опір 0,04 К/Вт, втрати тиску повітря 10,5 Па. Таким чином, оребрення дозволяє збільшити максимальну потужність, що передає ПТТ, на 80 %.

Водночас втрати тиску в повітряному каналі зростають на 6,8 Па, але це призводить до збільшення потужності вентилятора, що прокачує повітря, лише на 1–2 Вт, тобто позитивний вплив оребрення на теплопередавальні характеристики ПТТ переважає над збільшенням аеродинамічного опору.

В [28] було досліджено ТОА, який складався з сорока 40-виткових ПТТ незамкненого типу. ПТТ були встановлені паралельно одна одній, тобто компоновка була коридорною. Основні параметри ПТТ та ТОА наведено в табл. 3. Особливістю цього дослідження було вивчення впливу кута нахилу на теплопередавальні характеристики ТОА: він змінювався від 0° (горизонтальне положення) до 90° (вертикальне положення з нагрівом знизу).

Автори [28] отримали такі результати. У разі кута нахилу 0° ПТТ запускались за різниці температур гарячого і холодного повітря на вході 4 °С, а загальна температурна ефективність ТОА становила 30 %. У разі збільшення кута нахилу теплопередавальні характеристики ТОА покращувались, а найкращі результати були отримані за кутів нахилу 60° та 90°, коли ефективність ТОА сягла 50 %. За постійної швидкості повітря 1,5 м/с та кута нахилу 90° збільшення вхідної температури гарячого повітря від 30 до 42 °С призводила до зростання ефективності ТОА з 37 до 48 %. За того самого кута нахилу та фіксованої вхідної температури гарячого повітря 38 °С збільшення швидкості з 1,3 до 3,3 м/с призводило до збільшення потужності, що передавав ТОА, з 440 до 821 Вт, проте ефективність зменшувалась з 49 до 36 %, а втрати тиску в каналі гарячого повітря зростали з 15 до 47 Па. На думку авторів [28] такі результати свідчать про значний потенціал використання ТОА на ПТТ для утилізації теплоти у вентиляційних системах у літній період.

5. Теплообмінники на двофазних пристроях для регулювання вологості повітря

В усіх описаних вище ТОА під ефективністю малася на увазі температурна ефективність. Крім того, в багатьох джерелах [1, 9, 11, 12, 38] стверджується, що ТОА на ПТТ не можуть утилізувати теплоту випаровування вологи з повітря, а отже і не можуть бути застосовані в системах, де окрім утилізації теплоти необхідне також і регулювання вологості повітря, наприклад, в умовах субтропічного та тропічного клімату. Не ди-

влячись на це, в [10, 29] розглянуто конструкцію призначену як для утилізації теплоти, так і для зменшення вологості повітря.

Досліджений у [29] ТОА складався з 8 рядів по 8 ТС у кожному. ТС було виготовлено із мідної труби із зовнішнім діаметром 15,9 мм і товщиною стінки 0,48 мм. На зовнішній поверхні ТС було встановлено оребрення. Крок між ТС у ТОА становив 40 мм.

ТОА використовувався як допоміжний у системі кондиціонування повітря. Зони нагріву ТС було розміщено в каналі припливного повітря для забезпечення попереднього охолодження повітря перед основним кондиціонером. Зони конденсації було розміщено за основним кондиціонером у каналі, по якому повітря подавалось у приміщення. Вони забезпечували підігрівання повітря перед його подачею в приміщення [29].

Цей ТОА було досліджено в таких умовах: температура гарячого повітря на вході 20–32 °С, вологість повітря 50–80 %, швидкість повітря 1–2 м/с. Основним результатом, отриманим автором [29], є зменшення відношення явної теплоти (тобто переданої за рахунок різниці температур) до повної теплоти (сума явної та теплоти пароутворення, що вивільняється під час конденсації вологи з повітря) для всієї системи з 0,688 до 0,188. Це означає, що встановлення ТОА на ТС значно покращило здатність системи до зменшення вологості повітря.

В оглядовій роботі [30] наведено результати дослідження ТОА, що складався з ТТ, який також був лише допоміжним елементом, призначеним для підвищення ефективності роботи основного кондиціонера, що розміщувався між ЗН та ЗК теплових труб. Згідно з наведеними у [30] результатами без використання ТОА на ТТ кондиціонер видаляв 3,68 г/с вологи з повітря, тоді як разом із описаним вище ТОА цей показник зріс до 5,25 г/с. Крім того, так само в [30], описано ще два випадки використання ТОА на ТТ в якості допоміжних елементів у системах кондиціонування. В одному з них застосування ТОА на ТТ дозволило збільшити здатність системи до зменшення вологості повітря на 22–42 %, в іншому – на 24–54 %. Такий ефект можна пояснити попереднім охолодженням повітря, яке відбувається в ТОА. Як наслідок, повітря потрапляє в кондиціонер з нижчою температурою, що дає йому змогу видалити більше вологи.

Також важливим результатом, наведеним у [30], є те, що накопичення конденсату на оребрених поверхнях ЗН теплових труб май-

же не впливає на аеродинамічний опір та теплову ефективність ТОА. Однак це твердження справедливе лише для ТОА з горизонтально орієнтованими ТТ. За такої орієнтації та попередньому оребренню конденсат стікає з поверхні ребер під дією сил гравітації і не накопичується в міжреберному просторі, спричинюючи погіршення характеристик ТОА.

В оглядовій роботі [31] також описано численні випадки теоретичних та експериментальних досліджень роботи ТОА на різних видах ТТ в якості допоміжних елементів систем кондиціонування. Серед результатів, наведених у [31], в якості найбільш важливих можна виділити такі: використання ТОА на ТТ та ТС дозволяє підвищити ККД всієї системи в 2 рази та збільшити видалення вологи з повітря на 62 %; ТОА на ТС мають мінімальну ефективність, якщо швидкості гарячого та холодного повітря будуть однаковими; визначаючи ефективність роботи ТС в умовах вологого повітря, необхідно враховувати теплоту, що виділяється під час конденсації вологи з повітря. Так, якщо скласти відношення повної теплоти, переданої ТС, до теплоти, переданої лише за рахунок різниці температур (без врахування конденсації), то для умов вологого повітря воно буде більше 1, тоді як для сухого повітря дорівнює 1. Теплота, що виділяється під час конденсації, може становити до 20 % загальної кількості теплоти, переданої ТС.

Таким чином можна зробити висновок, що використання ТОА на ТС та ТТ у системах кондиціонування повітря навіть в якості допоміжних елементів призводить до значного покращення спроможності таких систем до видалення вологи з повітря. Це демонструє принципову можливість використання таких ТОА в системах регулювання вологості повітря. Крім того, аналізуючи ефективність ТОА на ТС та ТТ, необхідно обов'язково враховувати теплоту, що виділяється під час конденсації вологи з повітря, оскільки такі ТОА здатні її утилізувати.

6. Теплообмінні апарати на інших видах двофазних теплопередавальних пристроїв

У літературі описано випадки застосування двофазних теплопередавальних пристроїв, відрізняючись від класичних ТС та ТТ, для утилізації теплоти в вентиляційних системах. Наприклад, автори [39] розробили та дослідили регенеративний теплообмінник компактних розмірів (200×200×200 мм).

Він складався з 46 мідних труб зовнішнім діаметром 15 мм. Їх було розміщено в шаховому порядку з однаковими поперечним та діагональним кроками рівними 30 мм. Кожну трубу було вакуумовано, заповнено рідким теплоносієм на 50 % від повного об'єму та герметизовано. В якості теплоносія використовувались фреони R11, R123, R245fa, а також n-пентан та ізопентан. Було встановлено пластини-направляючі, за допомогою яких організовувався прохід повітря через ТОА в 3 ходи.

Метою авторів [39] було дослідити вплив теплоносіїв на ефективність ТОА.

Основні теплопередавальні елементи цього ТОА за своєю конструкцією повністю повторюють ТС, і в основі їх роботи також лежить замкнений випарно-конденсаційний цикл. Проте в ТС процеси випаровування та конденсації теплоносія відбуваються одночасно, а в цих пристроях – по черзі. Спочатку труби омиваються гарячим повітрям, вони прогріваються по всій довжині, повітря охолоджується, а частина теплоносія всередині труб випаровується. Потім труби омиваються холодним повітрям, воно нагрівається, труби охолоджуються по всій довжині, а теплоносій всередині труб конденсується. Далі цикл повторюється. Таким чином реалізується принцип роботи регенеративного ТОА з акумуляцією теплоти у вигляді теплоти пароутворення рідкого теплоносія.

Автори [39] дослідили цей ТОА математично за таких умов: температура припливного повітря 0–40 °С, температура витяжного повітря 24 °С, швидкість повітря 1, 2, 3 м/с. Згідно з отриманими результатами найкращим теплоносієм виявився n-пентан, оскільки під час його застосування ТОА забезпечив утилізацію найбільшої кількості енергії в розмірі 426,22 кДж/год. Крім того, згідно з [39], цей теплоносій є найбільш екологічно безпечним, оскільки не руйнує озоновий шар та має найнижчий показник потенціалу глобального потепління серед усіх досліджених теплоносіїв. Єдиним його недоліком є висока горючість. Проте цей недолік можна подолати, обладнавши вентиляцію системою попередження займання. Також у [39] зазначено, що збільшення швидкості повітря призводить до збільшення кількості утилізованої теплоти.

References

- [1] V.I. Deshko, I.O. Sukhodub, *Efficiency of heat utilization in ventilation systems*, Kyiv, Ukraine: IESEM NTUU “KPI” (in Ukrainian), 2016.

Висновки

1. Теплообмінні апарати на двофазних теплопередавальних елементах мають широкі перспективи використання для утилізації теплоти в системах вентиляції, оскільки мають повну теплову ефективність до 85 % та можуть бути використані в системах з контролем вологості повітря.

2. Можна виділити такі загальні риси конструкцій теплообмінників-утилізаторів на двофазних теплопередавальних пристроях:

- використання термосифонів, теплових труб з капілярною структурою та пульсаційних теплових труб замкнутого типу як основних теплопередавальних елементів теплообмінника;

- використання шахової компоновки труб;

- виготовлення корпусів теплопередавальних пристроїв, а також капілярної структури, якщо вона наявна, з міді;

- застосування як теплоносіїв у двофазних пристроїв води для утилізації теплоти викидів з температурою 100 °С і вище та фреонів, n-пентану та ізопентану для утилізації теплоти вентиляційного повітря будівель;

- використання алюмінієвого оребрення на зовнішній поверхні зон теплообміну теплопередавальних пристроїв.

3. Існує низка невирішених питань, які потребують розв'язання для створення нових теплообмінників-утилізаторів на двофазних теплопередавальних пристроях:

- оптимізація конструкції ТС та ТТ, зокрема:

- а) вибір діаметра та форми корпусу;

- б) вибір теплоносія, який ефективно працював би за температур, характерних для вентиляційних систем, і був екологічно безпечним;

- в) вибір оптимального коефіцієнта заправки для термосифонів та пульсаційних теплових труб;

- г) вибір оптимальних параметрів капілярної структури для теплових труб;

- вибір кількості рядів теплових труб чи термосифонів у теплообміннику та кроків їх розміщення;

- оптимізація параметрів оребрення;

- дослідження коефіцієнтів тепловіддачі від/до повітря, коефіцієнта теплопередачі теплообмінника, втрат тиску повітря на теплообмінному апараті;

- питання відводу конденсату у випадку конденсації вологи з повітря.

- [2] S.K. Kusakov, “Low potential heat sources and requirements for heat exchange equipment for energy efficient utilization of such heat”, (in Ukrainian), *Intehrovani tekhnologii ta enerhozberezhennia*, no. 4, pp. 79–90, 2019, doi: 10.20998/2078-5364.2019.4.10.
- [3] L.V. Didyk and M.V. Stepanov, “Calculation method of heat exchanger with elastic heat transfer surface for utilization of exhaust air heat”, (in Ukrainian), *Ventylatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia*, iss. 16, pp. 94–100, 2012.
- [4] M. Kordyukov, V. Deshko, I. Sukhodub, “Heat and mass transfer processes in air-to-air membrane recuperative heat exchanger in summer”, (in Ukrainian), *Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia*, vol. 50, no. 1, pp. 24–31, Mar. 2014, doi: 10.15673/0453-8307.1/2014.32643.
- [5] V.I. Deshko, I.O. Sukhodub, A.V. Popkov, “Energy balance of ventilation systems with utilization”, (in Ukrainian), *Budivelni konstruktsii*, iss. 80, pp. 73–77, 2014.
- [6] M.V. Stepanov, V.H. Dziubenko, M.V. Shynkarenko, “Heat exchanger”, (in Ukrainian), UA Patent 65348 A, Mar. 15, 2004.
- [7] M.V. Stepanov, L.V. Didyk, P.H. Berehova, “Investigation of heat transfer between air and elastic surface”, (in Ukrainian), *Ventylatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia*, iss. 11, pp. 67–71, 2007.
- [8] S.Z. Polishhuk, E.G. Kushnir, I.Ju Lesnikova, V.O. Petrenko, Ju.D. Vasil’eva, E.A. Homenko, “Utilization of industrial exhaust heat and quality of air environment”, (in Russian), *Stroitel’stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Serija: Jenergetika, jekologija, komp’juternye tekhnologii v stroitel’stve*, iss. 76, pp. 212–220, 2014.
- [9] Qi Xu, Saffa Riffat, Shihao Zhang, “Review of Heat Recovery Technologies for Building Applications”, *Energies*, vol. 12, iss. 7, Apr. 2019, Art. no. 1285, doi: 10.3390/en12071285.
- [10] A. Mardiana-Idayu, S.B. Riffat, “Review on heat recovery technologies for building applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, iss. 2, pp. 1241–1255, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.09.026.
- [11] D. O’Connor, J.K. Calautit, B.R. Hughes, “A Review of Heat Recovery Technology for Passive Ventilation Applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 1481–1493, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.039.
- [12] E.A. Zender-Swiercz, “Review of Heat Recovery in Ventilation”, *Energies*, vol. 14, iss. 6, Mar. 2021, Art. no. 1759, doi: 10.3390/en14061759.
- [13] P.M. Cuce, S. Riffat, “A comprehensive review of heat recovery systems for building applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 665–682, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.03.087.
- [14] W. Srimuang, P. Amatachaya, “A review of the applications of heat pipe heat exchangers for heat recovery”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, iss. 6, pp. 4303–4315, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.03.030.
- [15] M. Muhsen, Yunting Ge, A. Karamallah, W. Mohammad, “Experimental Performance of R134a Filled Thermosyphon Heat Pipe Heat Exchanger using Plain and Rifled Tubes”, *Elixir Thermal Engineering*, vol. 93, pp. 39348–39359, Apr. 2016.
- [16] Govinda Mahajan, Scott M. Thompson, Heejin Cho, “Experimental characterization of an n-pentane oscillating heat pipe for waste heat recovery in ventilation systems”, *Heliyon*, vol. 4, iss. 11, Nov. 2018, Art. no. e00922, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00922.
- [17] J. Ramos, A. Chong, H. Jouhara, “Experimental and Numerical investigation of a cross flow air-to-water heat pipe-based heat exchanger used in waste heat recovery”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 102, pp. 1267–1281, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.100.
- [18] H. Jouhara, R. Meskimmon, “An investigation into the use of water as working fluid in wraparound loop heat pipe heat exchanger for applications in energy efficient HVAC systems”, *Energy*, vol. 156, pp. 597–605, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.05.134.
- [19] A. Burlacu *et al.*, “Energy efficient heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in buildings”, *Procedia Manufacturing*, vol. 22, pp. 714–721, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.03.103.
- [20] Imansyah Ibnu Hakim, Nandy Putra, Ragil Sukarno, Muhammad Rifqi Audi, Fadhil Fuad Rachman, “Experimental Study on Utilization of Heat Pipe Heat Exchanger for Energy Conservation of Air Conditioning System in a Hospitals and its Techno-Economic Feasibility”, in *AIP Conf. Proc.* 2255, 2020, Paper no. 030067, doi: 10.1063/5.0014138.
- [21] H. Jouhara *et al.*, “Experimental and theoretical investigation of the performance of an air to water multi-pass heat pipe-based heat exchanger”, *Energy*, vol. 219, Mar. 2021, Art. no. 119624, doi: 10.1016/j.energy.2020.119624.
- [22] Ragil Sukarno, Nandy Putra, Imansyah Ibnu Hakim, Fadhil Fuad Rachman, Teuku Meurah Indra Mahlia, “Multi-stage heat pipe heat exchanger for improving energy efficiency of the HVAC system in a hospital operating room”, *Int. J. Low-Carbon Technologies*, vol. 16, iss 2, pp. 259–267, May 2021, doi: 10.1093/ijlct/ctaa048.
- [23] Ragil Sukarno, Nandy Putra, Imansyah Ibnu Hakim, Fadhil Fuad Rachman, Teuku Meurah Indra Mahlia, “Utilizing heat pipe heat exchanger to reduce the energy consumption of airborne infection isolation room HVAC system”, *J. Building Engineering*, vol. 35, Mar. 2021, Art. no. 102116, doi: 10.1016/j.jobe.2020.102116.
- [24] Y.H. Diao, L. Liang, Y.M. Kang, Y.H. Zhao, Z.Y. Wang, T.T. Zhu “Experimental study on the heat recovery characteristic of a heat exchanger based on a flat micro-heat pipe array for the ventilation of residential buildings”, *Energy and Buildings*, vol. 152, pp. 448–457, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.07.045.
- [25] M.F. Remeli *et al.*, “Experimental investigation of combined heat recovery and power generation using a heat pipe assisted thermoelectric generator system”, *Energy Conversion and Management*, vol. 111, pp. 147–157, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2015.12.032.

- [26] G. Mahajan, S.M. Thompson, H. Cho, “Energy and cost savings potential of oscillating heat pipes for waste heat recovery ventilation”, *Energy Reports*, vol. 3, pp. 46–53, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.egy.2016.12.002.
- [27] G. Mahajan, H. Cho, A. Smith, S.M. Thompson, “Experimental Analysis of Atypically Long Finned Oscillating Heat Pipe for Ventilation Waste Heat Recovery Application”, *J. Therm. Sci.*, iss. 29, pp. 667–675, Jun. 2020, doi: 10.1007/s11630-019-1178-5.
- [28] Honghai Yang, Jun Wang, Ning Wang, Fengchang Yang, “Experimental study on a pulsating heat pipe heat exchanger for energy saving in air-conditioning system in summer”, *Energy & Buildings*, vol. 197, pp. 1–6, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.05.032.
- [29] Y.H. Yau, “Application of a heat pipe heat exchanger to dehumidification enhancement in a HVAC system for tropical climates – a baseline performance characteristic study”, *Int. J. Thermal Sciences*, vol. 46, iss. 2, pp. 164–171, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.02.006.
- [30] Y.H. Yau, M. Ahmadzadehtalatapeh, “A review on the application of horizontal heat pipe heat exchangers in air conditioning systems in tropics”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, iss. 2–3, pp. 77–84, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2009.07.011.
- [31] Ehsan Firouzfard, Mohammad Soltanieh, S. Hossien Noie, M. Hassan Saidi, “Application of heat pipe heat exchangers in heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems”, *Scientific Research and Essays*, vol. 6, no. 9, pp. 1900–1908, May 2011.
- [32] M.G. Semena, A.N. Gershuni, V.K. Zaripov, *Heat pipes with felt-metal capillary structures*, Kyiv, USSR: Vyshcha shkola (in Russian), 1984.
- [33] D.A. Reay, P.A. Kew, R.J. McGlen, *Heat Pipes. Theory, Design and Applications*, 6th ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2014.
- [34] Hongbin Ma *Oscillating Heat Pipes*, New York, NY, USA: Springer, 2015.
- [35] V.Yu. Kravets, *Heat transfer processes in miniature evaporation-condensation cooling systems*, Kharkiv, Ukraine: FOP Brovin O.V. (in Ukrainian), 2018.
- [36] M.K. Bezrodnyj, I.L. Piore, T.O. Kostjuk, *Transfer processes in two phase thermosyphon systems. Theory and practice*, 2nd ed. Kyiv, Ukraine: Fakt (in Russian), 2005.
- [37] E.S. Alekseik, “Influence of regime and geometric factors on heat-transfer characteristics of pulsating heat pipes”, Ph.D. dissertation, Dept. Nucl. Power Plants and Eng. Thermal Phys., NTUU “KPI”, Kyiv, Ukraine, 2015.
- [38] B. Kutnyi, B. Novakh, “Regenerative latent heat energy storage device for air supply ventilation unit”, (in Ukrainian), *Zbirnyk naukovykh prats PolNTU. Seriya: Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, iss. 1, pp. 232–238, 2016.
- [39] Ali Koz, Hüseyin Yağlı, Hasan Hüseyin Bilgic, Yıldız Koz, Ayşenur Izzemir, “Performance analysis of a novel organic fluid filled regenerative heat exchanger used heat recovery ventilation (OHeX-HRV) system”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 41, Oct. 2020, Art. no 100787, doi: 10.1016/j.seta.2020.100787.

Ye. Alekseik, O. Alekseik

HEAT EXCHANGERS BASED ON TWO-PHASE HEAT TRANSFER ELEMENTS FOR HEAT RECOVERY IN VENTILATION SYSTEMS: A REVIEW

Background. Heat exchangers-utilizers for recovery of ventilation air heat are widely used for increasing of buildings energy efficiency. Two-phase elements, such as: thermosyphons, heat pipes and pulsating heat pipes are applied to these heat exchangers for increasing of efficiency of heat transfer between hot and cold air. But such heat exchangers should have high temperature efficiency, enthalpy efficiency and energy efficiency at low aerodynamic drag. Moreover, working conditions of ventilation systems, such as: relatively low working temperatures and low temperature difference between hot and cold air, make it difficult to choose heat carriers for two-phase elements. Thus, it is necessary to solve a number of complex problems for designing of effective heat exchangers-utilizers based on two-phase elements.

Objective. To find out unresolved and understudied issues of designing of heat exchangers-utilizers based on two-phase elements for ventilation systems.

Methods. Analysis of described in literature designs, their characteristics and results of investigations.

Results. General features of two-phase elements based heat exchangers-utilizers designs and a number of issues which need further investigation were detected as a result of literature sources analysis.

Conclusions. Heat exchangers based on two-phase heat transfer elements have wide perspective of applying and provide full heat efficiency up to 85%. However, there is a number of unsolved issues connected with: optimization of two-phase elements and heat exchangers design, ribbing optimization, investigation of heat transfer intensity and heat transfer coefficients, investigation of aerodynamic drag, condensate rejecting.

Keywords: heat recovery, ventilation systems, heat exchanger, thermosyphon, heat pipe, pulsating heat pipe.

Рекомендована Радою
Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
11 січня 2022 року

Прийнята до публікації
27 червня 2022 року

Doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.262072

УДК 621.3

А.О. Найдьонов*, В.М. Коваль
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна
*corresponding author: naidoffinc@gmail.com

СЕНСОРИ НА ОСНОВІ НАНОЦЕЛЮЛОЗИ ДЛЯ БІОРОЗКЛАДНОЇ, ГНУЧКОЇ, ОДНОРАЗОВОЇ І НОСИМОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Проблематика. Швидкий технічний прогрес призвів до зниження терміну експлуатації побутової електроніки. Впровадження приладів зеленої гнучкої електроніки, що здатні біологічно розкладатися, дозволять запобігти екологічній катастрофі. Останнім часом все більшої популярності набуває використання органічних матеріалів замість неорганічних аналогів, що дає змогу перейти від жорстких твердотільних сенсорів багаторазового використання, що потребують утилізації, до гнучких, одноразових сенсорів, що придатні до носіння людиною на тілі або одязі й до самочинного розкладання у природі після використання. Одним із таких перспективних органічних матеріалів є наноцелюлоза.

Мета дослідження. Вивчення можливості використання наноцелюлози для виготовлення гнучких, носимих, одноразових сенсорів різних видів фізичних та хімічних величин.

Методика реалізації. У статті проаналізовано, класифіковано та здійснено порівняння різних технологій і особливостей синтезу, а також основних характеристик гнучких сенсорів, виготовлених на основі наноцелюлози. Також у роботі було зіставлено основні параметри гнучких сенсорів на основі наноцелюлози з відповідними аналогами сенсорів на основі штучних полімерів.

Результати дослідження. У роботі було встановлено фізичні та технологічні особливості використання наноцелюлози для виготовлення сенсорів різних видів фізичних та хімічних величин з метою покращення їх робочих характеристик. Встановлено, що наноцелюлоза може використовуватися як у якості підкладки, так і у якості чутливого елемента сенсора. Також було показано, що наноцелюлоза може використовуватися як у сенсорах, що ґрунтуються на електричних фізичних явищах, так і на оптичних ефектах.

Висновки. Наноцелюлоза є перспективним біорозкладним матеріалом, на основі якого можна створювати гнучкі, одноразові, носимі сенсори. Технологія виготовлення таких сенсорів має містити лише низькотемпературні та сухі процеси обробки. Для ефективного застосування в певних видах сенсорів доцільно виготовляти наноцелюлозу з модифікованою поверхнею або у вигляді композитів з іншими наноматеріалами. На основі одержаних результатів можна вдосконалювати наявні та розробляти нові методи створення гнучких носимих одноразових сенсорів, які не потребують утилізації.

Ключові слова: гнучкий носимий одноразовий сенсор, біорозкладна електроніка, наноцелюлоза.

Вступ

Швидкий технічний прогрес призвів до зниження терміну експлуатації побутової електроніки (в середньому мобільні телефони використовуються протягом 18 місяців, а комп'ютери — 3 роки до заміни на більш сучасні). Щодня тільки у США понад 426 000 мобільних телефонів і 112 000 комп'ютерів відправляється на сміттєзвалище [1]. Впровадження приладів зеленої гнучкої електроніки, що здатні біологічно розкладатися, дозволять запобігти еколо-

гічній катастрофі. Останнім часом все більшої популярності набуває використання органічних матеріалів замість неорганічних аналогів, що дає змогу перейти від жорстких твердотільних сенсорів багаторазового використання, що потребують утилізації, до гнучких, одноразових сенсорів, що придатні до носіння людиною на тілі або одязі й до самочинного розкладання у природі після використання. Одним із таких перспективних органічних матеріалів є наноцелюлоза. Наноцелюлоза — це наноструктурований біополімер. Залежно від методу одержання наноце-

Пропозиція для цитування цієї статті: А. О. Найдьонов, В. М. Коваль, «Сенсори на основі наноцелюлози для біорозкладної, гнучкої, одноразової і носимої електроніки», *Наукові вісті КПІ*, № 1–2, с. 26–41, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.262072

Offer a citation for this article: A.O. Naidonov, V.M. Koval, "Sensors based on nanocellulose for biodegradable, flexible, disposable and wearable electronics", *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 26–41, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.262072.

люлозу поділяють на три види: нанокристалічну целюлозу (CNC), нанофібрильовану целюлозу (CNF) та бактеріальну целюлозу (BNC). Наноцелюлозу екстрагують з деревної [2] та недеревної сировини (солома пшениці, очерет, міскантус, кенаф тощо [3]) різними методами: методом гідролізу (наприклад, під дією сульфатної кислоти) або методом окислення (наприклад, у системі 2,2,6,6-тетраметилпіперидин-1-оксил (TEMPO)) [3]. Використовують цей матеріал у сенсориці або у вигляді суспензії з подальшим нанесенням на поверхню сенсора у якості чутливого шару [4], або у вигляді окремої гнучкої плівки, що сама слугує підкладкою для подальшого нанесення наступних функціональних шарів [5].

Наноцелюлоза відповідає вимогам сучасних напрямів (трендів) розвитку електроніки – біорозкладності, гнучкості, одноразовості та носимості. Біорозкладний (biodegradable) матеріал – це матеріал, який здатний розкладатися внаслідок дії ферментативної активності мікроорганізмів (грибів, дріжджів та бактерій) без забруднення довкілля. Використання таких матеріалів для виготовлення електронних приладів може значно спростити процес їх утилізації, а також скоротити токсичні відходи, що не розкладаються у природних умовах самочинно [6]. Перевагою наноцелюлози як матеріалу для підкладок біорозкладних сенсорів є те, що вона розкладається у навколишньому середовищі за доволі невеликий проміжок часу. Зразок наноцелюлози під впливом зовнішніх факторів втрачає від 40 до 90 % своєї маси за 75 діб на відміну від штучних полімерів, втрата маси яких займає сотні й навіть тисячі років [7].

Гнучким вважається прилад (flexible sensor), який може змінювати свою форму на величину, що є більшою за його лінійне температурне розширення без втрати своїх властивостей та без руйнування. Протягом останніх десятиліть у суспільстві зростає інтерес до гнучких електронних пристроїв, які мають унікальні механічні властивості, а саме: здатність до деформації, скручування, повного згинання чи навіть розтягнення, чого традиційна твердотіла електроніка забезпечити не може. Завдяки таким властивостям пристрої гнучкої електроніки можуть набувати різних форм, повторюючи форму поверхні, на яку їх монтують. Перспективною сферою застосування пристроїв гнучкої електроніки є портативні пристрої моніторингу здоров'я людини, системи віддаленого спостереження за пацієн-

том і віддаленої діагностики захворювань [7]. Матеріалами для виготовлення гнучкої електроніки є неорганічні матеріали, органічні синтетичні полімери та органічні природні полімери. До неорганічних гнучких підкладок належить ультратонкий кремній – монокристалічний кремній завтовшки менш, як 100 мкм. Однак такий матеріал є достатньо крихким. Синтетичні полімерні плівки (поліімід, полівінілхлорид, полістирол) є нині найпоширенішими матеріалами для виготовлення гнучких сенсорів. Однак такі прилади потребують спеціальної утилізації. Особливістю природних полімерних матеріалів (папір, CNC, CNF, BNC тощо) є здатність розкладатися за природних умов і не спричиняти забруднення довкілля [7].

Одноразові сенсори (disposable sensors) – це прилади, використання яких більше одного разу однією людиною не передбачено. З кожним днем використання подібних сенсорів стає все більш актуальним, тому що проблеми гігієни та зупинення розповсюдження різного роду вірусних захворювань (таких як COVID-19 тощо) стає все більш актуальним. Наразі як матеріали для одноразової електроніки частіше за все використовують синтетичні полімери, які не руйнуються в навколишньому середовищі, і постає проблема їх подальшої утилізації. Наноцелюлоза добре підходить для виготовлення саме одноразових сенсорів, тому що вона повністю руйнується у навколишньому середовищі з часом і має низьку вартість.

Носимі сенсори (wearable sensors) – сенсори, які кріпляться безпосередньо до людського тіла або є частиною одягу. Носима електроніка розкриває багато можливостей для моніторингу стану людського організму в реальному часі, наприклад моніторинг пульсу, температури тіла, вологості шкіри, вмісту цукру в крові та солі в потових виділеннях [8]. Також за допомогою носимих сенсорів можна здійснювати моніторинг просторового положення кожної з кінцівок, якщо ці сенсори розміщуються на суглобах людини [11]. Зазвичай для сенсорів носимої електроніки зараз використовуються синтетичні підкладки, полімери, такі як поліімід, полівінілхлорид та інші його похідні. Оскільки наноцелюлоза є природним матеріалом, вона є повністю безпечною для шкіри людини, тому її можна використовувати у якості підкладки для носимих сенсорів, які можна кріпити безпосередньо на тіло людини або використовувати наноцелюлозу у якості модифікатора для інших тканин.

Основними передумовами для використання наноцелюлози в сенсоріці є її доступність, біорозкладність, стабільність поверхні, гнучкість, високий модуль Юнга та міцність на розрив. Нині наноцелюлоза та її композити були використані в різноманітних сенсорних пристроях: датчиках фізичних параметрів навколишнього середовища (температури [9], вологості [10], концентрації важких токсичних металів у стічних водах [11], газових забруднювачів навколишнього повітря [12]), біосенсорах рідин, зокрема фізіологічних рідин та харчових продуктів (для виявлення глюкози [12], гуаніну та аденіну [12], нейтрофілів еластази, диклофенаку натрію [13], іонів металів [12], біомаркерів, свіжості їжі тощо) та у зручній для людини інтерактивній сенсорній електроніці, включаючи електронні шкірні пристрої (датчики деформації та вібрації) [14, 15]. Однак для різних видів сенсорів є свої вимоги, яким має задовольняти наноцелюлоза, та свої експлуатаційні обмеження. Крім того, під час роботи з біополімерами у стандартній інтегральній технології виникають певні технологічні проблеми, пов'язані з використанням високих температур, водних та кислотних розчинів тощо. Тому огляд наявних розробок сенсорних приладів на основі наноцелюлози є вкрай актуальною задачею.

Постановка задачі

Встановити фізичні та технологічні особливості використання наноцелюлози для виготовлення сенсорів різних видів фізичних та хімічних величин з метою покращення їх робочих характеристик.

Сенсори механічних полів

Актуальність використання сенсорів механічних полів зростає з кожним роком. Сфери їх використання сягають від космонавтики до медицини, від будівництва до мікроелектроніки: їх використовують для моніторингу стану та навантаження на металоконструкції, у транспортних засобах, у кутах повороту вузлів механізмів, вимірювання механічного напруження у друкованих платах та маси товарів на вагах, моніторингу м'язової активності людини та тестування рухів у робототехніці тощо. В основі роботи таких сенсорів лежить тензодатчик, що призначений для вимірювання величини механічного навантаження чи деформації. Тензорезистор змі-

нює свій опір залежно від прикладеного механічного поля [16].

Найпростіший тип сенсора вигину складається з діелектричної гнучкої підкладки, на якій знаходиться тензорезистор з металевої фольги. Датчик прикріплюється до об'єкта за допомогою спеціального клею, наприклад ціанакрилату. Коли об'єкт деформується, фольга деформується разом з ним, у результаті чого змінюється її електричний опір.

Нині в якості матеріалу підкладки використовуються такі матеріали: поліімід, полівінілхлорид, полістирол, поліуретан [17]. Однак виробництво та використання більшості з них не відповідає критеріям екологічності та біорозкладності. Наноцелюлоза розглядається як екологічно-дружній матеріал для заміни штучних полімерів у сенсорах механічних полів.

Датчики механічних полів зазвичай розділяють на гнучкі (еластичні) (коефіцієнт деформації 1–10 %) та високоеластичні (коефіцієнт деформації 10–100 %) [18]. Гнучкі сенсори використовуються для вимірювання деформацій, у сенсорах сили, тиску, переміщення, вібрації, прискорення, також вони застосовуються для моніторингу стану окремих елементів кузовів автомобілів, літаків, ракет тощо. Високоеластичні датчики мають потенціал для нанесення на м'які поверхні неправильної форми, такі як шкіра людини або текстильні тканини. Це сприяє застосуванню в галузях, таких як розумні татування, штучна шкіра та м'яка робототехніка [19]. Наноцелюлоза використовується в обох видах сенсорів механічних полів.

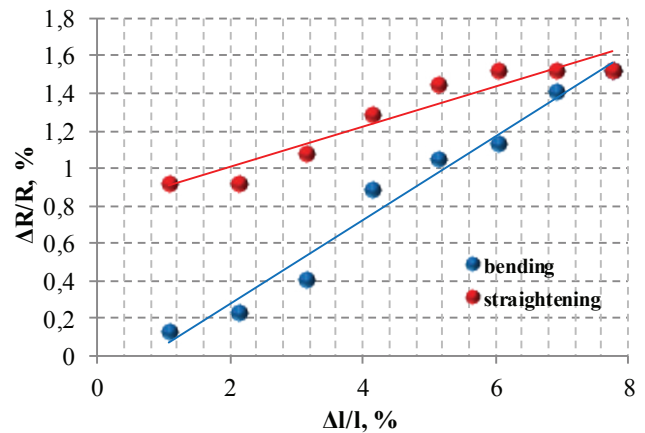
Сенсори вигину (bending sensors). Для створення гнучких сенсорів може використовуватись наноцелюлоза в чистому вигляді, без модифікаторів чи домішок. Вхідним матеріалом для екстракції наноцелюлози може бути целюлоза із різної рослинної сировини (бажано з мінімальним вмістом лігніну і мінеральних речовин), для прикладу, органосольвентна целюлоза зі стебел очерету, яку отримують екологічно чистим способом із застосуванням суміші оцтової кислоти та перексиду водню [5]. Наноцелюлозу (НЦ) отримують за допомогою окисника 2,2,6,6-тетраметилпіперидин-1-оксиду (ТЕМПО) в системі ТЕМПО/NaBr/NaOCl з подальшою ультразвуковою обробкою [5]. Отриману суспензію наноцелюлози розливають у чашки Петрі і сушать на повітрі за кімнатної температури для отримання наноцелюлозних плівок, які використовують для виготовлення сенсорів вигину.

Чутливий елемент такого сенсора зазвичай являє собою тонкі доріжки з металу, осаджені через спеціальну маску вакуумним методом на підкладці з НЦ (рис. 1, а) [5]. Для створення тонких плівок металів на nanoцелюлозній підкладці використовують реактивне високо-частотне магнетронне розпилення в середовищі аргону. Також під плівкою робочого металу (наприклад Ni) розміщують підшар проміжного металу (Ti, Cr тощо) для забезпечення адгезії до біополімеру. Омичні контакти до сенсора кріпляться за допомогою струмопровідних адгезивних паст на основі срібла або золота, оскільки під час припаювання виводів nanoцелюлоза зазнавала пошкоджень.

На рис.1, б наведено типові п'єзорезистивні характеристики датчиків деформації на основі НЦ. Як видно із даних рисунка, робочі характеристики тензорезисторів є переважно лінійними як під час згинання, так і під час випрямлення [5]. Для оцінювання ефективності датчиків визначають коефіцієнт чутливості, який розраховують як відношення відносної зміни опору до відносного видовження провідника. Найкраще отримане значення коефіцієнта чутливості становить $195,8 \cdot 10^{-3} \%$, що є більше ніж середня чутливість сенсорів, що виробляється серійно ($33,5 \cdot 10^{-3} \%$) [5]. Реверсивність датчиків деформації визначається як відносна зміна опору після одного циклу згинання-випрямлення. Більшість отриманих датчиків деформації добре відновлюються після одного робочого циклу. Відносна зміна опору становить лише $0,002-0,004 \%$, що в кілька разів менше ніж для промислового зразка ($0,008 \%$) [5].



а



б

Рис. 1. Зображення сенсора вигину на основі nanoцелюлози (а) та його п'єзорезистивні характеристики [5]

Щоб встановити часову стабільність роботи приладу в умовах статичного вигину, датчики піддавали деформації з відносним подовженням 5% протягом 5 хв. Усі отримані датчики поступаються промислового зразку за цим параметром: $0,07 \%/хв$ проти $0,17 \%/хв$ [5]. Механічна міцність тензодатчиків оцінюється на основі сили розриву та міцності на розрив. Після нанесення тонкої плівки Ni завширшки усього 1 мм міцність структури Ni-NC підвищується на 40% : з $13,8$ МПа для чистої NC до $19,5-19,6$ МПа для структури Ni-NC. Нанесення тонкої плівки металу на всю ширину підкладки приводить до значного підвищення механічної міцності (у $2-3$ рази залежно від товщини Ni-шинопроводу) [5].

Високоеластичні сенсори вигину (high-strain sensors). Наявні гнучкі сенсори механічних полів дають змогу вимірювати невеликі деформації (до 10%). Однак нині досить затребуваними є сенсори, здатні вимірювати великі розтягнення (більше 50%), які є в орієнтованій на людину інтерактивній електроніці (human-friendly interactive electronics). Наприклад, рухи суглобів людини викликають деформації до 55% , що значно перевищує робочий діапазон гнучких сенсорів. Прикладами використання високоеластичних сенсорів є: носимий пластир для моніторингу здоров'я людини, сенсорна шкіра роботизованого пристрою та електронні рукавички для телехірургічних операцій.

Для високоеластичних сенсорів використовуються нанокомпозити на основі nanoцелюлози з використанням еластомерів [20]. Послідовність

технологічних операцій виготовлення таких сенсорів наведено на рис. 2. Спершу синтезують гнучкий нанопapір на основі зім'ятого графену та НЦ, а тоді його занурюють в матрицю еластомера для одержання нанопapеру, здатного до розтягнення. Наприклад, гнучкий нанопapір може бути просочений поліметилсилоксаном (PDMS). Одержаний нанопapір характеризується значно вищою механічною міцністю, ніж окремо чистий графен чи чиста НЦ, яка схильна до розтріскування.

Оптимальне співвідношення графену та НЦ у суміші такого композиту становить 1:1. Порівняння механічних властивостей одержаних сенсорів на основі гнучкого нанопapеру (графен та НЦ), еластичного нанопapеру (графен, НЦ та PDMS) та 1D наноматеріалів (вуглецеві нанотрубки) показало, що допустиме відносне видовження гнучкого нанопapеру на основі НЦ та графену становить 6 %, а еластичного нанопapеру – 100 %, як і 1D матеріалів. Якщо ж порівняти сенсори за чутливістю (відносній зміні опору у разі видовження на 1 %), то видно, що високоеластичні сенсори на основі композитного матеріалу демонструють відносну зміну опору на рівні 710 % за 100 %-видовження, тоді як 1D матеріали за того ж 100 % видовження зазнають лише 60 % зміни опору чутливого елемента. Таким чином, сенсори механічних полів, виготовле-

ні на основі композитного матеріалу за участі НЦ, характеризуються негіршою еластичністю, ніж 1D матеріал, але на порядок вищою чутливістю [4].

Розроблені високоеластичні датчики деформації на основі НЦ були застосовані для аналізу руху суглобів пальців на руці людини. Пристрій включає п'ять незалежних датчиків, імплантованих на рукавичку для виявлення згинання та розгинання пальців (рис. 3). Датчики були виготовлені U-подібної форми для полегшення зняття електричних сигналів. Показано відгук датчиків деформації, коли пальці неодноразово згиналися та розгиналися з частотою 1 Гц. Виміряні деформації для п'яти незалежних датчиків деформації під час рухів пальців перебували в діапазоні 35–45 % [4].

Також були розроблені сенсори вигину на основі nanoцелюлози для моніторингу згинання-розгинання ліктя, зап'ястя, коліна та тиску на стопу (рис. 3) [13].

Сенсори тиску та дотику (pressure/touch sensors). Для виготовлення таких сенсорів використовуються графенові нанопластинки, які вбудовуються в товщу nanoцелюлози, при цьому матеріал графену відіграє роль чутливого шару, опір якого змінюється під дією деформації, а целюлозний матеріал являє собою гнучку матрицю, в якій розподілені графенові нанопластинки.

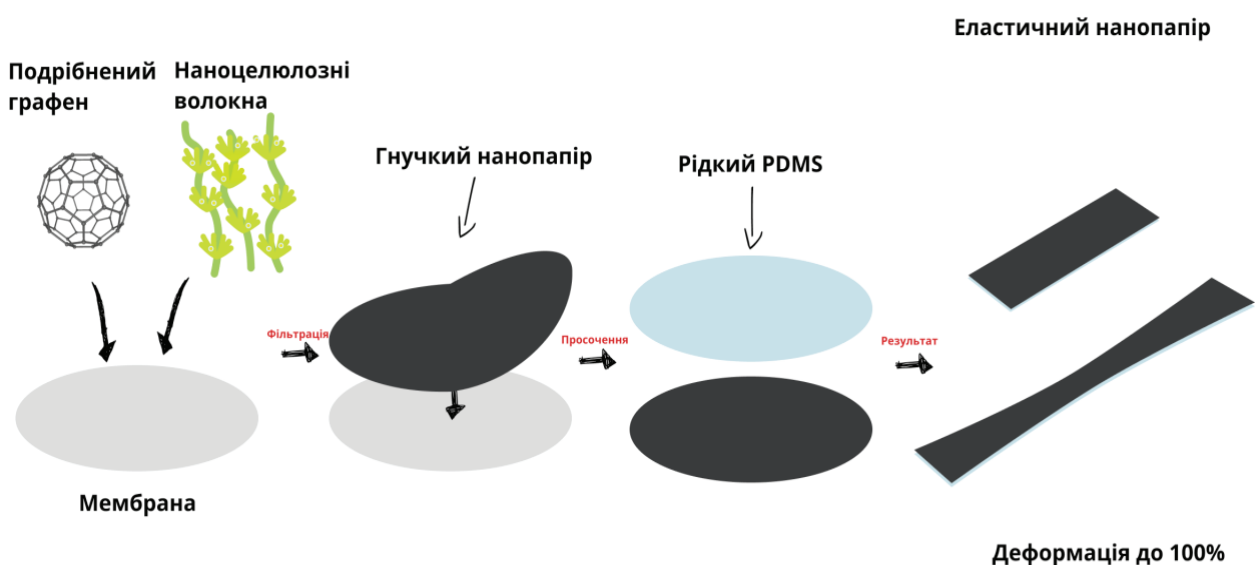


Рис. 2. Схематична ілюстрація процесу виготовлення високоеластичного графенового нанопapеру

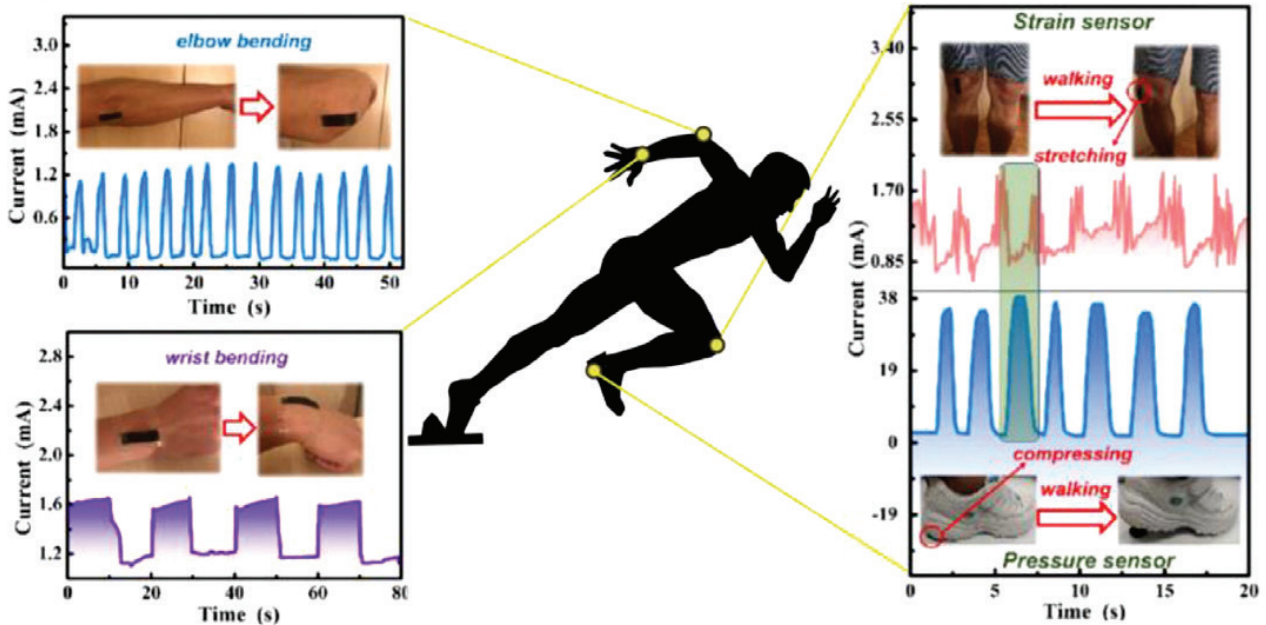


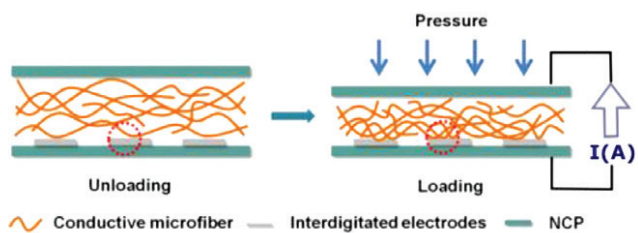
Рис. 3. Сенсори вигину прикріплені до суглобів пальців для моніторингу кута згину [13]

Існує декілька способів введення графену до складу наноцелюлозної підкладки: метод занурення та метод вакуумної фільтрації. В методі занурення целюлозний папір занурюють у суміш етанолу та графену на певний час (30–300 с), після чого сушать в печі за 40 °С протягом 30 хв. Для стандартного процесу вакуумної фільтрації всередину воронки Бюхнера поміщують підкладку НЦ і заливають однорідну суміш етанолу та графену. Графен затримується в порах паперової підкладки, а етанол випаровується. Далі отриманий папір сушать у сушильній шафі за 40 °С протягом 30 хв.

Датчик дотику конструктивно являє собою шарувату структуру з мідних електродів, між якими розміщений шар наноцелюлози з розподіленими в ній графеновими нанопластинками. Принцип дії такого сенсора полягає у тому, що під час механічного навантаження на верхній електрод, наприклад, натисканням пальцем, целюлоза деформується, що приводить до зменшення відстані між графеновими нанопластинками та утворення провідних (перколяційних) доріжок, що призводить до зростання провідності. Датчики показали високу п'єзорезистивну ефективність: відносна зміна опору становила 125 % та 250 % для різних методів нанесення графену (методом занурення та методом вакуумної фільтрації). Крім того, сенсори демонструють швидкий від-

гук та відновлення (менше 0,1 с), а також відмінні характеристики повторюваності під дією механічного навантаження 0,5 Н, а також значний відгук під час зростання механічного навантаження від 0,05 до 0,62 Н. Результати тестування одержаних датчиків показали, що ці прилади дають відгук на дотик пальцем досить швидко (час спрацювання не перевищував 5–6 с), після чого відбувалося швидке відновлення, при цьому зміна опору сенсора під час дотику становила 25 %, що забезпечує достатню чутливість таким приладам. Таким чином, наноцелюлозний папір з низькою вартістю, легкістю та біосумісністю в поєднанні з графеном може бути багатообіцяючим матеріалом для розумних носимих електронних пристроїв [21].

На рис. 4 зображено структуру сенсора та відгук сенсора на пульс людини. Як видно із рис. 4, під час деформації провідні волокна ущільнюються, що збільшує провідність сенсора [13].



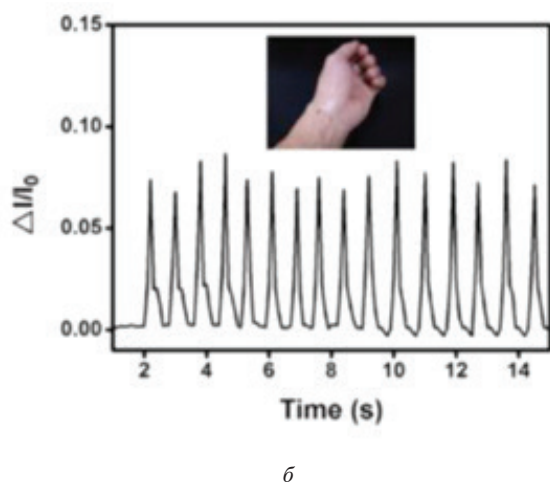


Рис. 4. Ілюстрація принципу дії сенсора тиску на основі наноцелюлози (а) та реакція сенсора на циклічне навантаження під час вимірювання пульсу (б) [13]

Також існують розробки датчиків тиску на основі двовимірного шаруватого матеріалу MXene (Ti_3C_2Tx), до складу якого вводять бактеріальну наноцелюлозу у міжшарові проміжки. Бактеріальна целюлоза складається з надтонких, з'єднаних між собою нановолокон з великою кількістю оксигеновмісних функціональних груп у полімерних ланцюгах. Завдяки високій міцності на розтяг, цей вид НЦ служить відмінним буферним матеріалом, що реагує на механічний тиск. Завдяки оптимізації вмісту бактеріальної наноцелюлози та міжшарової відстані в MXene, отриманий сенсор демонструє високу механічну міцність (225 МПа), широкий діапазон чутливості з низькою межею виявлення (0,4 Па), високу чутливість (до $95,2 \text{ кПа}^{-1}$), швидкий відгук (95 мс) і значну повторюваність (25 000 циклів), а також низьку робочу напругу 0,1 В. Цей сенсор був апробований у медичній сенсоріці як для реєстрації незначного тиску (наприклад, під час ковтання, серцебиття та пульсу), так і для моніторингу рухів на згин великої амплітуди (наприклад, згинання рук, рух колін тощо) [22].

Сенсори вологості

Датчик вологості – це електронний пристрій, який вимірює вологість у навколишньому середовищі та перетворює отримані результати у відповідний електричний сигнал. Датчики вологості зазвичай використовують у метеорологічній, медичній, автомобільній, виробничій промисловості та системах кондиціонування. Датчики вологості можна знайти в портативних

пристроях (наприклад, смартфонах), а інші інтегровані в більші вбудовані системи (наприклад, системи моніторингу якості повітря в технології «Розумний дім»). Сучасними прикладами використання сенсорів вологи є: оцінювання частоти дихання, безконтактний інтерфейс, безконтактне перемикання, дихання/вологість шкіри [23, 24, 34].

Двома найпоширенішими датчиками відносної вологості є ємнісний і резистивний датчики. Ємнісні датчики використовують два електроди для контролю ємності тонкого повітряного прошарку або діелектричного матеріалу, розміщеного між ними. Ємність повітря (діелектрика) збільшується або зменшується зі зміною вологості навколишнього середовища. Резистивні датчики вологості працюють за іншим принципом. У цих датчиках змінюється опір вологочутливого шару згідно з протонною теорією провідності, а металева гребінка використовується у якості електродів для зняття електричного сигналу. До робочих параметрів сенсорів належать: чутливість і відгук, реверсивність та повторюваність, час відгуку та відновлення, коротко- та довготривала стабільність.

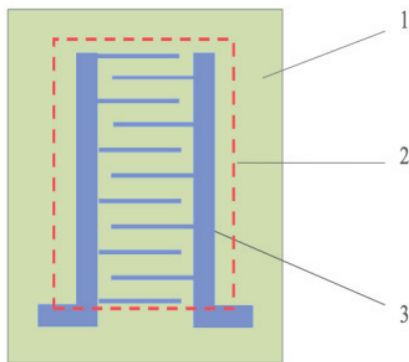
Сенсори вологості атмосферного повітря (humidity sensors). Найчастіше сенсори виготовляють на твердій ситаловій або гнучкій підкладці з паперу чи штучних полімерів PET, PI тощо, а в якості вологочутливої плівки використовують металооксидні матеріали, оксид графену або композити на його основі [25]. Завдяки гідрофільності наноцелюлоза також застосовується в сенсорах вологості як ємнісного, так резистивного типу [26], у якості вологочутливого шару [26], а також гнучкої підкладки [27] як в чистому вигляді [28], так і в складі композитів [29].

Зокрема розроблено сенсор вологості на основі чистої НЦ як ємнісного, так і резистивного типу. Конструктивно такі датчики являють собою ситалову підкладку з зустрічно-штирвовою гребінкою з Ti/Ni, зверху на яку нанесено шар НЦ. Структуру датчика показано на рис.5, а.

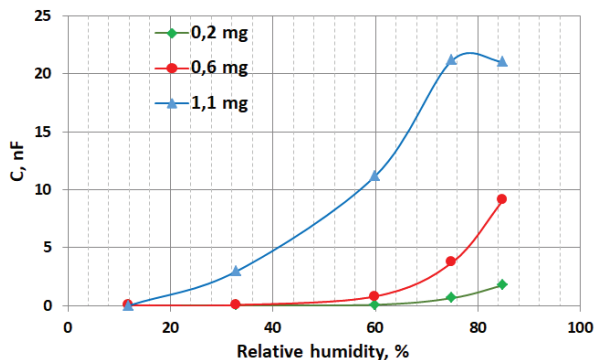
Механізм роботи ємнісного датчика вологості на основі наноцелюлози полягає в такому: гідрофільні функціональні групи на поверхні НЦ притягують молекули води, збільшуючи її діелектричну проникність, а отже, і ємність датчика (рис. 5, б). Оскільки діелектрична проникність води досить велика, ємність датчика помітно змінюється під час адсорбції води [30]. Крім того, залежність ємності сенсора від відносної вологості апроксимується експоненційною функцією. Залежно від вихідної рослинної

сировини для екстракції НЦ (очерет, міскантус, солома тощо) та її кількості на чутливій поверхні (0,2–1,3 мг) відгук датчика змінювався від 0,61 до 78,3 нФ, а чутливість до вологості – від 0,036 до 0,142 (%RH)⁻¹. Встановлено, що кращою серед досліджених видів nanoцелюлози для сенсорів вологості є nanoцелюлоза із стебел очерету. Так, максимальна чутливість такого сенсора спостерігалась для НЦ масою 0,6 мг (0,142 (%RH)⁻¹), що майже вдвічі перевищує чутливість сенсора на основі НЦ з соломи пшениці.

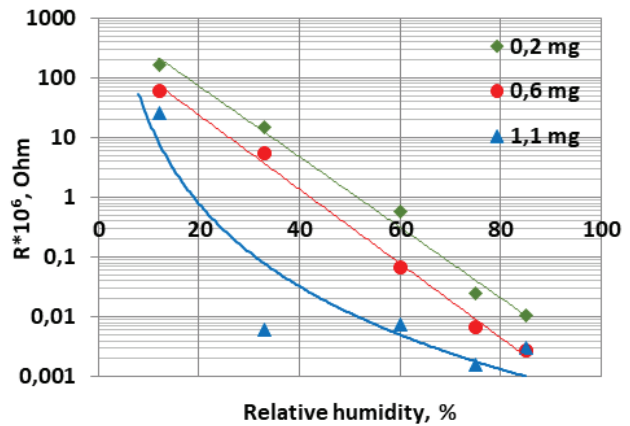
В основі роботи резистивних сенсорів вологи лежить протонна теорія провідності, яка полягає у зменшенні опору чутливого елемента приладу зі зростанням рівня вологості, внаслідок зменшення енергії активації стрибкового механізму руху носіїв заряду (протонів) (рис. 5, в). Залежно від виду nanoцелюлози (вихідна сировина – очерет, міскантус, солома тощо) та її кількості на чутливій поверхні (0,2–1,3 мг) відгук датчика змінюється від $8,6 \cdot 10^3$ до $2,1 \cdot 10^4$, а чутливість до вологості – від 0,034 до 0,143 (%RH)⁻¹. Найкращі параметри сенсор вологості резистивного типу показав для nanoцелюлози, одержаної з соломи пшениці, масою 0,6 мг (чутливість 0,143 (%RH)⁻¹).



а



б



в

Рис. 5. Структура датчика вологості (а) на основі nanoцелюлози (1 – ситалова підкладка; 2 – вологочувлива плівка nanoцелюлози; 3 – Ti/Ni зустрічно-штирвова гребінка), та зміна його ємності (б) та опору (в) зі зміною відносної вологості вологості для різної маси вологочувливої плівки НЦ [30]

Також для виготовлення сенсорів вологості використовувались композити на основі nanoцелюлози з додаванням оксиду графену чи вуглецевих нанотрубок. Зокрема був розроблений резистивний сенсор на основі композиту nanoцелюлози та вуглецевих нанотрубок, отриманого за допомогою вакуумної фільтрації. Величина відгуку (відносна зміна струму) становила 87 % та час відгуку/відновлення 333 с/ 523 с [31]. Ємнісний сенсор на основі композиту nanoцелюлози та оксиду графену продемонстрував рекордну величину відгуку (відносна зміна ємності) 1000 % [32]. Слід зазначити, що ємнісний сенсор вологості на основі оксиду графену без додавання nanoцелюлози характеризується відгуком на рівні лише 25 % [33].

Сенсори подиху (breath sensors). Також відомі сенсори вологості на основі композитів з НЦ, які використовуються для аналізу частоти дихання людини. Структурно сенсор складається з плівки поліетиленнафталату (PEN-плівка) у якості підкладки, композитного чорнила, що містить nanoцелюлозу (CNF) та графенові нанопластинки (GNP) у якості вологочувливого шару, та срібних електродів для зняття електричного сигналу. Електроди виготовляють за допомогою трафаретного друку срібної пасти на плівці PEN з подальшим відпалом. Для синтезу композитних чорнил CNF змішують з різними кількостями GNP та деіонізованою водою. Розроблені композитні фарби наносять на електроди

за допомогою трафаретного друку з наступним відпалом. У друкованих композитних плівках за допомогою графенових нанопластинок утворюються провідні канали, а CNF служить вологопоглинаючою матрицею. Коли вологість у навколишньому середовищі підвищується, CNF набухає і перешкоджає провідній мережі GNP, збільшуючи тим самим опір композитної плівки. Коли вологість у навколишньому середовищі знижується, CNF віддає вологу за допомогою десорбції, зменшуючись у розмірі, що відновлює провідні канали GNP та зменшує опір плівки.

Такі сенсори вологи можна використовувати в багатьох сферах: для моніторингу швидкості дихання людини, для моніторингу вологості дитячих підгузків, а також вологості пальців рук людини. Зокрема моніторинг фізичних показників стану дихання людини (наприклад, безперервності, частоти) тісно пов'язаний з індивідуальним психологічним стресом, спричиненим серцевою та артеріально-судинною дисфункцією. Крім того, частота дихання є важливим показником моніторингу здоров'я людини, оскільки зміни в динаміці дихання можуть свідчити про різні захворювання: апное уві сні, астму, зупинку серця та рак легенів [34]. Кріпляться такі сенсори на внутрішню сторону медичної маски або безпосередньо на тілі людини (наприклад, над верхню губу). Зміна частоти дихання людини призводить до зміни опору сенсора з такою самою частотою [34], а зміна глибини дихання – до зміни величини зміни опору (амплітуди сигналу) [34].

Сенсори фізіологічних рідин

Фізіологічними рідинами вважають рідини, що наявні в організмі людини: кров, лімфа, піт, слина, сеча, травний сік, жовч тощо. Сенсори фізіологічних рідин можуть бути електрохімічного [36], колориметричного [37] або флуоресцентного типу [39]. Найбільш поширеними серед них є електрохімічні сенсори, в яких аналітичний сигнал забезпечується проходженням електрохімічного процесу. Електрохімічні сенсори призначені для кількісного та якісного аналізу хімічних сполук у газоподібних та рідких середовищах. Електрохімічний сенсор являє собою систему провідників: індикаторний електрод, який поміщається в досліджуваній розчин та електрод порівняння, щодо якого вимірюється потенціал індикаторного електроду. Електрохімічні процеси в досліджуваному розчині супроводжуються

появою/зміною ЕРС або зміною величини струму, що проходить через розчин. За принципом дії електрохімічні сенсори поділяються на три основні групи: потенціометричні, амперометричні та кондуктометричні.

Сенсори важких металів у поті людини (sensor of heavy metals in sweat). Відомо, що шкіра є інтерфейсом для неінвазивного виявлення життєво важливих параметрів людського організму, таких як кров'яний тиск, споживання кисню, електрошкірна активність і температура. Крім того, піт містить бібліотеку біомаркерів, таких як електроліти, цукри, амінокислоти, білки, гормони та метаболіти, величина яких може використовуватись для дослідження працездатності спортсмена, діагностики генетичних розладів та інфекцій, а також ідентифікувати наявність в організмі заборонених наркотиків. Використання поту для неінвазивного виявлення не є новим, але традиційні аналізи все ще покладаються на складну процедуру збору біоматеріалу (наприклад, протирання шкіри або збирання рідини за допомогою мікрошприца під час потовиділення). Нині розроблено гнучкі носимі датчики для аналізу поту, в тому числі на основі наноцелюлози.

Зокрема був розроблений гнучкий носимий сенсор для виявлення іонів важких металів у поті [35]. Потрапивши в організм важкі метали можуть накопичуватись у кістках та різних органах, спричиняючи їх дисфункцію. Велика концентрація важких металів в організмі може призводити до таких захворювань: гостра та хронічна ниркова недостатність, хвороби серцево-судинної та нервової систем, порушення обміну речовин.

Такий сенсор являє собою плівку наноцелюлози (підкладка), на поверхню якої нанесені вуглецеві робочий та проти електроди, а також електричні контакти. Мікробну наноцелюлозу (MNC) вирощували в середовищі дріжджового екстракту, після чого мембрани НЦ зберігали зануреними в дистильованій воді за температури 5 °С. Перед використанням мембрани злегка розтягують за допомогою тримачів і просушують у печі. Електроди виготовляли за допомогою напівавтоматичного трафаретного принтера. Шар вуглецевої пасти наносили на MNC крізь трафарет (маску), що задає конфігурацію контактів та електродів [35].

Криві вольт-амперометрії для виявлення іонів Cd^{2+} і Pb^{2+} у штучному поті, а також залежність анодного пікового струму від концентрації

іонів металів описується лінійною апроксимацією. Мінімальна межа виявлення іонів Cd^{2+} і Pb^{2+} за одночасної наявності обох іонів становить 1,01 і 0,43 мкМ відповідно, при цьому величина чутливості сенсора до іонів Cd^{2+} і Pb^{2+} становить 0,07 і 0,3 $\text{A} \cdot \text{M}^{-1}$ відповідно. Отже, nanoцелюлоза придатна для виготовлення на її основі ефективних сенсорів поту людини, навіть з огляду на низький фізіологічний рівень важких металів у ньому (менше $1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) [35].

Сенсори речовин у крові та сечі (sensors of blood and urine). Також був розроблений гнучкий носимий вольт-амперометричний біосенсор із використанням нановолокнистої целюлози (CNF) і наночастинок срібла (AgNPs) для одночасного визначення аскорбінової кислоти (AA), дофаміну (DA) і парацетамолу (PA) у людській сечі та сироватці крові. Виявлення AA, DA та PA в фізіологічних рідинах потрібне для контролю дозування лікарських препаратів. Відомо, що аскорбінова кислота є водорозчинним вітаміном, який відіграє важливу роль в організмі людини. Передозування AA може пошкодити клітини людського організму, викликати шлунково-кишковий розлад, головний біль та інші захворювання. Парацетамол є нестероїдним анальгетиком, який зазвичай використовується для зняття болю та підвищеної температури. Його передозування може призвести до печінкової та ниркової недостатності, що в кінцевому підсумку може призвести до летального кінця. Дофамін, є важливим нейромедіатором у центральній нервовій системі та наявний у рідинах організму і нервовій системі у вигляді великих катіонів. Аномальний рівень дофаміну може призвести до неврологічних розладів, таких як хвороба Паркінсона, шизофренія та хвороба Альцгеймера.

Структурно сенсор складається з графітового електрода, нанокомпозитного розчину CNF-AgNPs, нанесеного на нього, та мідного дроту, який виступає у якості електрода порівняння. CNF отримують з цукрової тростини, сушать у вакуумі і використовують для приготування нанокомпозиту. Нанокомпозит CNF-AgNPs готують таким чином: нітрат срібла додають до гідрогелю целюлози, суміш піддають ультразвуковій обробці, що призводить до утворення наночастинок срібла, які адсорбуються на поверхні CNF. Нанокомпозитний розчин крапають на графітовий електрод для отримання його модифікованого аналога Gr/CNF-AgNPs.

Електрокаталітичні властивості розробленого датчика Gr/CNF-AgNPs досліджують за допомогою вимірювання вольтамперометричних харак-

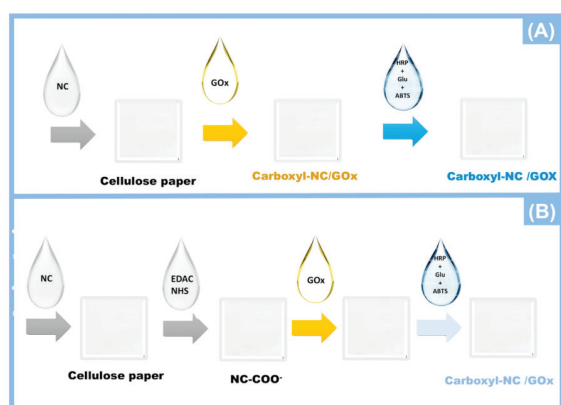
теристик для різних концентрацій речовин AA, DA та PA в буферному розчині. Піковий струм окислення зростає за лінійним законом з підвищенням концентрації AA, DA та PA в буферному розчині, що є додатковою перевагою для побудови сенсорів.

Нанокомпозитний електрод Gr/CNF-AgNPs продемонстрував гарний лінійний відгук з дуже низькими межами визначення 0,029, 0,034 та 0,019 мкмоль/моль для AA, DA і PA відповідно, при цьому величина чутливості розробленого сенсора до AA, DA та PA становила 0,7, 0,81 та 0,012 $\mu\text{A} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ відповідно [36].

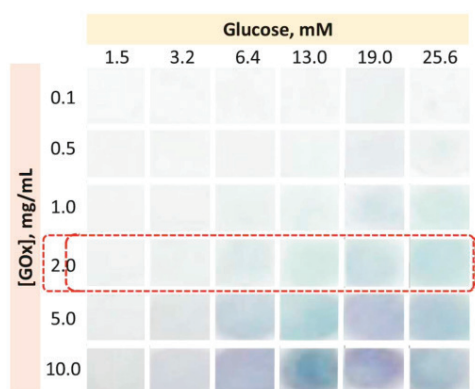
Із літературних даних відомо про розробку біосенсора на основі nanoцелюлози для виявлення глюкози в сечі, що потрібно для раннього визначення різних патологій нирок або ендокринної системи [37]. Зокрема такий сенсор дає змогу визначити цукор, що з'являється в сечі через прийом ліків, отруєння або порушеннях під час вагітності. Розроблений сенсор є колориметричного типу і являє собою тест-смужку з паперу, на поверхню якого нанесено карбокси-nanoцелюлозу, фермент для виявлення глюкози (глюкозооксидаза) та хромогенні реагенти (пероксидаза хрому та 2,2'-азино-біс (3-етилбензотіазолін-6-сульфонові кислоти) діамонійної солі) (рис. 6, a).

Принцип дії чутливого елементу полягає у зміні забарвлення смужки залежно від концентрації глюкози в сечі. Для цього на поверхні карбокси-nanoцелюлози іммобілізують фермент, що каталізує селективне окиснення глюкози (глюкозооксидазу), в результаті чого утворюється перекис водню, який змінює колір безбарвної смужки у різні відтінки блакитного кольору залежно від концентрації глюкози (рис.6, б), при цьому nanoцелюлоза відіграє роль ефективного матеріалу для іммобілізації аналіту через велику площу її поверхні [37].

Тест-смужку з різною концентрацією глюкозооксидази калібрували за допомогою занурення в розчині з різною концентрацією глюкози (рис. 6, б). Отримані кольори на різних ділянках тест-смужки аналізували з використанням програмного забезпечення для обробки зображень, при цьому для розробленого сенсора спостерігався лінійний відгук на глюкозу для концентрацій, що змінювались в межах від 1,5 до 13,0 мМ [37]. Наявність целюлозних матеріалів під час створення цього сенсора обумовлює такі переваги: біорозкладність, можливість виготовляти одноразові смужки, а також карбокси-nanoцелюлоза забезпечує однорідність забарвлення зони смужки після реакції на глюкозу.



а



б

Рис. 6. Процес виготовлення колориметричних тест-смужок на основі наноцелюлози (а) та калібрувальні зображення зміни кольору тест-смужок за різної концентрації глюкози [37]

Сенсори вибухових та шкідливих речовин у навколишньому середовищі

Сенсори тротилу (TNT sensors). Виявлення слідів вибухових речовин є важливою задачею як для забезпечення безпеки громадських місць та об'єктів критичної інфраструктури, так і для екологічної безпеки підземних вод і ґрунту. Зокрема існує гостра потреба в розробленні сенсорів, які швидко та з високою точністю визначають 2, 4, 6-тринітролуол (тротил), що є однією з найнебезпечніших штучних вибухових речовин. Наявні методи аналізу значною мірою покладаються на мас-спектрометрію, рентгенівські методи, спектрометрію іонної рухливості та терагерцову спектроскопію, які передбачають використання дорогавартісного обладнання та складних методик вимірювання. Був запропонований сенсор на основі бактеріальної наноцелюлози, в якому наявність тротилу визначається методом Раманівського розсіювання. Структурно такий сенсор складається з підкладки на основі бактеріальної наноцелюлози, яка містить нанострижні золота (AuNRs) та срібні нанокуби (AgNCs). Процес виготовлення сенсора починається з приготування наночастинок AuNRs, вкритих оболонкою AgNCs методом центрифугування. Після цього плазмонні наночастинок AuNR@AgNCs були модифіковані р-амінобензентіолом (ПАТФ) для утворення комплексу Мейзенгеймера між тротилом та поверхнею сенсора. Для цього наночастинок AuNR@AgNCs замочували у водному розчині модифікатора ПАТФ на ніч. У результаті модифікатор хімічно адсорбувався на поверхні наночастинок AuNR@AgNCs через зв'язки Ag-S. Завершувався процес виготовлення такого сенсора зануренням підкладки з наноцелюлози в готовий нанокompatитний розчин AuNR@AgNCs@ПАТФ, просочуванням підкладки ним та просушуванням у вакуумній печі за температури 50 °C протягом 8 годин (рис. 7) [38].

У цьому сенсорі підкладка з наноцелюлози відіграє роль не лише фізичного носія чутливого шару, а й 3D-середовища для розподілу плазмонних наночастинок з високою щільністю. Для підвищення ефективності Раманівського розсіювання, тобто величини сигналу сенсора, використовують електромагнітні та хімічні ефекти. Зокрема для електромагнітного підсилення Раманівського розсіювання фотонів використовують поверхневий плазмонний резонанс на наночастинках золота або срібла.

Останнім часом спостерігається тренд до використання біметалевих НЧ, наприклад, наночастинок золота, вкриті оболонкою срібла, що дає змогу з'ясувати положення максимуму плазмонного резонансу у видимий діапазон. Для хімічного підсилення Раманівського розсіювання використовують модифікатор ПАТФ, що забезпечує утворення комплексу Мейзенгеймера між утвореними плазмонними наночастинками та тротилом. У результаті в об'ємі наноцелюлози сформована щільна сукупність модифікованих наночастинок AuNR@AgNCs@ПАТФ, що є чутливими елементами до поглинання слідів тротилу і які значно посилюють сигнал сенсора. Розроблений сенсор демонструє відмінну ефективність у виявленні слідів тротилу з мінімальною межею виявлення $8 \cdot 10^{-12}$ г/л і коефіцієнтом підсилення $1,87 \cdot 10^8$. Крім того, спостерігається лінійна залежність між максимальною інтенсивністю Раманівського розсіювання і концентрацією тротилу в діапазоні $1,25 \cdot 10^{-11}$ – $2,5 \cdot 10^{-9}$ г/л [38].

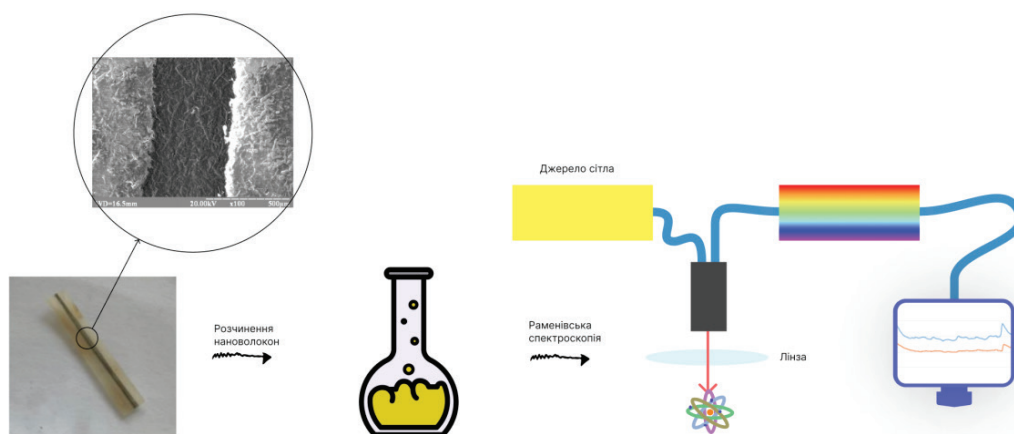


Рис. 7. Виготовлення композитної підкладки на основі аерогелю бактеріальної nanoцелюлози та виявлення за її допомогою тротилу методом Раманівської спектроскопії

Сенсори металевих наночастинок (sensors of metal NPs). Найбільш широко використовуваним матеріалом металевих наночастинок є срібло завдяки його антимікробній та біоцидній дії. Зокрема AgNPs міститься в електроприладах, харчових продуктах та харчових упаковках, виробках медичного призначення, косметичці, аерозольних спреях та текстилі. Утилізація цих продуктів спричиняє потрапляння AgNPs в навколишнє середовище і накопичення їх в біологічних організмах завдяки великій проникаючій здатності наночастинок [39]. Тому виникає гостра необхідність у розробленні сенсорів для визначення вмісту наночастинок металів у різних речовинах чи продуктах.

Авторами роботи [39] розроблено сенсор наночастинок срібла флуоресцентного типу на основі nanoцелюлози. Використання nanoцелюлози в такого типу сенсорах обумовлено її унікальними структурними та оптичними властивостями: велика площа питомої поверхні та висока оптична прозорість. Чутливий елемент сенсора для виявлення AgNPs складається з nanoцелюлозного гелю з доданими у нього частинками люмінофора, який являє собою комплекс поліпіридин-Ru(II) [39]. Включення цього люмінофора у тривимірну целюлозну матрицю призвело до значного посилення флуоресценції порівняно з введенням цього комплексу у водний розчин. Крім того, електростатична взаємодія катіонних аміних груп люмінофора з карбоксильними аніонами nanoцелюлози значно підсилюють чутливість композитного гелю до наявності наночастинок срібла.

Для одержаного гелю HЦ-Ru (II) було проведено дослідження флуоресцентного відгуку під час додавання до складу гелю AgNPs у різній концентрації, при цьому було встановлено, що максимум інтенсивності флуоресценції лінійно падав у разі збільшення вмісту наночастинок срібла в діапазоні концентрацій від $1,85 \cdot 10^{-5}$ до $1,48 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Мінімальна межа виявлення наночастинок срібла становила $1,11 \cdot 10^{-5}$ моль/л [39]. Розроблені флуоресцентні гідрогелі на основі nanoцелюлози як сенсорні зонди успішно апробовані для аналізу вмісту наночастинок срібла в косметичних та текстильних товарах [39].

Сенсори іонів важких металів у воді (sensors of heavy metal ions in water). Діяльність виробничих об'єктів металургійної та хімічної промисловості викликає забруднення водойм, спричинене іонами важких металів, такими як свинець (Pb^{2+}), кадмій (Cd^{2+}) або ртуть (Hg^{2+}) [39, 40]. Наявність значних кількостей цих іонів в організмі людини може викликати серйозні захворювання, такі як рак, гостра ниркова недостатність, хвороби серцево-судинної системи, порушення обміну речовин тощо. Тому виявлення іонів важких металів у промислових стічних водах, природних водоймах та питній воді має вкрай важливе значення. Зазвичай для виявлення іонів важких металів використовують складне вимірювальне обладнання високої вартості, переважно стаціонарне, яке потребує спеціально навченого персоналу, хоча при цьому забезпечує проведення хімічного аналізу з високою точністю (рентгенівська флуоресцентна спектроскопія,

мас-спектрометрія, атомна абсорбційна/емісійна спектрометрія тощо) [40, 41]. Проте для визначення вмісту таких небезпечних забруднювачів є потреба у розробленні портативних сенсорів, що дають змогу робити швидкий аналіз на місці, навіть з дещо меншою точністю. Останнім часом зроблено спроби застосувати наноцелюлозу в портативних сенсорах іонів важких металів завдяки її великій площі поверхні, гідрофільності, гнучкості, біорозкладності та придатності до відносно легкої хімічної модифікації. Зокрема розроблено сенсор на основі наноцелюлози та срібних нанокристалів (Ag-NCs/CNFs), що працює у двох режимах: для візуального та кількісного ультрачутливого детектування іонів ртуті (II) з використанням колориметричного методу та ефекту Раманівського розсіювання [40].

Плівку Ag-NCs/CNFs одержують за допомогою змішування розчину наноцелюлози з розчином срібних нанокристалів та наступною вакуумною фільтрацією. Далі плівка занурюється в розчин 3,3',5,5'-тетраметилбензидин, що відіграє роль хромогенної речовини в колориметричному методі та роль буфера в методі Раманівської спектроскопії. Колориметричний режим роботи сенсора полягає у зміні забарвлення хромогенної речовини під дією різної концентрації іонів ртуті. Так, 3,3',5,5'-тетраметилбензидин є безбарвною рідиною, до якої додають перекис водню і занурюють плівку Ag-NCs/CNFs. У результаті каталізу під дією наночастинок срібла перекис водню розпадається з утворенням іонів гідроксонію, які призводять до окислення хромогенної речовини зі зміною кольору з безбарвного на різні відтінки блакитного залежно від концентрації Hg^{2+} . У режимі роботи Раманівського розсіювання плівка Ag-NCs/CNF використовується як підкладка, а розчин хромогенної речовини як буферний розчин. Відомо, що наночастинок благородних металів завдяки поверхневому плазмонному резонансу викликають появу піків на спектрах Раманівського розсіювання. Однак додавання іонів ртуті викликає зменшення інтенсивності таких піків на величину, що визначається їх концентрацією. Лінійний діапазон виявлення Hg^{2+} колориметричним методом становить 100 нМ – 1 мМ, а мінімальна межа виявлення – 33 нМ [40]. Чутливість методу Раманівського розсіювання в 10 разів вище, ніж колориметрії [40]. Зокрема, відомо, що максимально допустимий рівень іонів ртуті у воді становить 10 нМ, що потрапляє в діапазон чутливості цього сенсора в режимі Рама-

нівського розсіювання. Отже, одержані сенсори на основі плівки Ag-NCs/CNF дають змогу реалізувати швидке виявлення забруднюючих речовин на місці, що важливо в моніторингу стану навколишнього середовища чи питної води.

Також були розроблені інші сенсори на основі наноцелюлози, що використовуються для виявлення іонів важких металів: іонів свинцю (нанокристалічна целюлоза, флуоресцентний тип сенсора, діапазон відгуку від 0,15 до 50 мкМ) [42], іонів заліза (бактеріальна наноцелюлоза, флуоресцентний тип сенсора, діапазон відгуку від 0,5 до 600 мкМ) [43], іонів кадмію (нановолокниста целюлоза, вольтамперометричний тип сенсора, мінімальна межа виявлення 5 нМ) [44], іонів міді (нановолокниста целюлоза, флуоресцентний тип сенсора, діапазон відгуку від 0,1 до 10 мкМ) [45] та іонів нікелю (нанокристалічна целюлоза, сенсор на основі поверхневого плазмонного резонансу, діапазон відгуку від 0,01 до 0,1 мг/л) [46].

Висновки

У роботі здійснено огляд розроблених на сьогодні сенсорів на основі наноцелюлози. Аналіз наявних розробок дав змогу визначити фізико-технологічні особливості виготовлення та застосування наноцелюлози в різноманітних видах сенсорів фізичних та хімічних величин. Зокрема показано, що використання наноцелюлози в сенсорних приладах обумовлене такими її перевагами: велика площа поверхні, гідрофільність, гнучкість, біорозкладність, носимість та придатність до хімічної модифікації. Встановлено, що наноцелюлоза може використовуватися як у якості підкладки, так і у якості чутливого елемента сенсора. Також показано, що наноцелюлоза підходить для використання її як у сенсорах, робота яких ґрунтується на електричних фізичних явищах, так і на оптичних ефектах. До технологічних обмежень наноцелюлози належать виключення високотемпературних процесів та рідинних процесів обробки. З погляду стабільності роботи сенсорів на основі наноцелюлози її поверхню або хімічний склад доцільно модифікувати, що призводить до деякого зменшення чутливості приладу. На основі одержаних результатів можна вдосконалювати наявні та розробляти нові методи створення гнучких носимих одноразових сенсорів, які не потребують утилізації. Крім екологічного моніторингу, одержані в роботі результати продемонстрували

потенційну можливість створення мульти-параметричних сенсорних систем для дистанційної медицини в режимі 24/7, що особливо важливо для постійного догляду за літніми людьми або людьми, що мають хронічні захворювання,

які не мають доступу до лікарняних закладів. Також носимі сенсори є незамінними для моніторингу показників здоров'я в реальному часі під час медичної реабілітації пацієнтів та тренувань спортсменів чи військових.

Література

- [1] D. N. Perkins, M. N. Brune Drisse, T. Nxele and P. D. Sly, "E-waste: A global hazard," *Ann. Glob. Heal.*, vol. 80, no. 4, pp. 286–295, 2014, doi: 10.1016/j.aogh.2014.10.001.
- [2] M. Рдкко *et al.*, "Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils and strong gels," *Biomacromolecules*, vol. 8, no. 6, pp. 1934–1941, 2007, doi: 10.1021/bm061215p.
- [3] N. P. Klochko *et al.*, "Use of biomass for a development of nanocellulose-based biodegradable flexible thin film thermoelectric material," *Sol. Energy*, vol. 201, no. January, pp. 21–27, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.02.091.
- [4] C. Yan *et al.*, "Highly stretchable piezoresistive graphene-nanocellulose nanopaper for strain sensors," *Adv. Mater.*, vol. 26, no. 13, pp. 2022–2027, 2014, doi: 10.1002/adma.201304742.
- [5] V. Koval, V. Barbash, M. Dusheyko, V. Lapshuda, O. Yashchenko and A. Naidonov, "Nickel-based Piezoresistive Sensors Obtained on Flexible Nanocellulose Substrate," 2021 IEEE 11th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), 2021, pp. 1–5, doi: 10.1109/NAP51885.2021.9568610.
- [6] V. A. Lapshuda, Ya. O. Linevych, M. H. Dusheiko, V. M. Koval, V. A. Barbash, "Capacitive moisture sensors based on nanocellulose films for biodegradable electronics," *Microsystems, Electronics and Acoustics*, no. 27, no. 1, 2022, p. 255990–1– 255990–8, doi: 10.20535/2523-4455.me.255990.
- [7] B. P. Frank *et al.*, "Biodegradation of Functionalized Nanocellulose," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 15, pp. 10744–10757, 2021, doi: 10.1021/acs.est.0c07253.
- [8] J. ZHOU, D. MEN and X. E. ZHANG, "Progress in wearable sweat sensors and their applications," *Chinese J. Anal. Chem.*, vol. 50, no. 2, pp. 87–96, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.CJAC.2021.11.004.
- [9] Z. Candan *et al.*, "Nanocellulose: Sustainable biomaterial for developing novel adhesives and composites," *Ind. Appl. Nanocellulose Its Nanocomposites*, pp. 49–137, Jan. 2022, doi: 10.1016/B978-0-323-89909-3.00015-8.
- [10] L. Huang, Y. Yang, P. Ti, G. Su and Q. Yuan, "Graphene oxide quantum dots attached on wood-derived nanocellulose to fabricate a highly sensitive humidity sensor," *Carbohydr. Polym.*, vol. 288, p. 119312, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.CARBPOL.2022.119312.
- [11] M. M. Langari, M. M. Antxustegi and J. Labidi, "Nanocellulose-based sensing platforms for heavy metal ions detection: A comprehensive review," *Chemosphere*, vol. 302, p. 134823, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.134823.
- [12] M. S. M. Misenan, Z. N. Akhlishah, A. H. Shaffie, M. A. M. Saad and M. N. F. Norrrahim, "Nanocellulose in sensors," *Ind. Appl. Nanocellulose Its Nanocomposites*, pp. 213–243, Jan. 2022, doi: 10.1016/B978-0-323-89909-3.00005-5.
- [13] A. Horta-Velázquez and E. Morales-Narvóz, "Nanocellulose in wearable sensors," *Green Anal. Chem.*, vol. 1, p. 100009, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.GREEAC.2022.100009.
- [14] Y. Wu *et al.*, "Using TEMPO-oxidized-nanocellulose stabilized carbon nanotubes to make pigskin hydrogel conductive as flexible sensor and supercapacitor electrode: Inspired from a Chinese cuisine," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 196, no. January, p. 108226, 2020, doi: 10.1016/j.compscitech.2020.108226.
- [15] A. Maekawa, M. Noda, M. Shintani and M. Suzuki, "Influential factors for noncontact measurement method of vibration stress using multiple laser displacement sensors," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 151, p. 106942, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.OPTLASENG.2021.106942.
- [16] E. Copertaro, "Assessment of resistive strain gauges measurement performances in experimental modal analysis and their application to the diagnostics of abrasive waterjet cutting machinery," *Measurement*, vol. 188, p. 110626, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2021.110626.
- [17] Z. Ma, H. Li, X. Jing, Y. Liu and H. Y. Mi, "Recent advancements in self-healing composite elastomers for flexible strain sensors: Materials, healing systems and features," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 329, p. 112800, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.SNA.2021.112800.
- [18] J. C. Costa, F. Spina, P. Lugoda, L. Garcia-Garcia, D. Roggen and N. Мьнzenrieder, "Flexible Sensors – From Materials to Applications," *Technologies*, vol. 7, no. 2, p. 35, 2019, doi: 10.3390/technologies7020035.
- [19] L. Donaldson, "Smart tattoo: Electronic materials," *Mater. Today*, vol. 14, no. 10, p. 461, Oct. 2011, doi: 10.1016/S1369-7021(11)70208-5.
- [20] J. Han *et al.*, "Nanocellulose-templated assembly of polyaniline in natural rubber-based hybrid elastomers toward flexible electronic conductors," *Ind. Crops Prod.*, vol. 128, pp. 94–107, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.INDCROP.2018.11.004.
- [21] M. Khalifa, G. Wuzella, H. Lammer and A. R. Mahendran, "Smart paper from graphene coated cellulose for high-performance humidity and piezoresistive force sensor," *Synth. Met.*, vol. 266, no. April, p. 116420, 2020, doi: 10.1016/j.synthmet.2020.116420.

- [22] Y. Ma *et al.*, “Flexible and highly-sensitive pressure sensor based on controllably oxidized MXene,” *InfoMat*, no. February, pp. 1–12, 2022, doi: 10.1002/inf2.12328.
- [23] H. Tai, S. Wang, Z. Duan and Y. Jiang, “Evolution of breath analysis based on humidity and gas sensors: Potential and challenges,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 318, p. 128104, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.SNB.2020.128104.
- [24] X. Guan *et al.*, “Flexible humidity sensor based on modified cellulose paper,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 339, no. April, 2021, doi: 10.1016/j.snb.2021.129879.
- [25] Lapshuda V. A., Koval V. M. “Flexible and biodegradable sensors: materials, manufacturing technology and devices based on it”, *KPI Sci. News.*, № 2, pp. 16–27, 2021, doi:10.20535/kpism.2021.2.229964.
- [26] A. Kafy, A. Akther, M. I. R. Shishir, H. C. Kim, Y. Yun and J. Kim, “Cellulose nanocrystal/graphene oxide composite film as humidity sensor,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 247, pp. 221–226, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.SNA.2016.05.045.
- [27] L. Huang, Y. Yang, P. Ti, G. Su and Q. Yuan, “Graphene oxide quantum dots attached on wood-derived nanocellulose to fabricate a highly sensitive humidity sensor,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 288, p. 119312, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.CARBPOL.2022.119312.
- [28] X. Meng, J. Yang, Z. Liu, W. Lu, Y. Sun and Y. Dai, “Non-contact, fibrous cellulose acetate/aluminum flexible electronic-sensor for humidity detecting,” *Compos. Commun.*, vol. 20, p. 100347, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.COCO.2020.04.013.
- [29] B. Wang, J. Zhou, Z. Wang, S. Mu, R. Wu and Z. Wang, “Cellulose nanocrystal/plant oil polymer composites with hydrophobicity, humidity-sensitivity and high wet strength,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 231, p. 115739, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.CARBPOL.2019.115739.
- [30] V. Koval, V. Barbash, M. Dusheyko, V. Lapshuda, O. Yashchenko and Y. Yakimenko, “Application of Nanocellulose in Humidity Sensors for Biodegradable Electronics,” *Proc. 2020 IEEE 10th Int. Conf. “Nanomaterials Appl. Prop. N. 2020*, pp. 9–13, 2020, doi: 10.1109/NAP51477.2020.9309598.
- [31] P. Zhu *et al.*, “Electrostatic self-assembly enabled flexible paper-based humidity sensor with high sensitivity and superior durability,” *Chem. Eng. J.*, vol. 404, p. 127105, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.CEJ.2020.127105.
- [32] A. Kafy, A. Akther, M. I. R. Shishir, H. C. Kim, Y. Yun and J. Kim, “Cellulose nanocrystal/graphene oxide composite film as humidity sensor,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 247, pp. 221–226, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.SNA.2016.05.045.
- [33] D. H. Ho, Q. Sun, S. Y. Kim, J. T. Han, D. H. Kim and J. H. Cho, “Stretchable and Multimodal All Graphene Electronic Skin,” *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 13, pp. 2601–2608, 2016, doi: 10.1002/adma.201505739.
- [34] H. Tai, S. Wang, Z. Duan and Y. Jiang, “Evolution of breath analysis based on humidity and gas sensors: Potential and challenges,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 318, p. 128104, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.SNB.2020.128104.
- [35] R. R. Silva *et al.*, “Microbial nanocellulose adherent to human skin used in electrochemical sensors to detect metal ions and biomarkers in sweat,” *Talanta*, vol. 218, no. January, p. 121153, 2020, doi: 10.1016/j.talanta.2020.121153.
- [36] A. S. Santhosh *et al.*, “A multianalyte electrochemical sensor based on cellulose fibers with silver nanoparticles composite as an innovative nano-framework for the simultaneous determination of ascorbic acid, dopamine and paracetamol,” *Surfaces and Interfaces*, vol. 26, p. 101377, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.SURFIN.2021.101377.
- [37] K. Neubauerova, M. C. C. G. Carneiro, L. R. Rodrigues, F. T. C. Moreira and M. G. F. Sales, “Nanocellulose- based biosensor for colorimetric detection of glucose,” *Sens. Bio-Sensing Res.*, vol. 29, no. July, p. 100368, 2020, doi: 10.1016/j.sbsr.2020.100368.
- [38] J. Wu, Y. Feng, L. Zhang and W. Wu, “Nanocellulose-based Surface-enhanced Raman spectroscopy sensor for highly sensitive detection of TNT,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 248, no. July, p. 116766, 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116766.
- [39] C. Ruiz-Palmero, M. L. Soriano and M. Valc6rcel, “Gels based on nanocellulose with photosensitive ruthenium bipyridine moieties as sensors for silver nanoparticles in real samples,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 229, pp. 31–37, Jun. 2016, doi: 10.1016/J.SNB.2016.01.098.
- [40] F. Hu, Y. Li, Y. Zhang, Y. Li, H. Li and S. Ai, “Flexible Ag NCs/CNFs film for colorimetric and SERS dual-mode ultrasensitive detection of mercury ions (II),” *Vib. Spectrosc.*, vol. 118, p. 103342, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.VIBSPEC.2022.103342.
- [41] M. M. Langari, M. M. Antxustegi and J. Labidi, “Nanocellulose-based sensing platforms for heavy metal ions detection: A comprehensive review,” *Chemosphere*, vol. 302, p. 134823, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.134823.
- [42] R. Song, Q. Zhang, Y. Chu, L. Zhang, H. Dai and W. Wu, “Fluorescent cellulose nanocrystals for the detection of lead ions in complete aqueous solution,” *Cellulose*, vol. 26, no. 18, pp. 9553–9565, 2019, doi: 10.1007/s10570-019-02760-y.
- [43] P. Lv *et al.*, “Self-assembly of nitrogen-doped carbon dots anchored on bacterial cellulose and their application in iron ion detection,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 172, pp. 93–101, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.CARBPOL.2017.04.086.
- [44] K. Zinoubi, H. Majdoub, H. Barhoumi, S. Boufi and N. Jaffrezic-Renault, “Determination of trace heavy metal ions by anodic stripping voltammetry using nanofibrillated cellulose modified electrode,” *J. Electroanal. Chem.*, vol. 799, pp. 70–77, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.JELECHEM.2017.05.039.
- [45] Y. Yue, J. Gu, J. Han, Q. Wu and J. Jiang, “Effects of cellulose/salicylaldehyde thiosemicarbazone complexes on PVA based hydrogels: Portable, reusable and high-precision luminescence sensing of Cu²⁺,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 401, p. 123798, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2020.123798.

- [46] W. M. E. M. M. Daniyal, Y. W. Fen, J. Abdullah, A. R. Sadrolhosseini, S. Saleviter and N. A. S. Omar, "Label-free optical spectroscopy for characterizing binding properties of highly sensitive nanocrystalline cellulose-graphene oxide based nanocomposite towards nickel ion," *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 212, pp. 25–31, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.SAA.2018.12.031.

A.O. Naidonov, V.M. Koval

SENSORS BASED ON NANOCELLULOSE FOR BIODEGRADABLE, FLEXIBLE, DISPOSABLE AND WEARABLE ELECTRONICS

Problems. Rapid technical progress has led to a reduction in the useful life of consumer electronics. The introduction of green, flexible, biodegradable electronic devices will prevent an environmental catastrophe. Recently, the use of organic materials instead of inorganic analogues has become increasingly popular, which makes it possible to move from rigid solid-state sensors for multiple use that require disposal to flexible, disposable sensors that are suitable for human wear on the body or clothing and for spontaneous decomposition in nature after using. One of such promising organic materials is nanocellulose.

The aim of the study. Studying the possibility of nanocellulose application for the manufacture of flexible, wearable, disposable sensors of various types of physical and chemical quantities.

Methodology of implementation. In the article the analysis, classification and comparison of various technologies and features of synthesis, as well as the main characteristics of flexible sensors made on the basis of nanocellulose were fulfilled. Also the main parameters of flexible sensors based on nanocellulose were being compared with corresponding analogs of sensors based on artificial polymers.

Research results. The paper established the physical and technological features of using nanocellulose for the manufacture of sensors of various types of physical and chemical quantities in order to improve their performance. It has been established that nanocellulose can be used both as a substrate and as a sensitive element of a sensor. It has also been shown that nanocellulose is suitable for use in sensors based on both electrical physical phenomena and optical effects.

Conclusions. Nanocellulose is a promising biodegradable material on the basis of which flexible, disposable, wearable sensors can be created. The manufacturing technology of such sensors should contain only low-temperature and dry processing processes. For effective use in certain types of sensors, it is advisable to manufacture nanocellulose with a modified surface or in the form of composites with other nanomaterials. Based on the obtained results, it is possible to improve existing and develop new methods of creating flexible wearable disposable sensors that do not require disposal.

Keywords: flexible wearable disposable sensor, biodegradable electronic, nanocellulose.

Рекомендована Радою
факультету електроніки
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
20 січня 2022 року

Прийнята до публікації
27 червня 2022 року

DOI: 10.20535/kpissn.2022.1-2.251016

УДК 681.586.6

Л.М. Павлов, П.О. Яганов*
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна
*Відповідальний автор: p.yahanov@ukr.net

МОДЕЛЬ ТЕРМОМЕТРИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІОДНОГО СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРИ

Проблематика. Мікроелектронні технології дозволяють створити структури з високою чутливістю до зовнішніх впливів. У напівпровідниковій мікроелектроніці це структури типу потенційного бар'єру на $p-n$ переході. Кремнієві діодні сенсори мають високу термочутливість у широкому діапазоні температур. Розроблено як фізичні, так і формальні математичні моделі термометричної характеристики діодного сенсора. Похибка вимірювання температури за деякими з цих методів виявилась неприйнятною для контролю багатьох технологічних процесів. Актуальним є проведення досліджень температурних властивостей $p-n$ переходу у нерівноважному стані для формалізації нової термометричної характеристики діодного сенсора.

Мета дослідження. Метою роботи є модель термометричної характеристики діодних сенсорів за результатами вимірювань вольт-амперних характеристик у діапазоні температур.

Методика реалізації. Здійснено аналіз методів градування термометричної характеристики діодних сенсорів за вольт-амперними характеристиками, виявлено чинники, що впливають на точність вимірювання температури, обґрунтовано метод регресійного аналізу для формування поліноміальної моделі термометричної характеристики.

Результати дослідження. В результаті досліджень вольт-амперних характеристик кремнієвих діодів у діапазоні температур (248 ... 393) К встановлено, що похибка вимірювання температури діодними сенсорами пов'язана з залежністю фактора неідеальності $p-n$ переходу від температури. Проведена оцінка точності термометричної характеристики, де ця функціональна залежність представлена у вигляді апроксимаційного поліному.

Висновки. Представлено альтернативну модель термометричної характеристики діодних сенсорів температури рівнянням регресії другого степеня. Аргументами функції є струм і напруга діода у режимі прямого зміщення. Стабільність струму у колі $p-n$ переходу не передбачається. Точність визначення температури в діапазоні температур (248 ... 393) К знаходиться в межах $\pm (0,2 \dots 0,256)$ К.

Ключові слова: діодні сенсори температури; вольт-амперна характеристика; фактор неідеальності; регресія; модель термометричної характеристики.

Вступ

Сенсори фізичних величин є невід'ємною складовою сучасних систем збору та обробки даних. Саме їх сигнал, який формується під впливом зовнішніх полів різної природи, є основою інформації про стан об'єкта вимірювання. Розвиток мікроелектронних технологій сприяв появі різноманітних структур з високою чутливістю до зовнішніх впливів. Оскільки переважним електричним відгуком сенсорного сигналу є струм і напруга, а технології мікроелектроніки зорієнтовані на зменшення розмірів електронних приладів, виникає деяка суперечливість між рівнем сигналу і габаритними розмірами мікросенсора. Величина електричного струму залежить від кіль-

кості носіїв заряду, які сформовані в об'ємі речовини. Чим більший об'єм, тим більший струм і вищий рівень сигналу первинного вимірювального перетворювача. Низький рівень знижує завадостійкість, ускладнює захист інформації, обмежує можливості вторинного перетворення.

Для мікроелектронних сенсорів важливим є використання такого ефекту перетворення фізичної величини в електричний сигнал, який зберігає чутливість і рівень електричного сигналу в разі зменшення габаритів і маси сенсора. До таких ефектів належать явища в неоднорідностях типу потенціального бар'єра. Величина потенційного бар'єру залежить від питомих і фундаментальних параметрів. У твердотільній напівпровідниковій електроніці це ширина

Пропозиція для цитування цієї статті: Л.М. Павлов, П.О. Яганов, «Модель термометричної характеристики діодного сенсора температури», *Наукові вісті КПІ*, № 1–2, с. 42–50, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.251016

Offer a citation for this article: Pavlov L.M., Yahanov P.O. "Model of the thermometric characteristics of the diode temperature sensor", *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 42–50, 2022 doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.251016

забороненої зони, рівень Фермі, рухливість і концентрація носіїв заряду, контактна різниця потенціалів тощо. Зміна висоти потенційного бар'єру у нерівноважному стані є мірою фізичної величини, яка спричинила цю зміну.

У напівпровідниковій мікроелектроніці найпоширенішим потенціальним бар'єром є $p-n$ -перехід. Явища і процеси у нерівноважному стані $p-n$ -переходу є основою функціонування багатьох мікросенсорів, серед яких важливе місце належить кремнієвим діодним сенсорам температури (ДСТ). Їх перевага полягає у доведеній до довершеності промисловій технології виготовлення кремнієвих мікроструктур, розвиненому матеріалознавстві, прогнозованості електрофізичних характеристик. Електричним сигналом ДСТ є падіння напруги на прямо зміщеному $p-n$ -переході, яке не залежить від площі чи об'єму $p-n$ -переходу, а визначається контактною різницею потенціалу та її температурними властивостями у нерівноважному стані. Термочутливість кремнієвих ДСТ різних конструкцій оцінюють в межах близьких до $2\text{ мВ}/\text{К}$ у діапазоні температур $T = (50-450)\text{ К}$ [1, 2].

Основою фізичної моделі функціонування ДСТ є модель тонкого переходу В. Шоклі, яка була розроблена у 1949 р. для германію [3]. Для кремнію вона лише якісно узгоджує реальну залежність струму від напруги [4]. З метою адаптації теоретичної вольт-амперної характеристики (ВАХ) $p-n$ -переходу до експериментальної наступне її використання супроводжувалось внесенням поправок, включення додаткових складових у формулу моделі, ускладненням еквівалентної схеми $p-n$ -переходу [5–7].

Це стосується і метрологічних характеристик ДСТ, переважна більшість яких використовує температурну залежність падіння напруги прямого зміщення на $p-n$ -переході за постійного струму [2]. Для зменшення похибки вимірювання температури, викликаної саморозігрівом сенсора, струм підтримують на низькому рівні порядку $I = (10^{-1}-10^{-2})\text{ мкА}$ з відхиленнями від номінального значення не більше 0,1–0,05 % [1, 2, 8, 9]. Такі жорсткі вимоги до апаратної частини вимірювального перетворювача інколи суттєво ускладнюють калібрування, а для користувача обмежують можливості його використання.

Автори методів [10–12] моделювання метрологічних характеристик ДСТ на основі аналізу формули В. Шоклі прийшли до висновку, що стабільність струму крізь $p-n$ -перехід не є

обов'язковим фактором для визначення температури. Також було обґрунтовано, що параметри, залежні від конструкторсько-технологічних особливостей виготовлення ДСТ, можна виключити з формули термометричної характеристики. Представлено моделі термометричних характеристик, які використовують для розрахунку температури тільки струм і напругу у колі $p-n$ -переходу у двох точках ВАХ зі встановленням числового значення фактора неідеальності. За вимірюваннями струму і напруги у трьох точках однієї гілки ВАХ з'являється можливість врахувати у термометричній характеристиці, крім фактора не ідеальності також послідовний опір ДСТ. Надалі ці параметри розглядають як константи.

Проте похибка вимірювання температури за цими методами виявилась неприйнятною для контролю багатьох технологічних процесів. Щоб підвищити точність згаданих вище методів модель термометричної характеристики ДСТ, яка включає формулу В. Шоклі для $p-n$ -переходу, доповнили поліноміальною складовою з використанням емпіричних коефіцієнтів. Обґрунтовано, що обмежитись тільки вимірюванням струму і напруги без врахування температури, за якої ці вимірювання відбулись, неможливо [13–16].

У [8] математичну модель кремнієвого давача температури розглянуто з точки зору врахування усіх фізичних процесів перенесення заряду у $p-n$ -переході на основі певних теоретичних припущень, які перевірено експериментально. Крім фізичних моделей термометричних характеристик ДСТ відомі також формальні математичні моделі, які є поліноміальними залежностями падіння напруги від температури на основі методів сплайн-інтерполяції, апроксимації, технологій нейронних мереж, де головним критерієм є обчислювальна точність [17–19].

Усе вищенаведене свідчить про те, що пошук оптимального методу моделювання термометричних характеристик діодних сенсорів температури триває. Намагання забезпечити бажану точність термометрії та поєднати фізичну і формальну математичну модель у термометричній характеристиці призводить до збільшення кількості емпіричних параметрів та ускладнює процедуру їх визначення. Отже, актуальним є проведення досліджень температурних властивостей $p-n$ -переходу у режимі прямого зміщення для оптимального використання методів і засобів градування термометричної характеристики ДСТ.

Постановка задачі

Метою роботи є модель термометричної характеристики кремнієвих діодних сенсорів за результатами вимірювань ВАХ у діапазоні температур.

Для досягнення мети треба проаналізувати методи моделювання термометричної характеристики ДСТ за ВАХ, виявити чинники, що впливають на точність вимірювання температури, обґрунтувати метод формування поліноміальної моделі термометричної характеристики ДСТ.

Об'єктом дослідження є температурні властивості нерівноважного стану $p-n$ -переходу. Предмет дослідження – методи і моделі термометричної характеристики кремнієвих діодних сенсорів у режимі прямого зміщення.

Методи моделювання термометричної характеристики діодних сенсорів температури без калібрування

Розглянемо математичні моделі [10–12] методів вимірювання температури без калібрування, які стали основою розвитку модельних уявлень про термометричні характеристики ДСТ, з метою обґрунтування прагматичних пропозицій щодо визначення температури діодними термосенсорами за вимірними струмом і напругою.

У моделі $p-n$ -переходу В. Шоклі зв'язок між струмом $p-n$ -переходу I та напругою U_D на ньому подано формулою вигляду: $I = I_S \left(e^{\frac{U_D}{\phi_T}} - 1 \right)$, де I_S – тепловий (дифузійний) струм $p-n$ -переходу; $\phi_T = \frac{kT}{e}$ – тепловий потенціал; k – стала Больцмана; T – температура; e – заряд електрона. Звідси $U_D = \phi_T \cdot \ln \left(\frac{I}{I_S} + 1 \right)$. Якщо $\frac{I}{I_S} \gg 1$, що спостерігається у переважній більшості випадків експлуатації ДСТ, остаточна формула, яка зв'яже напругу і струм, що протікає у колі $p-n$ -переходу, має вигляд $U_D = \phi_T \cdot \ln \left(\frac{I}{I_S} \right)$.

Для кремнієвих діодів ця формула дає лише якісне узгодження з реальними ВАХ, тому експериментальні результати представляють виглядом: $U_D = A\phi_T \cdot \ln \left(\frac{I}{I_S} \right)$, де A – фактор неіде-

альності $p-n$ -переходу, константа, значення якої встановлюють з експерименту.

Згідно [10], вимірявши на прямій гілці ВАХ $p-n$ переходу у двох точках струм і напругу $I_1(U_1)$ та $I_2(U_2)$, можна встановити температуру T , за якої струм і напруга були виміряні. Сутність методу викладено у формулах (1):

$$U_1 = A \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_1}{I_S} \right), \quad U_2 = A \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_2}{I_S} \right),$$

$$U_1 - U_2 = A \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right), \quad T = \frac{U_1 - U_2}{A \frac{k}{e} \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right)}. \quad (1)$$

Значення фактора неідеальності A визначають за деякої температури T і надалі вважають його незмінним.

За [11] модель термометричної характеристики враховує послідовний опір діодного сенсора R_S і падіння напруги на ньому: $U_D = A \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I}{I_S} \right) + IR_S$. Для визначення температури за струмом і напругою автори пропонують здійснити вимірювання у трьох точках прямої гілки ВАХ $I_1(U_1)$, $I_2(U_2)$ та $I_3(U_3)$. Сутність методу подано у формулах (2):

$$I_1 = I_0 + \Delta I, \quad I_2 = I_0 - \Delta I,$$

$$\Delta U_{10} = U_1 - U_0 = A \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_1}{I_0} \right) + (I_1 - I_0) \cdot R_S$$

$$\Delta U_{02} = U_0 - U_2 = A \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_0}{I_2} \right) + (I_0 - I_2) \cdot R_S$$

$$\Delta U = \Delta U_{02} - \Delta U_{01} = A \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_0^2}{I_1 \cdot I_2} \right). \quad (2)$$

З виразу (2) визначають параметр A , а з ΔU_{10} (або з ΔU_{02}) – послідовний опір R_S . Температуру T розраховують за будь-якою формулою з наведених вище, наприклад, :

$$T = \frac{\Delta U}{A \frac{k}{e} \ln \left(\frac{I_0^2}{I_1 \cdot I_2} \right)} \quad (3)$$

На рис. 1 зображено типову ВАХ кремнієвого діода, яка ілюструє використання методів [10, 11].

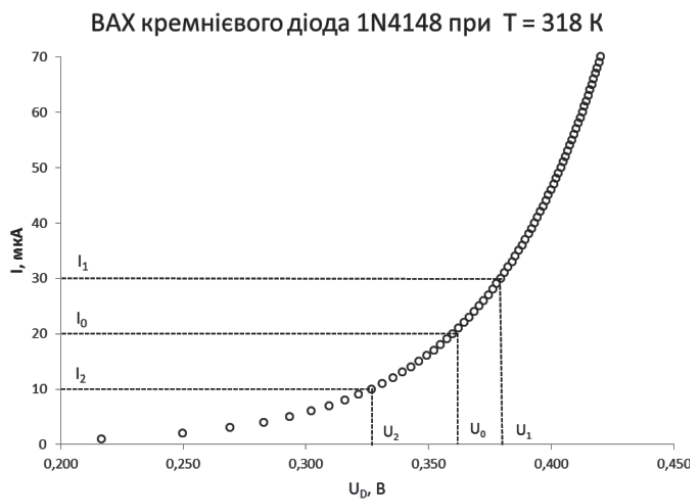


Рис. 1. Вольт-амперна характеристика кремнієвого діода 1N4148 за температури 318 К

Перевага обох розглянутих методів у тому, що в них не обчислюють тепловий (дифузійного) струму $p-n$ -переходу. З наведених міркувань випливає, що для калібрування термометричної характеристики діодних сенсорів температури визначальними є струм і напруга, які дозволяють встановити не тільки температуру, за якої ці електричні величини були виміряні, але й фактор неідеальності A та послідовний опір R_S (1), (2).

Аналіз точності моделювання термометричної характеристики діодних сенсорів температури

Для перевірки точності метрологічних характеристик ДСТ за методами [10, 11] зробимо розрахунки параметрів A та R_S кремнієвих діодів у широкому діапазоні температур. Для цього скористаємось можливостями системи *OrCAD* та її програмного модуля *PSpice*, в якому нелінійна модель $p-n$ -переходу враховує усі складові, потрібні для моделювання як діодів, так і біполярних транзисторів та аналогових схем на їх основі. Автоматизоване проектування електронних приладів сигналів різного рівня підтвердило високу точність розрахунків, які верифіковані і пройшли апробацію часом у галузі електроніки. Модифікація моделей Еберса-Молла та Гуммеля-Пуна, які використовують моделі $p-n$ -переходів у моделях біполярних транзисторів, у *PSpice* досягли довершеності, а параметри цих моделей та еквівалентні схеми на їх основі з максимальною точністю відтворюють ВАХ

декількох тисяч електронних приладів різних конструкцій і максимально наближені до реальних [20–22].

Загалом досліджено температурні ВАХ таких кремнієвих діодів: 1N4007, 1N4009, 1N4148, 1N4154, 1N5371B, 1N5814, 1N6514, 1N914, DIN4003., DIN4151, DIN3909, КД105В, КД106А, КД102А, КД203В. Результати моделювання термометричної характеристики продемонструємо на прикладі сімейства ВАХ малопотужного височастотного діода 1N4148 у корпусі DO-35, який презентує типові характеристики кремнієвих діодних термосенсорів у діапазоні середніх температур і який будемо розглядати як діодний сенсор температури.

У табл. 1 наведені значення напруг і струмів ВАХ діода 1N4148 у діапазоні температур $T = (248–393)\text{K}$. Ці дані повністю узгоджуються з усталеними уявленнями про зміну падіння напруги від температури на прямо зміщеному $p-n$ -переході. Вони дають змогу розрахувати як параметр неідеальності A , так і послідовний опір R_S за різних температур.

Таблиця 1. Температурна залежність напруги прямого зміщення кремнієвого діода 1N4148

T, K	Напруга, В		
	$I_1 = 36 \text{ мкА}$	$I_0 = 21 \text{ мкА}$	$I_2 = 6 \text{ мкА}$
248	0,563	0,543	0,496
263	0,526	0,504	0,455
268	0,513	0,492	0,441
273	0,501	0,479	0,427
288	0,464	0,440	0,386
303	0,426	0,401	0,344
318	0,388	0,362	0,302
333i	0,350	0,323	0,260
348	0,312	0,284	0,219
363	0,274	0,245	0,178
378	0,236	0,206	0,138
393	0,199	0,168	0,102

На рис. 2 відтворені ці температурні залежності $A(T)$ та $R_S(T)$. Вони свідчать, що гіпотеза про температурну незалежність цих параметрів не підтверджується. Параметр A можна вважати умовно постійним до температур діапазону $T = (310–320)\text{K}$. Для визначення температури у широкому діапазоні треба мати апроксимаційну залежність $A(T)$, за допомогою якої мінімізується похибка термометричної характеристики як відхилення (розсіювання) розрахункової за-

лежності, яку беруть як калібрувальну, від істинного значення параметру в точці вимірювання. Отже формулу (1) слід записати так:

$$T = \frac{U_1 - U_2}{A^n(T) \frac{k}{e} \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right)}; \quad (4)$$

де $A^n(T) = b_0 + b_1T + b_2T^2 + b_3T^3 + b_4T^4$ (5)

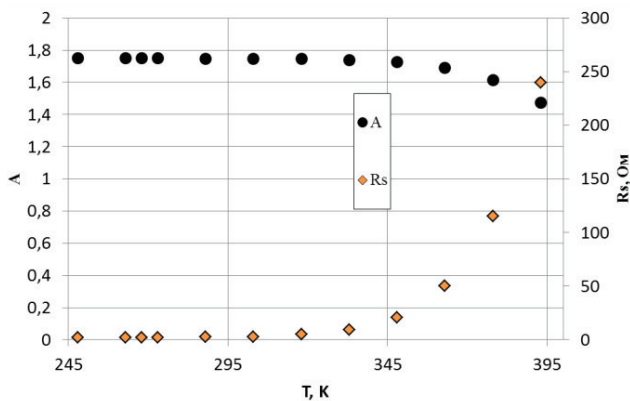


Рис. 2. Температурні залежності фактора неідеальності $A(T)$ та послідовного опору $R_s(T)$ кремнієвого діода $IN4148$

У табл. 2 наведені дані про похибку вимірювання температури ΔT за допомогою кремнієвого діода $IN4148$ у досліджуваному діапазоні температур $T = (248–393)K$ за формулами (4), (5), де $n = 0; 2; 3; 4$ – степінь апроксимаційного полінома параметра $A^n(T)$. У Табл. 3 наведено значення коефіцієнтів полінома $A^n(T)$ степеня $n = 0; 2; 3; 4$.

Таблиця 2. Похибка вимірювання температури кремнієвим діодом $IN4148$

T, K	Похибка вимірювання температури ΔT , K			
	$A^0(T)$	$A^2(T)$	$A^3(T)$	$A^4(T)$
248	0,173	1,146	-0,429	0,074
263	0,166	0,053	0,218	-0,099
268	0,163	-0,239	0,303	-0,079
273	0,160	-0,491	0,333	-0,038
288	0,148	-0,984	0,166	0,108
303	0,118	-1,041	-0,207	0,154
318	0,031	-0,624	-0,527	0,045
333	-0,221	0,238	-0,542	-0,131
348	-0,913	1,353	-0,107	-0,195
363	-2,658	2,183	0,654	0,003
378	-6,734	1,498	1,009	0,306
393	-15,501	-3,104	-0,876	-0,149

Таблиця 3. Коефіцієнти апроксимаційного полінома параметра неідеальності $A^n(T)$

b_i	$A^0(T)$	$A^2(T)$	$A^3(T)$	$A^4(T)$
b_0	1,75	1,19548	4,000874	-5,08601
b_1	0	0,00381	-0,02305	0,093651
b_2	0	-6,5E-06	7,83E-05	-0,00048
b_3	0	0	-8,8E-08	1,08E-06
b_4	0	0	0	-9,2E-10

На рис. 3 показано зміну похибки вимірювання температури кремнієвим діодом $IN4148$ у температурному діапазоні $T = (248–393)K$ за формулою (4) з поліномами $A^n(T)$ степеня $n = 0; 2; 3; 4$.

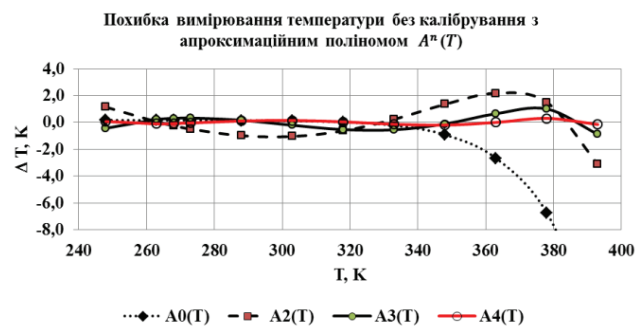


Рис. 3. Похибка вимірювання температури кремнієвим діодом $IN4148$

Якщо формулу (4) записати у вигляді $T \cdot A^n(T) = \frac{U_1 - U_2}{\frac{k}{e} \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right)}$, то визначення температури

полягатиме у знаходженні розв’язку рівняння степеня $(n + 1)$, а згідно з теоремою Абеля–Руффіні для поліномів п’ятого і вищих степенів неможливо знайти рішення у радикалах за коефіцієнтами цього полінома.

Таким чином, апроксимаційний поліном $A^3(T)$ третього степеня є найвищим прагматично доцільним для термометричної характеристики діодного сенсора з використанням формули В. Шоклі за (1), (2), а точність визначення температури буде в межах $\Delta T = \pm(0,5 - 0,6)K$. У широкому діапазоні температур досягти високої точності термометричної характеристики складно оскільки на різних ділянках прямої гілки ВАХ діода її кривизна не описується однією функцією [1, 4, 8, 13–16]. Врахування температурної залежності крім фактора неідеальності $A^n(T)$, а також і послідовного опору $R_s^n(T)$ не дозволяє досягти бажаного, оскільки

результуюче рівняння для розв'язку буде все одно порядку не нижче $(n + 1)$:

$$A^n(T) \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_1}{I_0}\right) + (I_1 - I_0) \cdot R_s^n(T) - (U_1 - U_0) = 0.$$

Спираючись на цей висновок, можна стверджувати, що немає потреби подавати термометричну характеристику ДСТ виключно у модифікованій формі формули В. Шоклі. Прагматичною пропозицією може бути рівняння регресії, в якому струм і напруга p - n -переходу є аргументами поліноміальної функції $T(I, U)$. У цьому полягає відмінність від відомих залежностей вигляду $U = f(T, I)$.

У цій роботі досліджено термометричну характеристику поліноміальної форми:

$$T = b_0 + b_1U + b_2I + b_3UI + b_4U^2I + b_5UI^2 + b_6U^2 + b_7I^2 \quad (6)$$

Особливістю такого способу генерації термометричної характеристики є те, що на напругу та струм не накладаються умови стабільності у досліджуваному діапазоні температур. Коефіцієнти регресії розраховують за матричною формулою: $B = (X^T X)^{-1} \cdot (X^T Y)$, де X – матриця умов експерименту; Y – матриця результатів експерименту. Матриця X формується за результатами вимірювання струму I_i та напруги U_i прямої гілки ВАХ p - n переходу за температури T_i , а матриця Y – це матриця-стовбчик температур T_i . Для калібрування метрологічної характеристики ДСТ необхідно використовувати гілки сімейства ВАХ у широкому діапазоні температур [17].

Поліноміальна модель термометричної характеристики діодних сенсорів температури

Подамо результати моделювання термометричної характеристики за цим методом на прикладі тих самих експериментальних даних, що були розглянуті вище. Дванадцять гілок сімейства ВАХ отримані у діапазоні температур $T = (248 - 393) \text{ К}$. На кожній гілці ВАХ фіксували струм A у двадцяти точках та напругу на p - n -переході B , яка відповідає цьому струму. Таким чином, матриця X мала 240 рядків, а кількість стовпців дорівнювала кількості коефіцієнтів регресії, які належить визначити. Залежності від конкретних вимог до точності визначення температури та прагматичних міркувань користувач обирає вид полінома та набір даних для його актуалізації.

У табл. 4 наведено значення коефіцієнтів b_i регресійних поліномів T_1, T_2, T_3 за формулою (6) та її статистичні характеристики: дисперсію моделі σ_{mod}^2 термометричної характеристики $T(I, U)$, коефіцієнт детермінації R^2 та стандартну похибку вимірювання температури σ . Для розрахунку використано можливості пакета аналізу даних «Регресія» у складі Microsoft Excel.

Таблиця 4. Коефіцієнти апроксимаційного полінома термометричної характеристики кремнієвого діода IN4148

b_i	T_1	T_2	T_3
b_0	421,2634	419,90878	419,967
b_1	-360,045	-362,4862	-362,955
b_2	1964275	2283323,6	2284591
b_3	-1951246	-1053010	-1056972
b_4	-1290362	-0,776901	0
b_5	$4,34 \cdot 10^{10}$	0	0
b_6	22,29813	0	0
b_7	-0,03567	$-2,37 \cdot 10^{10}$	$-2,37 \cdot 10^{10}$
σ_{mod}^2	0,04	0,0656	0,0654
R^2	0,9999	0,9999	0,9999
σ	$\pm 0,203 \text{ К}$	$\pm 0,256 \text{ К}$	$\pm 0,256 \text{ К}$

На рис. 4 відображено значення похибки градування термометричної характеристики ДСТ, обчисленої як різниця між модельним значенням температури за формулою (6) і температурою вимірювання ВАХ. Точність вимірювання температури за цією метрологічною характеристикою удвічі вища, ніж за формулами (4) та (5).

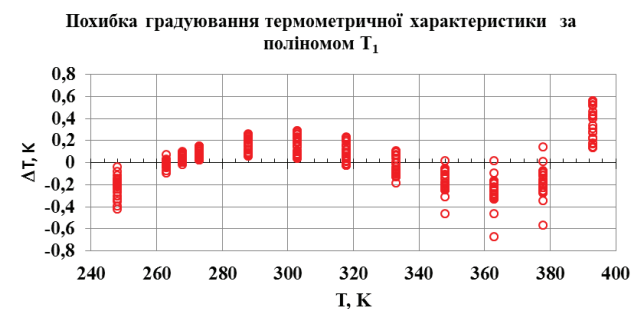


Рис. 4. Похибка градування термометричної характеристики кремнієвого діодного сенсора температури IN4148 поліномом T_1

На рис. 5 показано поверхню станів кремнієвого діода IN4148 в діапазоні струмів $I = (10 - 30) \text{ мкА}$. Вона ілюструє звичайний характер змін електричних сигналів у колі ДСТ.

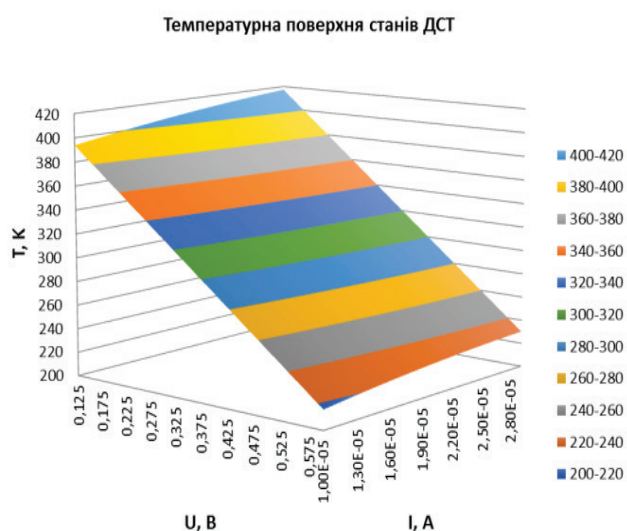


Рис. 5 Температурна поверхня станів кремнієвого діодного сенсора температури IN4148

Отримані результати обґрунтовано підтверджують прагматичну доцільність формальних математичних методів для моделювання метрологічних характеристик діодних термосенсорів з достатньою для практичного використання точністю. Вони не є засобами протиставлення моделям, створених на основі фізичних процесів перенесення заряду, а лише доповнюють і розширюють можливості адекватного опису метрологічної характеристики фізичної величини. Вибір методів і засобів моделювання залишається за користувачем.

Список літератури

- [1] Yu.M. Shwarts, V.L. Borblik, N.R. Kulish, E.F. Venger, and V.N. Sokolov, "Limiting characteristics of diode temperature sensors", *Sensors and Actuators.*, A. 86. pp. 197–205, 2000. doi:10.1016/S0924-4247(00)00445-3
- [2] Lake Shore Cryotronics. URL: <https://www.lakeshore.com/>
- [3] Шокли, Вильям, *Теория электронных полупроводников: Приложения к теории транзисторов. Пер. с англ. Под ред. и с предисл. В. П. Жузе.* – Москва : Изд-во иностр. л-ры, 1953.
[Shokli, Vil'yam, *Teoriya elektronnykh poluprovodnikov: Prilozheniya k teorii tranzistorov Per. s angl. Pod red. i s predisl. V. P. Zhuze.* – Moskva : Izd-vo inostr. lit., 1953.]
- [4] С. Зи, *Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. Кн.1.* – М.: Мир, 1984. [S. Sze . *Fizika poluprovodnikovyyh priborov: V 2-h knigah. Kn.1.* – М.: Mir, 1984.]
- [5] A. Barna, and D. Horelick, "A simple diode model including conductivity modulation", *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 18, part 2, pp. 233 – 240. Mar. 1971. doi:10.1109/TCT.1971.1083246
- [6] I. E. Getreu, "Modeling the Bipolar Transistor", Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1978, vol.1. URL: <https://picture.iczhiku.com/resource/eetop/WyKtDIrFQPigHMVB.pdf>
- [7] M. Popadic, G. Lorito, and L. K. Nanver, "Analytical Model of I–V Characteristics of Arbitrarily Shallow p–n Junctions", *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 56, no. 1, pp. 116–125, Jan. 2009, doi:10.1109/TED.2008.2009028.
- [8] V. O. Yatsuk, O. Y. Basalkevych, Y. V. Yatsuk, and A. O. Sachenko, "New Method of Dispersion Minimization of Si p–n Junction Temperature Sensors", *IEEE Sensors Applications Symposium*, 2007, pp. 1–4. doi: 10.1109/SAS.2007.374408

Висновки

У результаті досліджень ВАХ кремнієвих діодів у діапазоні температур $T = (248–393)K$ встановлено, що похибка вимірювання температури діодними сенсорами пов'язана з залежністю фактора неідеальності $p-n$ -переходу від температури. Проведено оцінювання точності термометричної характеристики ДСТ, де цю функціональну залежність подано у вигляді апроксимаційного полінома.

Обґрунтовано, що точність визначення температури залежить від степеня полінома, а прагматично доцільною є поліноміальна апроксимація не вище третього степеня, яка забезпечує точність визначення температури в діапазоні температур $T = (248–393)K$ у межах $\Delta T = \pm(0,5–0,6)K$.

Подано альтернативну модель термометричної характеристики діодних сенсорів температури рівнянням регресії другого степеня. Аргументами функції є струм і напруга діода у режимі прямого зміщення. Стабільність струму в колі $p-n$ -переходу не передбачається. Точність визначення температури в діапазоні температур $T = (248–393)K$ перебуває в межах $\Delta T = \pm(0,2–0,256)K$.

Надалі дослідження методів і засобів моделювання термометричних характеристик діодних сенсорів температури будуть спрямовані на підвищення точності моделі у широкому діапазоні температур, струмів і напруг, визначення меж достовірності цих характеристик, пошук нових оптимальних форм моделей метрологічних характеристик вимірювальних перетворювачів.

- [9] E.F. Venger et al., “Miniature Silicon Diode and Germanium Resistive Thermometers for Measurement of Low Temperature”, *Physics and Chemistry of Solid State*, vol. 11, no. 2, pp. 499–505, 2010. URL: http://www.microsensor.com.ua/art/FXTT_2010.pdf
- [10] T. C. Verster, “p–n Junction as an ultra linear calculable thermometer”, *Electron. Lett.*, vol. 4, no. 9, pp. 175–176, May 1968. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45803>
- [11] T. C. Verster, “Dual Transistor as Thermometer Probe”, *Review of Scientific Instruments*, no. 40, pp. 174, 1969. doi:10.1063/1.1683724
- [12] O. Kanoun, “Modeling the P–N Junction I–U Characteristic for an Accurate Calibration-Free Temperature Measurement”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 49, no. 4, pp. 901–904, 2000. doi: 10.1109/19.863946
- [13] O. Kanoun, and H.-R. Tränkler, «Kalibrationsfreie Temperaturmessung durch Parameterextraktion aus der Strom-Spannungs-Kennlinie von pn-Übergängen (Calibration-Free Temperature Measurement using Parameter Extraction from the P-N Junction Current-Voltage Characteristic)», *Technisches Messen*, vol. 67, no. 4, pp. 171–171, 2000. doi:10.1524/teme.2000.67.4.171
- [14] O. Kanoun, and H.-R. Tränkler, “Model Performance improvement for a Calibration-free Temperature Measurement Based on p-n Junctions”, *Sensors and Actuators*, vol. 101, no.3, pp. 275–282, 2002. URL: <https://www.academia.edu/10085810>
- [15] O. Kanoun, and H.-R. Tränkler, «Übersicht kalibrationsfreier Verfahren der Temperaturmessung (Survey of Calibration-Free Methods for Temperature Measurement)», *Technisches Messen*, vol. 70, no. 9, pp. 442–448, 2003. doi: 10.1524/teme.70.9.442.20247
- [16] O. Kanoun, “Kalibrationsfreie Temperaturmessung auf Basis von bipolaren Transistoren, neue Perspektiven für die Messtechnik” (“Calibration-Free Temperature Measurement Based on Bipolar Transistors, New Perspectives for Measurement Technology”), *Technique Measurement*, vol. 69, no. 4, pp. 187–187, 2002. doi:10.1524/teme.2002.69.4.187
- [17] П.О. Яганов, та Ю.М. Шварц “Апроксимация термометричної характеристики діодних сенсорів методом багатofакторного аналізу”, *Вісник НТУУ „КПІ”. Серія приладобудування*, № 30, с. 5–11, 2005. URL: <http://ela.kpi.ua:8080/bitstream/123456789/11536/1/1.pdf>
[P.O. Yaganov, ta Yu.M. Shvarcz “Aproksy`maciya termometry`chnoyi kharktery`sty`ky` diodny`x sensoriv metodom bahatofaktornoho analizu”, *Visnyk NTUU „KPI”. Seriya pry`ladobuduvannya*, # 30, с. 5–11, 2005.]
- [18] Ю.М. Шварц, П.А. Яганов, В.Г. Дзюба, “Нейросетевая аппроксимация термометрической характеристики діодного сенсора”, *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, № 5, с. 18–23, 2005. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45804>
[Yu.M. Shvarcz, P.A. Yaganov P.A., V.G. Dzyuba, “Nejrosetevaya approksimacziya termometrisheskoj kharakteristiki di`odnogo sensora”, *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoj apparature*, # 5, с. 18–23, 2005]
- [19] Б. Коман, “Програмна апроксимация термометричних характеристик діодного сенсора температури в ОС Android”, *Вісник Національного університета «Львівська політехніка»*, т. 843, № 1, с. 28–34, 2016. URL: <https://science.lpnu.ua/scsit/all-volumes-and-issues/volume-843-number-1-2016/programna-aproksimaciya-termometrichnih>
[B. Koman, “Programna aproksy`maciya termometry`chny`x kharktery`sty`k diodnogo sensora temperatury` v OS Android”, *Visnyk Nacional`nogo universyteta «Lvivs`ka politexnika»*, т. 843, № 1, с. 28–34, 2016.]
- [20] PCB Software Ltd. URL: <https://www.orcad.com/>
- [21] Z.R. Mohammad, and I.K. Shahidul, “Modeling Electrical Characteristics of a pn-Junction Silicon Solar Cell Using PSpice”, *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 133–138, 2012. doi: 10.4236/sgre.2012.32019
- [22] Кеон Джон. *OrCAD Pspice. Анализ электрических цепей (+DVD)*. – М.: ДМК Пресс, СПб.: Питер, 2008. ISBN: 978-5-388-00023-1.
[Keoun Dzhon. *OrCAD Pspice. Analiz elektricheskikh cepej (+DVD)*. – М.: ДМК Press, SPb.: Piter, 2008. ISBN: 978-5-388-00023-1.]

Pavlov L.M., Yahanov P.O.

THERMOMETRIC MODEL OF DIODE TEMPERATURE SENSOR

Background. Microelectronic technologies make it possible to create structures with high sensitivity to external influences. In semiconductor microelectronics, these are structures of the type of potential barrier at the $p - n$ Junction. Silicon diode sensors have high temperature sensitivity in a wide temperature range. Both physical and formal mathematical models of the thermometric characteristic of the diode sensor have been developed. The temperature measurement error of some of these methods was not acceptable for the control of many processes. It is relevant to conduct studies of the temperature properties of the $p - n$ Junction in a non-equilibrium state to formalize the new thermometric characteristic of the diode sensor.

Objective. The purpose of the work is a model of thermometric characteristics of silicon diode sensors based on the results of measurements of volt-ampere characteristics in the temperature range.

Methods. Analysis of methods of calibration of thermometric characteristic of diode sensors by volt-ampere characteristics was carried out, factors affecting temperature measurement accuracy were revealed, regression analysis method for formation of polynomial model of thermometric characteristic was substantiated.

Results. As a result of studies of the volt-ampere characteristics of silicon diodes in the temperature range (248... 393) K, it was found that the error in measuring temperature by diode sensors is associated with the dependence of the non-ideality factor of the $p - n$ Junction on temperature. The accuracy of the thermometric characteristic is estimated, where this functional dependence is represented as an approximation polynomial.

Conclusions. An alternative model of thermometric characterization of diode temperature sensors by the second degree regression equation is presented. The arguments of the function are the current and voltage of the diode in the direct displacement mode. Current stability in the $p - n$ Junction circuit is not assumed. The temperature determination accuracy in the temperature range (248... 393) K is within $\pm (0.2... 0,256)$ K.

Keywords: diode temperature sensors; volt-ampere characteristic; non-ideality factor; regression; thermometric characteristic model.

Рекомендована Радою
факультету електроніки
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
20 грудня 2021 року

Прийнята до публікації
27 червня 2022 року

DOI: 10.20535/kpissn.2022.1-2.268688

УДК 517.9: 621.382.233

Бомба А.Я.¹, Мороз І.П.¹¹Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна

*Відповідальний автор: Igor_Moroz@yahoo.com

МОДЕЛЮВАННЯ ДИФУЗІЙНО-ДРЕЙФОВИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВІЙ ПЛАЗМІ АКТИВНОЇ ОБЛАСТІ *P-I-N*-ДІОДІВ В УМОВАХ ПРОНИКАЮЧОЇ В ПЛАЗМУ НВЧ-ХВИЛІ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ ЗБУРЕНЬ

Проблематика. Розглянуто проблему розробки інструментальних засобів для математичного моделювання стану електронно-діркової плазми в активній області *p-i-n*-структур за умов впливу додаткового фактора – потужного надвисокочастотного (НВЧ) електромагнітного поля. Задача важлива для спеціалістів у сфері НВЧ-електроніки, оскільки *p-i-n*-структури використовуються, зокрема, для комутації потужних електромагнітних полів і у якості захисних пристроїв вхідних трактів радіотехнічних систем.

Мета дослідження. Полягає у розробці методології моделювання розподілу концентрації електронно-діркової плазми в активній області плазмових діодів з урахуванням впливу на динаміку носіїв заряду проникаючого в активну область НВЧ-випромінювання та розвитку асимптотичних методів розв'язання відповідних сингулярно збурених нелінійних задач.

Методика реалізації. Досягнення мети забезпечується застосуванням методів пограничного шару, комплексних амплітуд та класичних аналітико-числових методів розв'язання крайових задач для систем звичайних диференціальних рівнянь.

Результати дослідження. Запропоновано узагальнену математичну модель стаціонарного стану електронно-діркової плазми в активній області *p-i-n*-діодів у гідродинамічному наближенні, яка враховує вплив на процеси у плазмі НВЧ-випромінювання. Основу моделі складає нелінійна сингулярно збурена крайова задача для системи рівнянь неперервності електронно-діркових струмів та Пуассона. Модельна крайова задача зведена до рекурентної послідовності лінійних крайових задач. Знайдено розв'язки поставленої задачі у вигляді асимптотичних рядів, що містять стаціонарну і нестаціонарну складові. Особливістю запропонованої математичної моделі є те, що вона відображає ефект виявлення електромагнітної НВЧ ТЕ-подібної хвилі на неоднорідності розподілу концентрації носіїв заряду у активній області *p-i-n*-діода.

Висновки. Розроблено методологію моделювання стаціонарного стану електронно-діркової плазми в активній області *p-i-n*-діодів з урахуванням впливу на динаміку носіїв заряду проникаючого в активну область НВЧ випромінювання.

Ключові слова: сингулярність, асимптотичний ряд, примежова поправка, електронно-діркова плазма, *p-i-n*-діод.

Вступ

Плазмовий діод (*p-i-n*-діод) – напівпровідниковий пристрій, в якому області сильнолегованих напівпровідників *p*- та *n*-типів розділені шаром напівпровідника із власною провідністю (*i*-область, або активна область) [1–3]. *P-i-n*-діоди в об'ємному та інтегральному виконанні (поверхнево-орієнтовані структури, кремнієві вікна тощо) широко використовують для управління електромагнітним полем у НВЧ-системах

передачі інформації [1–3] завдяки можливості створення в *i*-області діода електронно-діркової плазми.

Розроблення технічних пристроїв НВЧ з керуючими елементами на *p-i-n*-структурах пов'язане із розв'язанням просторових крайових задач: для системи рівнянь Максвелла [4]; системи дифузійно-дрейфових рівнянь, Пуассона та теплопровідності (дозволяють отримати інформацію про електродинамічні властивості керуючого елемента) [1–3]. Окремо згадаємо задачі оптимі-

Пропозиція для цитування цієї статті: А.Я. Бомба, І.П. Мороз, “Моделювання дифузійно-дрейфових процесів в електронно-дірковій плазмі активної області *p-i-n*-діодів в умовах проникаючої в плазму НВЧ хвилі методами теорії збурень”, *Наукові вісті КПИ*, № 1–2, с. 51–64, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.268688

Offer a citation for this article: Ya. Bomba, I. P. Moroz, “Simulation of Diffusion-Drift Processes in the Electron-Hole Plasma of the P-I-N-Diodes Active Region Under the Conditions of a MW Penetrating in the Plasma by the Perturbation Theory Methods”, *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 51–64, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.268688

зації характеристик відповідних технічних систем. У загальній постановці задача моделювання властивостей p - i - n -структур складна і для зменшення рівня її складності використовують методи декомпозиції [4].

Розв'язання електродинамічної задачі забезпечує можливість отримати інформацію про базові характеристики пристрою, що проектується, – матрицю розсіювання електромагнітного поля. Найчастіше така задача вирішується методом Бубнова–Гальоркіна або його модифікаціями [4]. Вхідними даними для електродинамічної задачі є, зокрема, матеріальні рівняння, які описують електродинамічні властивості електронно-діркової плазми діода. Труднощі, які виникають у процесі отримання матеріальних рівнянь (або їх аналогів), ідентичні до тих, з якими стикаються під час моделювання фізичних характеристик інших пристроїв напівпровідникової електроніки. Зокрема, складність проблематики моделювання властивостей електронно-діркової плазми p - i - n -діода обумовлена нелінійністю базової системи рівнянь, наявністю в i -області ділянок з великими значеннями градієнтів шуканих функцій, жорсткими вимогами стосовно стійкості і збіжності обчислювальних схем [5; 6] (у випадку застосування чисельних методів для отримання результатів моделювання). Тому традиційно тут використовують метод лінеаризації та відповідні методи розв'язання лінійних рівнянь математичної фізики [1–3]. Під час комп'ютерного моделювання виникає проблема вибору початкового наближення, яка спонукає до пошуку та розроблення аналітичних методів розв'язання поставлених нелінійних задач, зокрема, асимптотичних методів [7–9].

Асимптотичні методи є досить ефективними під час вирішення складних науково-технічних проблем у різних предметних областях [10–17]. Вони забезпечують можливість не тільки знаходження наближених розв'язків поставлених задач, але й дослідити вплив різних факторів (навіть малозначущих), що діють у системі, і це забезпечує можливість краще розуміти фізику досліджуваних процесів. Один із таких методів – метод приміжових функцій [8, 9, 12] – модифіковано для отримання додаткової інформації про властивості активної області p - i - n -діодів [13, 14].

Проблема моделювання характеристик p - i - n -діодів ускладнюється залученням у модель додаткових факторів впливу, необхідністю застосування системних підходів до її вирішення.

Зокрема, під час вивчення процесів комутації НВЧ-полів високого рівня потужності потрібно враховувати вплив на стан плазми ефектів розігріву активної області [16], виявлення електромагнітних хвиль на p - i -, n - i -переходах [18] і зонах активної області з неоднорідним розподілом концентрації носіїв заряду, пробійні ефекти тощо.

Об'єктивно з'являється потреба в узагальненні наявних математичних моделей плазми напівпровідникових пристроїв, які важливі і з наукової, і з технічної точок зору, і у розробленні та удосконаленні методів їх аналізу.

Постановка задачі

Метою роботи є розвиток методології моделювання розподілу концентрації електронно-діркової плазми в активній області плазмових діодів з урахуванням впливу на динаміку носіїв заряду проникаючого в активну область НВЧ-поля та розвиток асимптотичних методів розв'язання відповідних сингулярно збурених нелінійних задач, що забезпечує можливість отримати додаткову інформацію про властивості просторового заряду p - i - n -діодів.

Математична постановка задачі дослідження

Розглянемо проблему визначення базових характеристик області просторового заряду p - i - n -діодів (область $\Omega = \{(x, y, z) : 0 < x < w, (y, z) \in \Omega_{II}\}$, де Ω_{II} – скінченна область, обмежена деякою заданою гладкою кривою, рис. 1) – розподілів концентрацій дірок (n), електронів (p) та потенціалу (φ) – за умови впливу на дифузійно-дрейфові процеси НВЧ-хвилі типу ТЕ [19], яка проникає в активну область діода і поширюється вздовж осі z . Якісний аналіз проблеми дозволяє зробити висновки про те, що область просторового заряду з погляду електродинамічних властивостей є неоднорідною, анізотропною, електропровідною. Задача моделювання процесу поширення електромагнітних хвиль за цих умов вимагає розроблення спеціальних підходів, які ґрунтуються на використанні системи рівнянь Максвелла з відповідними матеріальними рівняннями та граничними умовами. У припущенні низького рівня напруженості проникаючого в активну область діода НВЧ-поля (порівняно із внутрішніми електростатичними полями області просторового заряду) можна знехтувати впливом НВЧ-поля на дрейф носіїв

заряду на фоні лінійного процесу згасання хвилі в заданій області. Ідеалізовану задачу отримуємо у разі заміни фізичної області задачі модельною, що має однорідні та ізотропні властивості. В такому випадку вдається знайти аналітичні функції, які описують поведінку компонент електромагнітного поля в області Ω . Наприклад, можна говорити про поширення в такій ідеалізованій області згасаючої хвилі типу H_{01} (основна мода хвилеводу прямокутного поперечного перерізу). Така хвиля містить лише одну компоненту (у нашому випадку E_y^{ext}) вектора напруженості електричного поля, причому за фіксованого значення y в площині Ω_{\perp} значення напруженості електричного поля залежить лише від часу. За реальних умов характер поведінки електричного поля стає складнішим. Надалі пропонується розглядати H_{01} -подібні хвильові процеси, в яких структура електромагнітного поля нагадує структуру моди H_{01} . Проте тут допускається поява електричної компоненти поля E_y^{ext} , причому $E_x^{ext} \gg E_y^{ext}$, та враховується додатково залежність від координати x у приміжових зонах як наслідок неоднорідності та анізотропії середовища. Таким чином, без розв'язання електродинамічної задачі у нас з'являється попередня інформація про структуру НВЧ-хвилі в активній області p - i - n -діода.

Нехай напруженість електричного поля НВЧ-хвилі $\vec{E}^{ext} = (E_x^{ext}(x, y, z, t), E_y^{ext}(x, y, z, t), 0)$ змінюється в часі за гармонічним законом, причому

$$E_{x,y}^{ext}(x, y, z, t) = \frac{1}{2} (E_{*x,y}(x, y, z) e^{j\omega t} + E_{*x,y}^*(x, y, z) e^{-j\omega t}), \quad (1)$$

де функції $E_{*x,y}(x, y, z)$ та $E_{*x,y}^*(x, y, z)$ комплексно спряжені; величини $\sqrt{E_{*x}(x, y, z) E_x^*(x, y, z)}$, $\sqrt{E_{*y}(x, y, z) E_y^*(x, y, z)}$ визначають амплітуду коливального процесу і пропорційні енергії електромагнітної хвилі; ω – циклічна частота коливань; $j^2 = -1$. Ці функції мають зміст комплексних амплітуд та містять інформацію про початкову фазу коливального процесу.

Зосередимось на питанні про те, як зміняться провідні властивості області просторового заряду під час проникнення в неї електромагнітної хвилі. Припускаємо, що під впливом електричної компоненти НВЧ-поля E_x^{ext} , яка паралельна струму інжекції, виникають коливання носіїв заряду і завдяки їх неоднорідному розподілу в активній області у процесі коливань з'являється додатковий стаціонарний потік електронів і дірок вглиб досліджуваної області.

На процеси проходження електронно-діркового струму накладається процес коливання просторового заряду, тому розподіли концентрацій носіїв заряду у плазмі i -області пропонуємо шукати у такому вигляді:

$$n(x, y, z, t) = n^{st}(x, y, z) + \frac{1}{2} (n_*(x, y, z) e^{j\omega t} + n^*(x, y, z) e^{-j\omega t}); \quad (2)$$

$$p(x, y, z, t) = p^{st}(x, y, z) + \frac{1}{2} (p_*(x, y, z) e^{j\omega t} + p^*(x, y, z) e^{-j\omega t}),$$

де $n^{st}(x, y, z)$, $p^{st}(x, y, z)$ – стаціонарні розподіли концентрацій електронів і дірок відповідно; $n_*(x, y, z)$, $p_*(x, y, z)$ – швидкозмінні складові, які мають зміст комплексних амплітуд; $n^*(x, y, z)$, $p^*(x, y, z)$ – комплексно спряжені до $n_*(x, y, z)$, $p_*(x, y, z)$ функції.

Під час запису (2) враховано, що початкові фази коливань поля і плазми у загальному випадку не збігаються внаслідок інерційності носіїв заряду і основний внесок у коливальний процес здійснюють коливання на частоті НВЧ-поля.

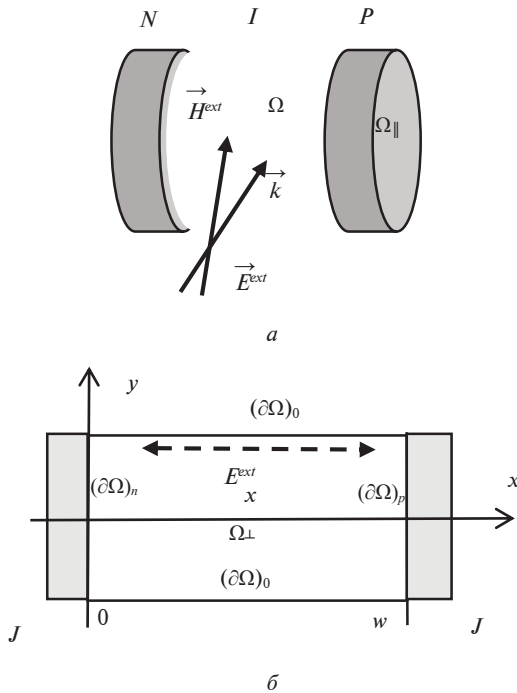


Рис 1. Схематичне зображення p - i - n -діода і проникаючої в діод НВЧ-хвилі (а); геометрія поперечного перерізу активної області (б)

На основі застосування принципу суперпозиції полів проводимо узагальнення математичної моделі електронно-діркової плазми [1–3] (записана у гідродинамічному наближенні), при цьому вважаємо, що напруженість електричної компоненти стороннього поля має такий рівень, що принцип суперпозиції не порушується. Отримуємо:

$$\begin{cases} D_n \Delta n - \mu_n \nabla \cdot (n(\nabla \varphi - \vec{E}^{ext})) - \frac{1}{\tau_n^*} n = \frac{\partial n}{\partial t}, \\ D_p \Delta p + \mu_p \nabla \cdot (p(\nabla \varphi - \vec{E}^{ext})) - \frac{1}{\tau_p^*} p = \frac{\partial p}{\partial t}, \\ \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{e} \nabla \cdot (\nabla \varphi - \vec{E}^{ext}) = -(p - n + N_I), \end{cases} \quad (3)$$

де p , n – функції розподілу концентрацій дірок і електронів; φ – функція розподілу потенціалу; τ_n^* , τ_p^* – характерний релаксаційний час життя електронів та дірок в i -області (у загальному випадку залежні від локальної концентрації електронів та дірок і визначаються певним механізмом рекомбінації носіїв заряду); $N_I = N_a - N_d$ – задана функція профілю легування (описує різницю концентрацій акцепторів і донорів в активній області); D_p , D_n – коефіцієнти дифузії, μ_p , μ_n – рухомості відповідно дірок

та електронів ($\mu_{n,p} = \frac{e}{k_B T} D_{n,p}$, де T – температура (300 К), k_B – стала Больцмана); e – заряд електрона; ε , ε_0 – відносна діелектрична проникність напівпровідника та діелектрична стала.

Граничні умови формалізуються у такому вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\mu_n}{D_n} n(E_v^{in} + E_v^{ext}) + \frac{\partial n}{\partial v} - 2\gamma_n n \Big|_{(\partial\Omega)_n} = \frac{J}{eD_n}, \\ \frac{\mu_p}{D_p} p(E_v^{in} + E_v^{ext}) - \frac{\partial p}{\partial v} \Big|_{(\partial\Omega)_n} = 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{\mu_p}{D_p} p(E_v^{in} + E_v^{ext}) - \frac{\partial p}{\partial v} - 2\gamma_p p \Big|_{(\partial\Omega)_p} = \frac{J}{eD_p}, \\ \frac{\mu_n}{D_n} n(E_v^{in} + E_v^{ext}) + \frac{\partial n}{\partial v} \Big|_{(\partial\Omega)_p} = 0; \end{cases}$$

$$\frac{\mu_n}{D_n} n(E_v^{in} + E_v^{ext}) + \frac{\partial n}{\partial v} - 2\gamma_n n \Big|_{(\partial\Omega)_0} = 0,$$

$$\frac{\mu_p}{D_p} p(E_v^{in} + E_v^{ext}) - \frac{\partial p}{\partial v} - 2\gamma_p p \Big|_{(\partial\Omega)_0} = 0,$$

де $\gamma_n = \frac{\alpha_n}{2D_n}$, $\gamma_p = \frac{\alpha_p}{2D_p}$, $\alpha_{n,p}$ – швидкості поверхневої рекомбінації відповідно електронів і дірок; \vec{v} – вектор нормалі до межі області; $\vec{E}^{in} = -\nabla\varphi$ – внутрішнє електростатичне поле активної області.

Між інжекційними контактами прикладено різницю потенціалів U :

$$\varphi|_{(\partial\Omega)_n} = 0, \quad \varphi|_{(\partial\Omega)_p} = U. \quad (5)$$

У геометричному центрі області Ω_1 задано значення амплітуди коливань напруженості електричної компоненти стороннього поля, яке проникає в активну область:

$$\begin{aligned} E_{*x}(x, y, z) \Big|_{x=\frac{w}{2}, y=0, z=0} \\ = E_x^*(x, y, z) \Big|_{x=\frac{w}{2}, y=0, z=0} = E_0^{ext}. \end{aligned} \quad (6)$$

Після застосування процедури нормування ($\tilde{x} = \frac{x}{w}$ ($0 < \tilde{x} < 1$)), $\tilde{y} = \frac{y}{w}$, $\tilde{z} = \frac{z}{w}$, $\tilde{\varphi} = \frac{e\varphi}{k_B T}$, $\tilde{U} = \frac{eU}{k_B T}$, $\tilde{E}^{ext} = \frac{e\vec{E}^{ext}}{k_B T}$, $\tilde{n} = \frac{n}{N_i}$ ($0 \leq \tilde{n} \leq \frac{n_{max}}{N_i}$), $\tilde{p} = \frac{p}{N_i}$ ($0 \leq \tilde{p} \leq \frac{p_{max}}{N_i}$), де N_i – концентрація електронів у власному напівпровіднику, залежить від обраного матеріалу напівпровідника), рівняння системи (3) набувають такого вигляду:

$$\begin{cases} \Delta n - \nabla \cdot (n(\nabla \varphi - w\vec{E}^{ext})) - A_n n = B_n \frac{\partial n}{\partial t}, \\ \Delta p + \nabla \cdot (p(\nabla \varphi - w\vec{E}^{ext})) - A_p p = B_p \frac{\partial p}{\partial t}, \\ \mu \nabla \cdot (\nabla \varphi - w\vec{E}^{ext}) = -(p - n + N_I), \end{cases} \quad (7)$$

де $\mu = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 k_B T}{e^2 w^2 N_i}$ (малий параметр задачі, $\mu \sim 10^{-6} \dots 10^{-8}$),

$$A_n = \frac{w^2}{D_n \tau_n^*}, \quad A_p = \frac{w^2}{D_p \tau_p^*}, \quad B_n = \frac{w^2}{D_n}, \quad B_p = \frac{w^2}{D_p}.$$

Для спрощення запису рівнянь знак « \sim » у (7) і наступних викладках опущено.

Підстановка (1), (2) у (7) та виконання процедури виділення стаціонарних членів і компонент, що містять множники $e^{i\omega t}$, $e^{-i\omega t}$ (описують

коливання на частоті стороннього поля), дають можливість отримати такі системи рівнянь (за умови $N_l = 0$):

$$\begin{cases} \Delta n^{st} - \nabla \cdot (n^{st} \nabla \varphi) - A_n n^{st} = -\nabla \cdot \left(\frac{w}{4} (n_* E_x^* + n^* E_{*x}) \right), \\ \Delta p^{st} + \nabla \cdot (p^{st} \nabla \varphi) - A_p p^{st} = \nabla \cdot \left(\frac{w}{4} (p_* E_x^* + p^* E_{*x}) \right), \\ \mu \Delta \varphi = -(p^{st} - n^{st}), \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Delta n_* - \nabla \cdot (n_* \nabla \varphi) - A_n n_* - j\omega B_n n_* = -w \nabla \cdot (n^{st} E_{*x}), \\ \Delta p_* + \nabla \cdot (p_* \nabla \varphi) - A_p p_* - j\omega B_p p_* = w \nabla \cdot (p^{st} E_{*x}), \\ \mu w \nabla \cdot E_{*x} = (p_* - n_*), \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \Delta n^* - \nabla \cdot (n^* \nabla \varphi) - A_n n^* + j\omega B_n n^* = -w \nabla \cdot (n^{st} E_x^*), \\ \Delta p^* + \nabla \cdot (p^* \nabla \varphi) - A_p p^* + j\omega B_p p^* = w \nabla \cdot (p^{st} E_x^*), \\ \mu w \nabla \cdot E_x^* = (p^* - n^*). \end{cases} \quad (10)$$

Граничні умови (4)–(6) при цьому набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \left(-n^{st} \frac{\partial \varphi}{\partial v} + \frac{w}{4} (n_* E_v^* + n^* E_{*v}) \right) + \frac{\partial n^{st}}{\partial v} - 2\gamma_n n^{st} \Big|_{(\partial\Omega)_n} \\ = \frac{J}{eD_n} \frac{w}{N_i}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\left(-p^{st} \frac{\partial \varphi}{\partial v} + \frac{w}{4} (p_* E_v^* + p^* E_{*v}) \right) - \frac{\partial p^{st}}{\partial v} \Big|_{(\partial\Omega)_n} = 0;$$

$$\begin{aligned} \left(-p^{st} \frac{\partial \varphi}{\partial v} + \frac{w}{4} (p_* E_v^* + p^* E_{*v}) \right) - \frac{\partial p^{st}}{\partial v} - 2\gamma_p p^{st} \Big|_{(\partial\Omega)_p} \\ = \frac{J}{eD_p} \frac{w}{N_i}; \end{aligned}$$

$$\left(-n^{st} \frac{\partial \varphi}{\partial v} + \frac{w}{4} (n_* E_v^* + n^* E_{*v}) \right) + \frac{\partial n^{st}}{\partial v} \Big|_{(\partial\Omega)_p} = 0;$$

$$-n_* \frac{\partial \varphi}{\partial v} + \frac{\partial n_*}{\partial v} - 2\gamma_n w n_* + w n^{st} E_{*v} \Big|_{(\partial\Omega)_n} = 0;$$

$$-p_* \frac{\partial \varphi}{\partial v} - \frac{\partial p_*}{\partial v} + w p^{st} E_{*v} \Big|_{(\partial\Omega)_n} = 0; \quad (12)$$

$$-p^* \frac{\partial \varphi}{\partial v} - \frac{\partial p^*}{\partial v} - 2\gamma_p w p^* + w p^{st} E_{*v} \Big|_{(\partial\Omega)_p} = 0,$$

$$-n_* \frac{\partial \varphi}{\partial v} + \frac{\partial n_*}{\partial v} + w n^{st} E_{*v} \Big|_{(\partial\Omega)_p} = 0,$$

$$-n^* \frac{\partial \varphi}{\partial v} + \frac{\partial n^*}{\partial v} - 2\gamma_n w n^* + w n^{st} E_v^* \Big|_{(\partial\Omega)_n} = 0,$$

$$-p^* \frac{\partial \varphi}{\partial v} - \frac{\partial p^*}{\partial v} + w p^{st} E_v^* \Big|_{(\partial\Omega)_n} = 0; \quad (13)$$

$$-p^* \frac{\partial \varphi}{\partial v} - \frac{\partial p^*}{\partial v} - 2\gamma_p w p^* + w p^{st} E_v^* \Big|_{(\partial\Omega)_p} = 0,$$

$$-n^* \frac{\partial \varphi}{\partial v} + \frac{\partial n^*}{\partial v} + w n^{st} E_v^* \Big|_{(\partial\Omega)_p} = 0;$$

$$-n^{st} \frac{\partial \varphi}{\partial v} + \frac{\partial n^{st}}{\partial v} - 2\gamma_n w n^{st} \Big|_{(\partial\Omega)_0} = 0,$$

$$-p^{st} \frac{\partial \varphi}{\partial v} - \frac{\partial p^{st}}{\partial v} - 2\gamma_p w p^{st} \Big|_{(\partial\Omega)_0} = 0;$$

$$-n_* \frac{\partial \varphi}{\partial v} + \frac{\partial n_*}{\partial v} - 2\gamma_n w n_* \Big|_{(\partial\Omega)_0} = 0,$$

$$-p_* \frac{\partial \varphi}{\partial v} - \frac{\partial p_*}{\partial v} - 2\gamma_p w p_* \Big|_{(\partial\Omega)_0} = 0;$$

$$-n^* \frac{\partial \varphi}{\partial v} + \frac{\partial n^*}{\partial v} - 2\gamma_n w n^* \Big|_{(\partial\Omega)_0} = 0,$$

$$-p^* \frac{\partial \varphi}{\partial v} - \frac{\partial p^*}{\partial v} - 2\gamma_p w p^* \Big|_{(\partial\Omega)_0} = 0;$$

$$\varphi \Big|_{(\partial\Omega)_n} = 0, \quad \varphi \Big|_{(\partial\Omega)_p} = U, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial v} \Big|_{(\partial\Omega)_0} = 0,$$

$$E_{*x}(x, y, z) \Big|_{x=\frac{w}{2}, y=0, z=0} = E_x^*(x, y, z) \Big|_{x=\frac{w}{2}, y=0, z=0} = \frac{1}{\sqrt{\mu}} E_{n0}^{ext} \quad (14)$$

(нормоване задане значення амплітуди напруженості електричної компоненти електромагнітної хвилі пропонуємо подати у вигляді (14)).

Оскільки відстань між інжектуючими контактами значно менша від інших лінійних розмірів активної області діода ($L \gg w$), то доцільно розглядати одновимірний випадок поставленої задачі.

Метод прирежових поправок і декомпозиція задачі

Поставлена задача містить природним чином сформований малий параметр ϵ є сингулярно збуреною. Беручи до уваги те, що на структуру її розв'язку переважно впливають умови на контактних ділянках $(\partial\Omega)_n$ та $(\partial\Omega)_p$, через які здійснюється наповнення i -області носіями заряду, пропонуємо шукати розв'язок поставленої задачі аналогічно до [7–17] у вигляді таких асимптотичних рядів:

$$\begin{pmatrix} \varphi \\ n^{st} \\ p^{st} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi(x, \mu) \\ n(x, \mu) \\ p(x, \mu) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_{(m)}(x, \mu) \\ N_{(m)}(x, \mu) \\ P_{(m)}(x, \mu) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \underline{\Phi}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu) \\ \underline{N}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu) \\ \underline{P}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \overline{\Phi}_{(m)}(\overline{\xi}, \mu) \\ \overline{N}_{(m)}(\overline{\xi}, \mu) \\ \overline{P}_{(m)}(\overline{\xi}, \mu) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{\varphi(m)}(x, \mu) \\ R_{n(m)}(x, \mu) \\ R_{p(m)}(x, \mu) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \varphi_i(x) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i n_i(x) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i p_i(x) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \Phi_i(\underline{\xi}) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \underline{N}_i(\underline{\xi}) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \underline{P}_i(\underline{\xi}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \overline{\Phi}_i(\overline{\xi}) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \overline{N}_i(\overline{\xi}) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \overline{P}_i(\overline{\xi}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{\varphi(m)}(x, \mu) \\ R_{n(m)}(x, \mu) \\ R_{p(m)}(x, \mu) \end{pmatrix}; \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} E_{*x} \\ E_x^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_*(x, \mu) \\ E^*(x, \mu) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{E}_*(x, \mu) \\ \mathcal{E}^*(x, \mu) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \underline{E}_*(\underline{\xi}, \mu) \\ \underline{E}^*(\underline{\xi}, \mu) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \overline{E}_*(\overline{\xi}, \mu) \\ \overline{E}^*(\overline{\xi}, \mu) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{E_*(m)}(x, \mu) \\ R_{E^*(m)}(x, \mu) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i E_{*i}(x) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i E_i^*(x) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m \sqrt{\mu}^i \underline{E}_{*i}(\underline{\xi}) \\ \sum_{i=1}^m \sqrt{\mu}^i \underline{E}_i^*(\underline{\xi}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m \sqrt{\mu}^i \overline{E}_{*i}(\overline{\xi}) \\ \sum_{i=1}^m \sqrt{\mu}^i \overline{E}_i^*(\overline{\xi}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{E_*(m)}(x, \mu) \\ R_{E^*(m)}(x, \mu) \end{pmatrix}; \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} n_* \\ n^* \\ p_* \\ p^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_*(x, \mu) \\ n^*(x, \mu) \\ p_*(x, \mu) \\ p^*(x, \mu) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_{*(m)}(x, \mu) \\ N_{*(m)}^*(x, \mu) \\ P_{*(m)}(x, \mu) \\ P_{*(m)}^*(x, \mu) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \underline{N}_{*(m)}(\underline{\xi}, \mu) \\ \underline{N}_{*(m)}^*(\underline{\xi}, \mu) \\ \underline{P}_{*(m)}(\underline{\xi}, \mu) \\ \underline{P}_{*(m)}^*(\underline{\xi}, \mu) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \overline{N}_{*(m)}(\overline{\xi}, \mu) \\ \overline{N}_{*(m)}^*(\overline{\xi}, \mu) \\ \overline{P}_{*(m)}(\overline{\xi}, \mu) \\ \overline{P}_{*(m)}^*(\overline{\xi}, \mu) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{n_*(m)}(x, \mu) \\ R_{n^*(m)}(x, \mu) \\ R_{p_*(m)}(x, \mu) \\ R_{p^*(m)}(x, \mu) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i N_{*i}(x) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i N_{*i}^*(x) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i P_{*i}(x) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i P_{*i}^*(x) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \underline{N}_{*i}(\underline{\xi}) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \underline{N}_{*i}^*(\underline{\xi}) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \underline{P}_{*i}(\underline{\xi}) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \underline{P}_{*i}^*(\underline{\xi}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \overline{N}_{*i}(\overline{\xi}) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \overline{N}_{*i}^*(\overline{\xi}) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \overline{P}_{*i}(\overline{\xi}) \\ \sum_{i=0}^m \sqrt{\mu}^i \overline{P}_{*i}^*(\overline{\xi}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{n_*(m)}(x, \mu) \\ R_{n^*(m)}(x, \mu) \\ R_{p_*(m)}(x, \mu) \\ R_{p^*(m)}(x, \mu) \end{pmatrix},$$

де $\Phi_{(m)}(x, \mu)$, $N_{(m)}(x, \mu)$, $P_{(m)}(x, \mu)$, $\mathcal{E}_*(x, \mu)$, $\mathcal{E}^*(x, \mu)$, $N_{*(m)}(x, \mu)$, $N_{*(m)}^*(x, \mu)$, $P_{*(m)}(x, \mu)$, $P_{*(m)}^*(x, \mu)$ – регулярні частини асимптотик; $\underline{\Phi}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu)$, $\underline{N}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu)$, $\underline{P}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu)$, $\overline{\Phi}_{(m)}(\overline{\xi}, \mu)$, $\overline{N}_{(m)}(\overline{\xi}, \mu)$, $\overline{P}_{(m)}(\overline{\xi}, \mu)$, $\underline{E}_*(\underline{\xi}, \mu)$, $\underline{E}^*(\underline{\xi}, \mu)$, $\overline{E}_*(\overline{\xi}, \mu)$, $\overline{E}^*(\overline{\xi}, \mu)$, $\underline{N}_{*(m)}(\underline{\xi}, \mu)$, $\underline{N}_{*(m)}^*(\underline{\xi}, \mu)$, $\underline{P}_{*(m)}(\underline{\xi}, \mu)$, $\underline{P}_{*(m)}^*(\underline{\xi}, \mu)$, $\overline{N}_{*(m)}(\overline{\xi}, \mu)$, $\overline{N}_{*(m)}^*(\overline{\xi}, \mu)$, $\overline{P}_{*(m)}(\overline{\xi}, \mu)$, $\overline{P}_{*(m)}^*(\overline{\xi}, \mu)$ – прирежові поправки асимптотик, відповідно, в околах точок $x = 0$ та $x = 1$ ($\underline{\xi} = \frac{x}{\sqrt{\mu}}$, $\overline{\xi} = \frac{1-x}{\sqrt{\mu}}$ – регуляризуючі розтяги); $R_{\varphi(m)}(x, \mu)$, $R_{n(m)}(x, \mu)$, $R_{p(m)}(x, \mu)$, $R_{E_*(m)}(x, \mu)$, $R_{E^*(m)}(x, \mu)$, $R_{n_*(m)}(x, \mu)$, $R_{n^*(m)}(x, \mu)$, $R_{p_*(m)}(x, \mu)$, $R_{p^*(m)}(x, \mu)$ – залишкові члени.

Після підстановки (15)–(17) у рівняння і граничні умови (8)–(14), що записані у одновимірному випадку, та групування відповідних доданків у степеневих рядах для кожної із незалежних змінних $x, \underline{\xi}, \overline{\xi}$ отримуємо такі задачі

для пошуку головних членів регулярних частин асимптотик (відповідно, для стаціонарних та швидкозмінних компонент):

$$\begin{cases} n_0'' - (n_0 \varphi_0')' - A_n n_0 = -\left(\frac{w}{4}(n_{*0} E_0^* + n_0^* E_{*0})\right)', \\ p_0'' + (p_0 \varphi_0')' - A_p p_0 = \left(\frac{w}{4}(p_{*0} E_0^* + p_0^* E_{*0})\right)', \\ n_0 = p_0, \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} n_0' - n_0 \varphi_0' - 2\gamma_n w n_0 + \frac{w}{4}(n_{*0} E_0^* + n_0^* E_{*0}) \Big|_{x=0} &= \frac{wJ}{eD_n N_i}, \\ -p_0' - p_0 \varphi_0' + \frac{w}{4}(p_{*0} E_0^* + p_0^* E_{*0}) \Big|_{x=0} &= 0; \\ -p_0' - p_0 \varphi_0' - 2\gamma_p w p_0 + \frac{w}{4}(p_{*0} E_0^* + p_0^* E_{*0}) \Big|_{x=1} &= \frac{wJ}{eD_p N_i}, \\ n_0' - n_0 \varphi_0' + \frac{w}{4}(n_{*0} E_0^* + n_0^* E_{*0}) \Big|_{x=1} &= 0. \end{aligned}$$

$$\begin{cases} n_{*0}'' - (n_{*0} \varphi_0')' - A_n n_{*0} - j\omega B_n n_{*0} = -w(n_0 E_{*0})', \\ p_{*0}'' + (p_{*0} \varphi_0')' - A_p p_{*0} - j\omega B_p p_{*0} = w(p_0 E_{*0})', \\ p_{*0} = n_{*0}, \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} n_{*0}' - n_{*0} \varphi_0' - 2\gamma_n w n_{*0} + w n_0 E_{*0} \Big|_{x=0} &= 0, \\ -p_{*0}' - p_{*0} \varphi_0' + w p_0 E_{*0} \Big|_{x=0} &= 0; \\ -p_{*0}' - p_{*0} \varphi_0' - 2\gamma_p w p_{*0} + w p_0 E_{*0} \Big|_{x=1} &= 0, \\ n_{*0}' - n_{*0} \varphi_0' + w n_0 E_{*0} \Big|_{x=1} &= 0. \end{aligned}$$

Аналогічним чином отримуємо задачі для пошуку головних членів примезових поправок (стаціонарних та швидкозмінних). Отримуємо:

$$\frac{\partial^2 \Phi_0}{\partial \xi^2} = -(\underline{P}_0 - \underline{N}_0);$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \underline{N}_0}{\partial \xi^2} - \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\underline{N}_0 \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} \right) - n_0(0) \frac{\partial^2 \Phi_0}{\partial \xi^2} \\ = -\frac{w}{4} \left(n_{*0}(0) \frac{\partial \underline{E}_{*-1}}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\underline{N}_{*0} \underline{E}_{*-1}) \right) \end{aligned}$$

$$+ n_0^*(0) \frac{\partial \underline{E}_{*-1}}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\underline{N}_0^* \underline{E}_{*-1});$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \underline{P}_0}{\partial \xi^2} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\underline{P}_0 \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} \right) + p_0(0) \frac{\partial^2 \Phi_0}{\partial \xi^2} \\ = \frac{w}{4} \left(p_{*0}(0) \frac{\partial \underline{E}_{*-1}}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\underline{P}_{*0} \underline{E}_{*-1}) \right) \\ + p_0^*(0) \frac{\partial \underline{E}_{*-1}}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\underline{P}_0^* \underline{E}_{*-1}). \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \underline{N}_0}{\partial \xi} - \underline{N}_0 \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} - n_0(0) \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} \\ = -\frac{w}{4} \left((n_{*0}(0) + \underline{N}_{*0}) \underline{E}_{*-1} + (n_0^*(0) + \underline{N}_0^*) \underline{E}_{*-1} \right), \\ \lim_{\xi \rightarrow \infty} \underline{N}_0(\xi) = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \underline{P}_0}{\partial \xi} - \underline{P}_0 \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} - p_0(0) \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} \\ = -\frac{w}{4} \left((p_{*0}(0) + \underline{P}_{*0}) \underline{E}_{*-1} + (p_0^*(0) + \underline{P}_0^*) \underline{E}_{*-1} \right), \\ \lim_{\xi \rightarrow \infty} \underline{P}_0(\xi) = 0; \end{aligned}$$

$\lim_{\xi \rightarrow \infty} \Phi_0(\xi) = 0$, $\varphi_0 + \Phi_0 \Big|_{\xi=0} = 0$ (зауважимо, що аналогічна умова на межі $\bar{\xi} = 0$ має вигляд $\varphi_0 + \bar{\Phi}_0 \Big|_{\bar{\xi}=0} = U$).

$$w \frac{\partial \underline{E}_{*-1}}{\partial \xi} = \underline{P}_{*0} - \underline{N}_{*0}; \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \underline{N}_{*0}}{\partial \xi^2} - \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\underline{N}_{*0} \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} \right) - n_{*0}(0) \frac{\partial^2 \Phi_0}{\partial \xi^2} \\ = -w \left(n_0(0) \frac{\partial \underline{E}_{*-1}}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\underline{N}_0 \underline{E}_{*-1}) \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \underline{P}_{*0}}{\partial \xi^2} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\underline{P}_{*0} \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} \right) + p_{*0}(0) \frac{\partial^2 \Phi_0}{\partial \xi^2} \\ = w \left(p_0(0) \frac{\partial \underline{E}_{*-1}}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\underline{P}_0 \underline{E}_{*-1}) \right). \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_{*0}}{\partial \xi} - N_{*0} \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} - n_{*0}(0) \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} &= 0, \\ + w(n_0(0) \underline{E}_{*1} + N_0 \underline{E}_{*1}) \Big|_{\xi=0} & \\ \lim_{\xi \rightarrow \infty} N_{*0}(\xi) &= 0; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_{*0}}{\partial \xi} + P_{*0} \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} + p_{*0}(0) \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} &= 0, \\ -w(p_0(0) \underline{E}_{*1} + P_0 \underline{E}_{*1}) \Big|_{\xi=0} & \\ \lim_{\xi \rightarrow \infty} P_{*0}(\xi) = 0, \quad \lim_{\xi \rightarrow \infty} \underline{E}_{*1}(\xi) &= E_{n0}^{ext}. \end{aligned} \right\}$$

Розглянемо постановки задач для пошуку перших членів асимптотик. Відповідні регулярні члени асимптотик отримуємо у результаті розв'язання таких задач:

$$\left\{ \begin{aligned} n_1'' - (n_0 \Phi_1')' - (n_1 \Phi_0')' - A_n n_1 & \\ = - \left(\frac{w}{4} (n_{*0} E_1^* + n_{*1} E_0^* + n_0^* E_{*1} + n_1^* E_{*0}) \right)' & \\ p_1'' + (p_0 \Phi_1')' + (p_1 \Phi_0')' - A_p p_1 & \\ = \left(\frac{w}{4} (p_{*0} E_1^* + p_{*1} E_0^* + p_0^* E_{*1} + p_1^* E_{*0}) \right)' & \\ n_1 = p_1, & \end{aligned} \right. \quad (22)$$

$$\begin{aligned} n_1' - (n_0 \Phi_1') - (n_1 \Phi_0') - 2\gamma_n w n_1 \Big|_{x=0} & \\ = - \frac{w}{4} (n_{*0} E_1^* + n_{*1} E_0^* + n_0^* E_{*1} + n_1^* E_{*0}); & \\ p_1' + (p_0 \Phi_1') + (p_1 \Phi_0') \Big|_{x=0} & \\ = \frac{w}{4} (p_{*0} E_1^* + p_{*1} E_0^* + p_0^* E_{*1} + p_1^* E_{*0}); & \\ n_1' - (n_0 \Phi_1') - (n_1 \Phi_0') \Big|_{x=1} & \\ = - \frac{w}{4} (n_{*0} E_1^* + n_{*1} E_0^* + n_0^* E_{*1} + n_1^* E_{*0}); & \\ p_1' + (p_0 \Phi_1') + (p_1 \Phi_0') + 2\gamma_p w p_1 \Big|_{x=1} & \\ = \frac{w}{4} (p_{*0} E_1^* + p_{*1} E_0^* + p_0^* E_{*1} + p_1^* E_{*0}). & \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{aligned} n_1'' - (n_{*0} \Phi_1')' - (n_{*1} \Phi_0')' - (A_n + j\omega B_n) n_{*1} & \\ = -w(n_0 E_{*1} + n_1 E_{*0})' & \\ p_1'' + (p_{*0} \Phi_1')' + (p_{*1} \Phi_0')' - (A_p + j\omega B_p) p_{*1} & \\ = w(p_0 E_{*1} + p_1 E_{*0})' & \\ p_{*1} = n_{*1}, & \end{aligned} \right. \quad (23)$$

$$\begin{aligned} n_1' - (n_{*0} \Phi_1') - (n_{*1} \Phi_0') - 2\gamma_n w n_{*1} + w(n_0 E_{*1} + n_1 E_{*0}) \Big|_{x=0} &= 0; \\ p_1' + (p_{*0} \Phi_1') + (p_{*1} \Phi_0') - w(p_0 E_{*1} + p_1 E_{*0}) \Big|_{x=0} &= 0; \\ n_1' - (n_{*0} \Phi_1') - (n_{*1} \Phi_0') + w(n_0 E_{*1} + n_1 E_{*0}) \Big|_{x=1} &= 0; \\ p_1' + (p_{*0} \Phi_1') + (p_{*1} \Phi_0') + 2\gamma_p w p_{*1} - w(p_0 E_{*1} + p_1 E_{*0}) \Big|_{x=1} &= 0. \end{aligned}$$

Задачі для пошуку відповідних примезових функцій мають такий вигляд (постановки задач записані на межі $x = 0$):

$$\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial \xi^2} = -(\underline{P}_1 - \underline{N}_1); \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 N_1}{\partial \xi^2} - \frac{\partial}{\partial \xi} \left(N_0 \frac{\partial \Phi_1}{\partial \xi} \right) - \frac{\partial}{\partial \xi} \left(N_1 \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} \right) - n_0(0) \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial \xi^2} & \\ = \frac{dn_0}{dx} \Big|_{x=0} \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} + n_1(0) \frac{\partial^2 \Phi_0}{\partial \xi^2} + \frac{d\varphi_0}{dx} \Big|_{x=0} \frac{\partial N_0}{\partial \xi} & \\ - \frac{w}{4} \left(n_0' \Big|_{x=0} \underline{E}_{*1} + n_{*0}(0) \frac{\partial \underline{E}_0^*}{\partial \xi} + n_{*1}(0) \frac{\partial \underline{E}_{*1}^*}{\partial \xi} \right. & \\ \left. + \frac{\partial N_{*0}}{\partial \xi} E_0^* + \frac{\partial}{\partial \xi} (N_{*0} \underline{E}_0^*) + \frac{\partial}{\partial \xi} (N_{*1} \underline{E}_{*1}^*) \right) & \\ - \frac{w}{4} \left(n_0^* \Big|_{x=0} \underline{E}_{*1} + n_0(0) \frac{\partial \underline{E}_{*0}}{\partial \xi} + n_1^*(0) \frac{\partial \underline{E}_{*1}}{\partial \xi} \right. & \\ \left. + \frac{\partial N_0}{\partial \xi} E_{*0} + \frac{\partial}{\partial \xi} (N_0 \underline{E}_{*0}) + \frac{\partial}{\partial \xi} (N_1 \underline{E}_{*1}) \right); & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 P_1}{\partial \xi^2} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(P_0 \frac{\partial \Phi_1}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(P_1 \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} \right) + p_0(0) \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial \xi^2} & \\ = - \frac{dp_0}{dx} \Big|_{x=0} \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} - p_1(0) \frac{\partial^2 \Phi_0}{\partial \xi^2} - \frac{d\varphi_0}{dx} \Big|_{x=0} \frac{\partial P_0}{\partial \xi} & \\ + \frac{w}{4} \left(p_0' \Big|_{x=0} \underline{E}_{*1} + p_{*0}(0) \frac{\partial \underline{E}_0^*}{\partial \xi} + p_{*1}(0) \frac{\partial \underline{E}_{*1}^*}{\partial \xi} \right. & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\partial \underline{P}_{*0}}{\partial \underline{\xi}} \underline{E}_0^* + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} (\underline{P}_{*0} \underline{E}_0^*) + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} (\underline{P}_{*1} \underline{E}_{*1}^*) \\
 & + \frac{w}{4} \left(p_0^* \Big|_{x=0} \underline{E}_{*1} + p_0^* (0) \frac{\partial \underline{E}_{*0}}{\partial \underline{\xi}} + p_1^* (0) \frac{\partial \underline{E}_{*1}}{\partial \underline{\xi}} \right. \\
 & \left. + \frac{\partial \underline{P}_0^*}{\partial \underline{\xi}} \underline{E}_{*0} + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} (\underline{P}_0^* \underline{E}_{*0}) + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} (\underline{P}_1^* \underline{E}_{*1}) \right) \\
 & \left. \frac{\partial \underline{N}_1}{\partial \underline{\xi}} - \underline{N}_0 \frac{\partial \underline{\Phi}_1}{\partial \underline{\xi}} - \underline{N}_1 \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} - n_0 (0) \frac{\partial \underline{\Phi}_1}{\partial \underline{\xi}} \right|_{\underline{\xi}=0} \\
 & - n_1 (0) \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} - \underline{N}_0 \varphi_0 \Big|_{x=0} - 2\gamma_n w \underline{N}_0 \Big|_{\underline{\xi}=0} \\
 = & - \frac{w}{4} (n_{*0} (0) \underline{E}_0^* + n_{*1} (0) \underline{E}_{*1}^* + \underline{N}_{*0} \underline{E}_0^* + \underline{N}_{*0} \underline{E}_0^* + \underline{N}_{*1} \underline{E}_{*1}^*) \\
 & - \frac{w}{4} (n_0^* (0) \underline{E}_{*0} + n_1^* (0) \underline{E}_{*1} + \underline{N}_0^* \underline{E}_{*0} + \underline{N}_0^* \underline{E}_{*0} + \underline{N}_1^* \underline{E}_{*1}),
 \end{aligned}$$

$$\lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} \underline{N}_1 (\underline{\xi}) = 0;$$

$$\begin{aligned}
 & \left. \frac{\partial \underline{P}_1}{\partial \underline{\xi}} + \underline{P}_0 \frac{\partial \underline{\Phi}_1}{\partial \underline{\xi}} + \underline{P}_1 \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} + p_0 (0) \frac{\partial \underline{\Phi}_1}{\partial \underline{\xi}} \right|_{\underline{\xi}=0} \\
 & + p_1 (0) \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} + \underline{P}_0 \varphi_0 \Big|_{x=0} \Big|_{\underline{\xi}=0} \\
 = & \frac{w}{4} (p_{*0} (0) \underline{E}_0^* + p_{*1} (0) \underline{E}_{*1}^* + \underline{P}_{*0} \underline{E}_0^* + \underline{P}_{*0} \underline{E}_0^* + \underline{P}_{*1} \underline{E}_{*1}^*) \\
 & + \frac{w}{4} (p_0^* (0) \underline{E}_{*0} + p_1^* (0) \underline{E}_{*1} + \underline{P}_0^* \underline{E}_{*0} \\
 & + \underline{P}_0^* \underline{E}_{*0} + \underline{P}_1^* \underline{E}_{*1}), \quad \lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} \underline{P}_1 (\underline{\xi}) = 0;
 \end{aligned}$$

$$\varphi_1 + \underline{\Phi}_1 \Big|_{\underline{\xi}=0} = 0 \quad \left(\varphi_1 + \overline{\Phi}_1 \Big|_{\underline{\xi}=0} = 0 \right), \quad \lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} \underline{\Phi}_1 (\underline{\xi}) = 0.$$

$$w \frac{\partial \underline{E}_{*0}}{\partial \underline{\xi}} = \underline{P}_{*1} - \underline{N}_{*1}; \quad (25)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial^2 \underline{N}_{*1}}{\partial \underline{\xi}^2} - \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} \left(\underline{N}_{*0} \frac{\partial \underline{\Phi}_1}{\partial \underline{\xi}} \right) - \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} \left(\underline{N}_{*1} \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} \right) - n_{*0} (0) \frac{\partial^2 \underline{\Phi}_1}{\partial \underline{\xi}^2} \\
 & = \frac{dn_{*0}}{dx} \Big|_{x=0} \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} + n_{*1} (0) \frac{\partial^2 \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}^2} + \frac{d\varphi_0}{dx} \Big|_{x=0} \frac{\partial \underline{N}_{*0}}{\partial \underline{\xi}} \\
 & - w \left(n_0' \Big|_{x=0} \underline{E}_{*1} + n_0 (0) \frac{\partial \underline{E}_{*0}}{\partial \underline{\xi}} + n_1 (0) \frac{\partial \underline{E}_{*1}}{\partial \underline{\xi}} \right. \\
 & \left. + \frac{\partial \underline{N}_0}{\partial \underline{\xi}} \underline{E}_{*0} + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} (\underline{N}_0 \underline{E}_{*0}) + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} (\underline{N}_1 \underline{E}_{*1}) \right);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial^2 \underline{P}_{*1}}{\partial \underline{\xi}^2} + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} \left(\underline{P}_{*0} \frac{\partial \underline{\Phi}_1}{\partial \underline{\xi}} \right) + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} \left(\underline{P}_{*1} \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} \right) + p_{*0} (0) \frac{\partial^2 \underline{\Phi}_1}{\partial \underline{\xi}^2} \\
 & = - \frac{dp_{*0}}{dx} \Big|_{x=0} \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} - p_{*1} (0) \frac{\partial^2 \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}^2} - \frac{d\varphi_0}{dx} \Big|_{x=0} \frac{\partial \underline{P}_{*0}}{\partial \underline{\xi}} \\
 & + w \left(p_0' \Big|_{x=0} \underline{E}_{*1} + p_0 (0) \frac{\partial \underline{E}_{*0}}{\partial \underline{\xi}} + p_1 (0) \frac{\partial \underline{E}_{*1}}{\partial \underline{\xi}} \right. \\
 & \left. + \frac{\partial \underline{P}_0}{\partial \underline{\xi}} \underline{E}_{*0} + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} (\underline{P}_0 \underline{E}_{*0}) + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} (\underline{P}_1 \underline{E}_{*1}) \right) \\
 & \left. \frac{\partial \underline{N}_{*1}}{\partial \underline{\xi}} - \underline{N}_{*0} \frac{\partial \underline{\Phi}_1}{\partial \underline{\xi}} - \underline{N}_{*1} \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} - n_{*0} (0) \frac{\partial \underline{\Phi}_1}{\partial \underline{\xi}} \right|_{\underline{\xi}=0} \\
 & - n_{*1} (0) \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} - \underline{N}_{*0} \varphi_0 \Big|_{x=0} - 2\gamma_n w \underline{N}_{*0} \Big|_{\underline{\xi}=0} \\
 = & - w (n_0 (0) \underline{E}_{*0} + n_1 (0) \underline{E}_{*1} + \underline{N}_0 \underline{E}_{*0} + \underline{N}_0 \underline{E}_{*0} + \underline{N}_1 \underline{E}_{*1}),
 \end{aligned}$$

$$\lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} \underline{N}_{*1} (\underline{\xi}) = 0;$$

$$\begin{aligned}
 & \left. \frac{\partial \underline{P}_{*1}}{\partial \underline{\xi}} + \underline{P}_{*0} \frac{\partial \underline{\Phi}_1}{\partial \underline{\xi}} + \underline{P}_{*1} \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} + p_{*0} (0) \frac{\partial \underline{\Phi}_1}{\partial \underline{\xi}} \right|_{\underline{\xi}=0} \\
 & + p_{*1} (0) \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} + \underline{P}_{*0} \varphi_0 \Big|_{x=0} \Big|_{\underline{\xi}=0} \\
 = & w (p_0 (0) \underline{E}_{*0} + p_1 (0) \underline{E}_{*1} + \underline{P}_0 \underline{E}_{*0} + \underline{P}_0 \underline{E}_{*0} + \underline{P}_1 \underline{E}_{*1}), \\
 & \lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} \underline{P}_{*1} (\underline{\xi}) = 0; \\
 & \underline{E}_{*0} (\underline{\xi}) \Big|_{\underline{\xi}=0} = 0, \quad \lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} \underline{E}_{*0} (\underline{\xi}) = 0.
 \end{aligned}$$

Зауважимо, що постановки задач для пошуку комплексно спряжених амплітуд аналогічні постановкам задач (19), (21), (23), (25) для пошуку комплексних амплітуд коливальних процесів. Також алогічно до (20)–(21), (24)–(25) здійснюємо постановку задач для пошуку членів примежових поправок в околі точки $x = 1$.

Постановки задач для пошуку других і наступних членів асимптотик мають вигляд аналогічний до (22)–(25).

Алгоритм синтезу асимптотик

Задача (18) для пошуку регулярних нульових членів асимптотик за допомогою виключення із системи рівнянь функції потенціалу та з урахуванням рівностей $p_{*0} = n_{*0}$, $p_0^* = n_0^*$

((19) і аналогічно для комплексно спряжених) зводиться до такого вигляду:

$$n_0'' - \frac{(A_n + A_p)}{2} n_0 = 0; \quad (26)$$

$$n_0' - \gamma_n w n_0 \Big|_{x=0} = \frac{wJ}{2eD_n N_i}, \quad n_0' + \gamma_p w n_0 \Big|_{x=1} = -\frac{wJ}{2eD_p N_i}.$$

Зауважимо, що постановка задачі (18) є подібною до класичної постановки задачі амбіполярної дифузії [1, 3]. Відмінності – рівняння неперервності струмів у постановці (18) неоднорідні; умова строгої рівності концентрацій на відміну від наближеної рівності у класичній постановці. На цьому рівні аналізу ефект впливу зовнішнього височастотного електричного поля, який характеризується появою додаткового потоку заряджених частинок вглиб активної області, не проявляється – у модельній задачі відсутні елементи, що характеризують зазначений ефект і залежать від характеристик зовнішнього поля (величини напруженості поля та частоти). Причина цього – рівність концентрацій носіїв заряду у досліджуваній області (електронейтральність електронно-діркової плазми).

Задача (19) для пошуку нульових членів регулярної частини асимптотики швидкозмінних компонент концентрацій носіїв заряду приводиться до вигляду (27):

$$n_{*0}'' - \left[\frac{(A_n + A_p)}{2} + j\omega \frac{(B_n + B_p)}{2} \right] n_{*0} = 0; \quad (27)$$

$$n_{*0}' - \gamma_n w n_{*0} \Big|_{x=0} = 0, \quad n_{*0}' + \gamma_p w n_{*0} \Big|_{x=1} = 0.$$

Ця крайова задача є однотипною із (26).

Задачу для пошуку основних членів примежових поправок (21) на межі $x = 0$ перепишемо з урахуванням даних про те, що примежові поправки за концентрацією дірок відсутні ($\underline{P}_0 = \underline{P}_{*0} = \underline{P}_0^* = 0$) [13, 14] (на границі $x = 1$ викладки аналогічні за умови, що тут відсутні примежові поправки за концентрацією електронів). Отримуємо:

$$w \frac{\partial \underline{E}_{*,-1}}{\partial \underline{\xi}} = -\underline{N}_{*0}; \quad (28)$$

$$\frac{\partial \underline{N}_{*0}}{\partial \underline{\xi}} - \underline{N}_{*0} \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} = -w(\underline{N}_0 \underline{E}_{*,-1});$$

$$\frac{\partial \underline{N}_{*0}}{\partial \underline{\xi}} - \underline{N}_{*0} \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} + w \underline{N}_0 \underline{E}_{*,-1} \Big|_{\underline{\xi}=0} = 0, \quad \underline{E}_{*,-1} \Big|_{\underline{\xi}=0} = 0$$

(записано з фізичних міркувань), за додаткових умов $\lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} \underline{N}_{*0}(\underline{\xi}) = 0$, $\lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} \underline{E}_{*,-1}(\underline{\xi}) = E_{n0}^{ext}$.

Задачу (20) переписуємо з урахуванням результатів розв'язання (26), (27). Також скористаємось замінами $\underline{N}_0 = \underline{N}_0 + n_0(0)$, $\underline{P}_0 = \underline{P}_0 + p_0(0)$ аналогічно до [13, 14]. Отримуємо систему рівнянь такого вигляду:

$$\frac{\partial^2 \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}^2} = -(\underline{P}_0 - \underline{N}_0); \quad (29)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \underline{N}_0}{\partial \underline{\xi}^2} - \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} \left(\underline{N}_0 \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} \right) \\ &= -\frac{w}{4} \left(\frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} (\underline{N}_{*0} \underline{E}_{*,-1}^*) + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} (\underline{N}_0^* \underline{E}_{*,-1}) \right); \\ & \frac{\partial^2 \underline{P}_0}{\partial \underline{\xi}^2} + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} \left(\underline{P}_0 \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} \right) \\ &= \frac{w}{4} \left(\frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} (\underline{P}_{*0} \underline{E}_{*,-1}^*) + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} (\underline{P}_0^* \underline{E}_{*,-1}) \right) \end{aligned}$$

з такими граничними умовами:

$$\frac{\partial \underline{N}_0}{\partial \underline{\xi}} - \underline{N}_0 \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} \Big|_{\underline{\xi}=0} = -\frac{w}{4} (\underline{N}_{*0} \underline{E}_{*,-1}^* + \underline{N}_0^* \underline{E}_{*,-1});$$

$$\lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} \underline{N}_0(\underline{\xi}) = n_0(0);$$

$$\frac{\partial \underline{P}_0}{\partial \underline{\xi}} + \underline{P}_0 \frac{\partial \underline{\Phi}_0}{\partial \underline{\xi}} \Big|_{\underline{\xi}=0} = \frac{w}{4} (\underline{P}_{*0} \underline{E}_{*,-1}^* + \underline{P}_0^* \underline{E}_{*,-1});$$

$$\lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} \underline{P}_0(\underline{\xi}) = p_0(0),$$

$$\lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} \frac{\partial \underline{\Phi}_0(\underline{\xi})}{\partial \underline{\xi}} = \lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} \frac{\partial \bar{\Phi}_0(\bar{\xi})}{\partial \bar{\xi}} = E^\infty(U) \quad - \quad \text{стала,}$$

що має зміст напруженості електростатичного поля у глибині досліджуваної області; $\Phi_0 + \underline{\Phi}_0 \Big|_{\underline{\xi}=0} = 0$ (зауважимо, що аналогічна умова на межі $\bar{\xi} = 0$ має вигляд $\Phi_0 + \bar{\Phi}_0 \Big|_{\bar{\xi}=0} = U$).

Значення сталої $E^\infty(U)$ визначають з умови $\int_0^\infty \underline{\Pi}_0(\underline{\xi}) d\underline{\xi} + \int_0^\infty \bar{\Pi}_0(\bar{\xi}) d\bar{\xi} = U$.

Сумісне розв'язання крайових задач (28), відповідної комплексно спряженої до (28) та (29) під час використання заміни $\frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} = -\Pi_0$ приводить до постановки такої задачі:

$$\frac{\partial^2 \underline{E}_{*1}}{\partial \xi^2} + \Pi_0 \frac{\partial \underline{E}_{*1}}{\partial \xi} - \underline{N}_0 \underline{E}_{*1} = 0; \quad (30)$$

$$\frac{\partial^2 \underline{E}_{-1}^*}{\partial \xi^2} + \Pi_0 \frac{\partial \underline{E}_{-1}^*}{\partial \xi} - \underline{N}_0 \underline{E}_{-1}^* = 0,$$

$$\frac{\partial \Pi_0}{\partial \xi} = -\underline{N}_0;$$

$$\frac{\partial^2 \underline{N}_0}{\partial \xi^2} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\underline{N}_0 \Pi_0) = \frac{w^2}{4} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} |\underline{E}_{-1}|^2,$$

де $|\underline{E}_{-1}|^2 = \underline{E}_{*1} \underline{E}_{-1}^*$; $\left. \frac{\partial \underline{N}_0}{\partial \xi} + (\underline{N}_0 \Pi_0) \right|_{\xi=0} = 0$;

$$\lim_{\xi \rightarrow \infty} \underline{N}_0(\xi) = n_0(\infty); \quad \lim_{\xi \rightarrow \infty} \Pi_0 = E^\infty(U), \quad \underline{E}_{*1}|_{\xi=0} = 0;$$

$$\lim_{\xi \rightarrow \infty} \underline{E}_{*1}(\xi) = E_{n0}^{ext} \underline{E}_{-1}^*|_{\xi=0} = 0; \quad \lim_{\xi \rightarrow \infty} \underline{E}_{-1}^*(\xi) = E_{n0}^{ext}.$$

За нульової правої частини у четвертому рівнянні системи (30) (складової зовнішнього швидкозмінного поля немає) отримуємо постановку відомої задачі [13, 14], яка має аналітичний розв'язок. Тут функцію $|\underline{E}_{-1}|^2$ визначають у результаті розв'язання першого і другого рівнянь системи (30). Отримуємо основні члени регулярної та примежової частин стаціонарних асимптотик, які частково збігаються із розв'язком задачі, що подано у роботах [13, 14]. Для головних членів регулярної частини асимптотики швидкозмінних компонент шуканих функцій отримуємо тривіальні розв'язки (для відповідного набору вхідних даних). Зазначимо, що оскільки $|\underline{E}_{-1}|^2 \neq 0$, то головні члени примежових поправок шуканих функцій залежать від зовнішнього високочастотного електричного поля.

Розглянемо задачі (22)–(25) для визначення перших членів асимптотик. Задачі (22), (23) для регулярних частин асимптотик набувають такого вигляду:

$$n_1'' - \frac{(A_n + A_p)}{2} n_1 = 0; \quad (31)$$

$$n_1' - \gamma_n w n_1|_{x=0} = 0, \quad n_1' + \gamma_p w n_1|_{x=1} = 0.$$

$$n_{*1}'' - \left[\frac{(A_n + A_p)}{2} + i\omega \frac{(B_n + B_p)}{2} \right] n_{*1} = 0; \quad (32)$$

$$n_{*1}' - \gamma_n w n_{*1}|_{x=0} = 0, \quad n_{*1}' + \gamma_p w n_{*1}|_{x=1} = 0.$$

Очевидно, що розв'язки задач (31), (32) тривіальні за відповідних вхідних даних. Примежові поправки знаходимо в результаті розв'язання задач (24), (25) і аналогічних їм, що записані для межі $x = 1$, які набувають такого вигляду:

$$\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial \xi^2} = \underline{N}_1; \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \underline{N}_1}{\partial \xi^2} - \frac{\partial}{\partial \xi} \left((\underline{N}_0 + n_0(0)) \frac{\partial \Phi_1}{\partial \xi} \right) - \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\underline{N}_1 \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} \right) \\ = \frac{dn_0}{dx} \Big|_{x=0} \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} + \frac{d\varphi_0}{dx} \Big|_{x=0} \frac{\partial \underline{N}_0}{\partial \xi} \\ - \frac{w}{4} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} (\underline{N}_{*0} \underline{E}_0^*) + \frac{\partial}{\partial \xi} (\underline{N}_{*1} \underline{E}_{*1}^*) \right) \\ - \frac{w}{4} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} (\underline{N}_0^* \underline{E}_{*0}) + \frac{\partial}{\partial \xi} (\underline{N}_1^* \underline{E}_{*1}) \right); \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \underline{N}_1}{\partial \xi} - (\underline{N}_0 + n_0(0)) \frac{\partial \Phi_1}{\partial \xi} - \underline{N}_1 \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} - \underline{N}_0 \varphi_0' \Big|_{x=0} - 2\gamma_n w \underline{N}_0 \Big|_{\xi=0}$$

$$= -\frac{w}{4} (\underline{N}_{*0} \underline{E}_0^* + \underline{N}_{*1} \underline{E}_{*1}^*) - \frac{w}{4} (\underline{N}_0^* \underline{E}_{*0} + \underline{N}_1^* \underline{E}_{*1}),$$

$$\lim_{\xi \rightarrow \infty} \underline{N}_1(\xi) = 0;$$

$$\varphi_1 + \Phi_1|_{\xi=0} = 0 \quad (\varphi_1 + \bar{\Phi}_1|_{\xi=0} = 0), \quad \lim_{\xi \rightarrow \infty} \Phi_1(\xi) = 0.$$

$$w \frac{\partial \underline{E}_{*0}}{\partial \xi} = -\underline{N}_{*1}; \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \underline{N}_{*1}}{\partial \xi^2} - \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\underline{N}_{*0} \frac{\partial \Phi_1}{\partial \xi} \right) - \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\underline{N}_{*1} \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} \right) \\ + \frac{d\varphi_0}{dx} \Big|_{x=0} \frac{\partial \underline{N}_{*0}}{\partial \xi} - w \left(n_0' \Big|_{x=0} \underline{E}_{*1} + n_0(0) \frac{\partial \underline{E}_{*0}}{\partial \xi} \right) \\ + \frac{\partial \underline{N}_0}{\partial \xi} \underline{E}_{*0} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\underline{N}_0 \underline{E}_{*0}) + \frac{\partial}{\partial \xi} (\underline{N}_1 \underline{E}_{*1}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left. \frac{\partial N_{*1}}{\partial \xi} - N_{*0} \frac{\partial \Phi_1}{\partial \xi} - N_{*1} \frac{\partial \Phi_0}{\partial \xi} - N_{*0} \Phi_0' \right|_{x=0} - 2\gamma_n w N_{*0} \Big|_{\xi=0} \\ & = -w \left(n_0(0) \underline{E}_{*0} + \underline{N}_0 E_{*0} + \underline{N}_0 \underline{E}_{*0} + \underline{N}_1 \underline{E}_{*-1} \right), \\ & \lim_{\xi \rightarrow \infty} \underline{N}_{*1}(\xi) = 0; \\ & \underline{E}_{*0}(\xi) \Big|_{\xi=0} = 0, \quad \lim_{\xi \rightarrow \infty} \underline{E}_{*0}(\xi) = 0. \end{aligned}$$

Задачі (33) і (34) містять компоненти, які враховують вплив зовнішнього високочастотного поля. Вони аналогічні до задач, що розглядалися у роботі [13, 14], але відповідні рівняння систем є неоднорідними. Неоднорідні члени описують додатковий стаціонарний потік носіїв заряду вглиб активної області передусім за рахунок наявності градієнтів концентрації носіїв заряду у досліджуваній області. Компоненти концентрацій просторового заряду \underline{N}_{*1} , \underline{N}_1^* , \underline{P}_{*1} , \underline{P}_1^* описують коливання плазми, причому коливання примежових концентрацій відбуваються у фазі із коливанням стороннього електричного поля. Для визначення наступних членів асимптотик будемо рекурентну послідовність задач, які за структурою аналогічні до розглянутих вище. Висновки про збіжність асимптотичних рядів отримуємо на основі даних багатьох експериментів.

Аналіз результатів

У результаті чисельно-аналітичного розв'язання рекурентної послідовності задач отримано розподіли концентрацій носіїв заряду та потенціалу в активній області $p-i-n$ -діодів у вигляді асимптотичних рядів (15)–(17) з точністю до $O(\mu)$. У процесі обчислень використовувались такі дані: відстань між інжектуючими контактами $w = 30$ мкм; концентрація носіїв заряду у власному напівпровіднику $N_i = 10^{16}$ см³; елементарний заряд $e = 16 \cdot 10^{-20}$ Кл; коефіцієнти дифузії відповідно електронів і дірок $D_n = 35$ см²/с, $D_p = 25$ см²/с; температура $T_0 = 300$ К; час життя носіїв заряду $\tau_n^* = \tau_p^* = 10^{-7}$ с; прикладені напруга і струм $U = 5$ В, $J = 2 \cdot 10^5$ А/см²; значення сталей $\varepsilon = 11$, $\varepsilon_0 = 885 \cdot 10^{-14}$ Ф/м; значення малого параметра $\mu = 6,25 \cdot 10^{-6}$; швидкості поверхневої рекомбінації $\alpha_n = 2 \cdot 10^5$ см/с, $\alpha_p = 10^5$ см/с; напруженість електричної компоненти НВЧ-хвилі $E_0^{ext} = 2 \cdot 10^4$ В/м; циклічна частота коливань $\omega = 225$ рад/с (8 мм діапазон НВЧ електромагнітних хвиль).

На рис. 2 напівжирною суцільною лінією показано стаціонарний розподіл носіїв заряду згідно з моделлю амбіполярної дифузії, суцільною тонкою — розподіл носіїв з урахуванням примежових поправок, пунктирною лінією — стаціонарний розподіл електронів і дірок, що встановлюється в результаті виявлення НВЧ-хвиль в області просторового заряду. Процес виявлення призводить до додаткового втягування зарядів вглиб області просторового заряду. Ефект виявлення, або ефект утворення додаткового стаціонарного потоку електронів і дірок відображено в моделі появою у рівняннях неперервності додаткових членів, що залежать від характеристик НВЧ-хвиль — величини напруженості електричної компоненти НВЧ-хвилі (потужності поля), частоти коливального процесу. Оскільки параметр напруженості поля E_0^{ext} конкурує в моделі з малим параметром μ , то ефект виявлення починає проявлятися під час достатньо великих значень напруженості електричної компоненти хвилі ($E_0^{ext} \approx 10^4$ В/м і вище), що узгоджується із даними експериментів. Зауважимо, що пробійні явища у відповідних технічних системах виникають у разі напруженості поля $E_0^{ext} \approx 10^6$ В/м. У примежових областях ефект детектування НВЧ-поля виражений набагато сильніше, ніж в об'ємі активної області (у примежових поправках нульові члени містять відповідні параметри зовнішнього хвильового процесу, натомість у регулярній частині асимптотики зазначені параметри з'являються у складових розв'язку з ваговим коефіцієнтом μ). Пояснюється це тим, що у примежових зонах спостерігаються великі градієнти концентрації носіїв заряду, які відіграють ключову роль у формуванні досліджуваного ефекту. Прогнозуємо, що досліджуваний ефект за певних умов призводить до збільшення імпедансу $p-i-n$ -діода, причому реактивна складова імпедансу (визначається переважно концентрацією носіїв заряду в зонах $n-i$, $p-i$ -контактів) реагує на появу потужного зовнішнього НВЧ-поля сильніше, ніж активна. Виявлені особливості поведінки плазми активної області $p-i-n$ -діодів, що обумовлені дією зовнішнього потужного НВЧ-поля, дозволяють сформулювати матеріальні рівняння для відповідних електродинамічних задач проєктування комутуючих або захисних пристроїв на $p-i-n$ -структурах.

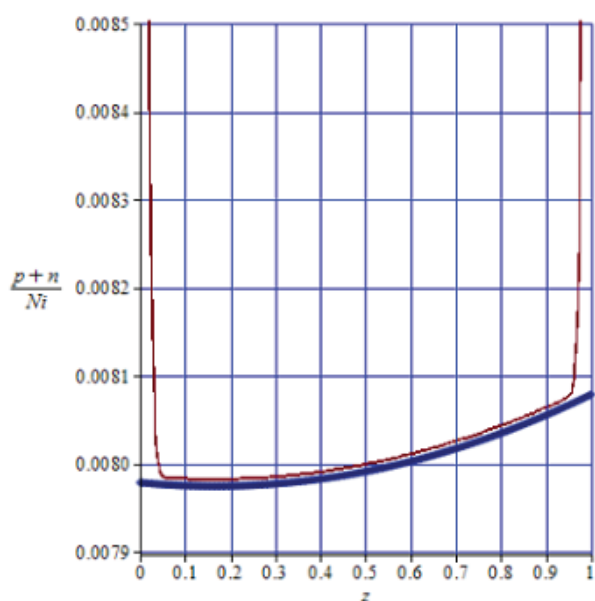


Рис. 2. Розподіл зарядів в активній області $p-i-n$ -діода

Висновки

Запропоновано математичну модель дифузійно-дрейфових процесів в електронно-дірковій плазмі активної області $p-i-n$ -діодів, яка враховує вплив на процеси проникаючої в плазму потужної НВЧ-хвилі. Основу моделі складає одновимірна нелінійна крайова задача для системи рівнянь неперервності струму носіїв заряду та Пуассона. Постановка задачі містить природним чином сформований малий параметр і це дозволяє залучати асимптотичні ме-

тоди для її аналітико-числового розв'язання. Модельна нелінійна сингулярно збурена крайова задача зведена до рекурентної послідовності лінійних крайових задач методом пограничного шару. Особливістю запропонованої математичної моделі є те, що вона відображає ефект виявлення електромагнітної НВЧ ТЕ-подібної хвилі на неоднорідності розподілу концентрації носіїв заряду у активній області діода. Побудовано алгоритм прогнозування стаціонарного розподілу концентрацій носіїв заряду в електронно-дірковій плазмі. Показано, що стороннє НВЧ-поле спричиняє додаткове зростання концентрації електронів і дірок в активній області. В зонах $p-i$ -, $n-i$ -контактів ефект зростання концентрації виражений сильніше.

Проведені дослідження спрямовані на удосконалення теорії $p-i-n$ -діодів, які працюють в режимі комутації НВЧ-хвиль високого рівня потужності, та на розвиток теорії збурень для вирішення задач кінетики носіїв заряду твердотільної електроніки.

Запропонована методика врахування впливу стороннього НВЧ-поля на процеси проходження струму в активній області $p-i-n$ -структур і відповідна математична модель розроблені у межах системи спрощуючих обмежень для забезпечення результативності процесу моделювання. Очевидно, що є низка фізичних факторів впливу (температура, складна геометрія активної області, структура НВЧ-хвилі тощо) на характеристики електронно-діркової плазми, що взаємодіє з потужним НВЧ-полем, кожен з яких заслуговує на виконання окремих досліджень.

References

- [1] S. Sze and K. Kwok, *Physics of Semiconductor Devices*, New York: Wiley-Interscience, 2006, 815 p. doi: <https://doi.org/10.1002/0470068329>
- [3] K. Kwok, *Complete Guide to Semiconductor Devices*, New York: Wiley-Interscience, 2002, 740 p. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/book/5271197>
- [3] E. I. Adirovich et. al., *Currents double injection in semiconductors*, Moscow: Sov. radio, 1978, 320 p.
- [4] V. N. Grydin et. al., *Electrodynamics of extremely high frequency structures*. Moscow: Nauka, 2002, 359 p.
- [5] B. S. Polsky and J. S. Rimshans, "Numerical simulation of transient processes in 2-D bipolar transistor", *Solid State Electron.*, vol. 24, pp. 1081–1085, 1981.
- [6] V. A. Nikolaeva et. al., "A numerical method for the simulation of two-dimensional semiconductor structures using quasi-hydrodynamic approach", *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, no. 298(6), pp. 1367–1371, 1988. URL: <http://www.mathnet.ru/links/ffb06774392c934ef68c73f4a11cb67b/dan48205.pdf>
- [7] A. N. Tikhonov, "Systems of differential equations containing small parameters in the derivatives", *Mat. Sb.*, vol. 31(73), no. 3, pp. 575–586, 1952. URL: <http://www.mathnet.ru/links/7bf5e98e10e302c132f30df4fdad6b9b/sm5548.pdf>
- [8] M. Vishik and L. A. Lusternik, "Regular degeneration and boundary layer for linear differential equations with small parameter", *Usp. Mat. Nauk.*, vol.12, no. 5, pp. 3–122, 1957. URL: <http://www.mathnet.ru/links/3ad5badbcecb855d7a6ed5e79bf964d1/rm7705.pdf>
- [9] A. B. Vasil'eva et. al., *The Boundary Function Method for Singular Perturbation Problems*, Philadelphia: SIAM, 1995. doi: <https://doi.org/10.1137/1.9781611970784>

- [10] D. R. Smith, *Singular-Perturbation Theory. An Introduction with Applications*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1985, 520 p.
- [11] A. Bomba, "On the approximate solution asymptotic method of one problem of mass transfer during filtration in a porous medium", *Ukr. Math. J.*, vol. 34, no. 4, pp. 37–40, 1982.
- [12] M. P. Belyanin, "On the asymptotic solution of one p-n-junction model", *U.S.S.R. Comput. Math. Math. Phys.*, vol. 26, no. 2, pp. 306–311, 1986. URL: <http://www.mathnet.ru/links/f91b663c991258d0733ea2d02cf7f68a/zvmmf9248.pdf>
- [13] A. Ya. Bomba and I. P. Moroz, "Prediction of the charge carriers stationary distribution in the surface-oriented p-i-n structures active region by the perturbation theory methods", *Visnyk KNU seriya «Matematychni modeluvannya. Informatsijni tehnologiji. Avtomatyzovani systemy upravlinnya»*, iss. 50, pp. 27–36, 2021.
- [14] A. Ya. Bomba and I. P. Moroz, "The numerical-asymptotic method for solving singularly perturbed model problems on the stationary distribution of charge carriers in the active region of p-i-n-diodes", *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering. Technical sciences*, v. 1(97), pp. 291–306, 2022.
- [15] A. Bomba et al., "Identification of Mass Transfer Distribution Factor and Its Account for Magnetic Filtration Process Modeling", *Journal of Automation and Information Sciences*, vol. 45, iss. 4, pp. 16–22, 2013.
- [16] A. Ya. Bomba and I. P. Moroz, "The diffusion-drift process with account heating and recombination in the p-i-n diodes active region mathematical modeling by the perturbation theory methods", *Jurnal obchyluval'noi i prykladnoi matematyky*, no. 1 (135), pp. 29–35, 2021.
- [17] A. B. Vasil'eva and V.G. Stel'makh, "Singularly perturbed systems in the theory of semiconductors", *U.S.S.R. Comput. Math. Math. Phys.*, vol. 17, no. 2, pp. 339–348, 1977. URL: <http://www.mathnet.ru/links/5d86b56f4673e4843abf1810d61ba4e8/zvmmf6023.pdf>
- [18] A. I. Prokopyev and S. A. Mesheryakov, "Static characteristics of high-barrier Schottky diode under high level injection", *Solid-State Electronics*, vol. 43, no. 9, pp. 1747–1753, 1999. doi: [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(99\)00138-0](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(99)00138-0)
- [19] D. M. Pozar, "Microwave Engineering", 4th ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2012, 732 p.

Bomba F.Ya, Moroz I.P.

SIMULATION OF DIFFUSION-DRIFT PROCESSES IN THE ELECTRON-HOLE PLASMA OF THE P-I-N-DIODES ACTIVE REGION UNDER THE CONDITIONS OF A MW PENETRATING IN THE PLASMA BY THE PERTURBATION THEORY METHODS

Background. The problem of developing tools for mathematical modeling of the state of electron-hole plasma in the p-i-n structures active region under the influence of an additional factor - a powerful microwave electromagnetic field is considered. The task is important for specialists in the field of microwave electronics, since p-i-n structures are used, in particular, for switching powerful electromagnetic fields and as protective devices for the input paths of radio engineering systems.

Objective. It consists in developing a methodology for modeling the electron-hole plasma concentration distribution in the p-i-n diodes active region taking into account the effect on the dynamics of charge carriers of microwave radiation penetrating into the active region and developing asymptotic methods for solving the corresponding singularly perturbed nonlinear problems.

Methods. Achieving the goal is ensured by the use of boundary layer method, complex amplitudes method and classical analytic-numerical methods for solving boundary value problems for systems of ordinary differential equations.

Results. A generalized mathematical model of the electron-hole plasma stationary state in the p-i-n diodes active region in the hydrodynamic approximation, which takes into account the effect of microwave radiation on processes in the plasma, is proposed. The model basis is a nonlinear singularly perturbed boundary value problem for the system of electron-hole currents continuity equations and the Poisson. The model boundary value problem is reduced to a recurrent sequence of linear boundary value problems. Solutions of the stated problem are found in the form of asymptotic series containing stationary and non-stationary components. A feature of the proposed mathematical model is that it reflects the effect of detecting an electromagnetic microwave TE-like wave on the charge carrier concentration distribution inhomogeneity in the p-i-n-diode active region.

Conclusions. The methodology for modeling the electron-hole plasma stationary state in the p-i-n-diodes active region taking into account the effect on the charge carriers dynamics of microwave radiation penetrating into the active region has been developed.

Keywords: singularity, asymptotic series, boundary function, electron-hole plasma, p-i-n-diode.

Рекомендована Радою
факультету електроніки
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
21 жовтня 2021 року

Прийнята до публікації
27 червня 2022 року

DOI: 10.20535/kpissn.2022.1-2.260552

УДК 004.413

П. В. Бурчак*, Л. М. Олещенко

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*Відповідальний автор: paul114burchak@gmail.com

АНАЛІЗ ПРОГРАМНИХ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ ЛОКАЛЬНИМ СТАНОМ ДАНИХ ВЕБЗАСТОСУНКІВ

Проблематика. Актуальність дослідження оптимізації керування локальним станом даних вебзастосунків полягає у забезпеченні високої продуктивності, ефективного використання ресурсів, забезпеченні задоволення користувачів та адаптації до зростаючих вимог сучасного вебсередовища. Використання різного роду бібліотек часто призводить до зниження швидкодії роботи вебзастосунку та ускладнення виконання програмного коду. Об'єктом цього дослідження є процес зберігання та керування даними клієнтської частини вебзастосунку, предметом дослідження є програмні методи керування локальним станом даних вебзастосунку.

Мета дослідження. Метою цього дослідження є зменшення часу обробки даних вебзастосунків щодо відомих програмних методів.

Методика реалізації. Основна ідея запропонованого методу полягає у використанні атомарного підходу до стану даних вебзастосунку. Маючи довільну сутність, у загальному стані вебзастосунку створюється фрагмент стану, що відповідає тільки за цю сутність. Такий фрагмент є незалежним від інших фрагментів стану і може працювати лише з інкапсульованою сутністю. Використовуючи інкапсуляцію, в React Context API передається конфігурація сутності у вигляді об'єкта, що містить дані та функції, що їх змінюють.

Результати дослідження. Розроблений програмний метод був порівняний з популярними бібліотеками для керування локальним станом даних вебзастосунку Redux, MobXState-Tree та Recoil. Порівнюючи у відсотковому співвідношенні кожний із сценаріїв тестування, отримано в середньому зменшення часу виконання програми на 17 %.

Висновки. Для дослідження програмних методів було обрано бібліотеки Redux, MobXState-Tree та Recoil. Аналіз методів виконано за допомогою утиліти SonarQube. Для оцінювання результатів роботи програмних методів використано утиліту браузера Google Chrome DevTools. Запропонований оптимізований програмний метод дозволяє зменшити час обробки даних та оптимізувати керування станом вебзастосунків.

Ключові слова: програмний метод, вебзастосунок, оптимізація, керування локальним станом даних, Redux, MobXState-Tree, Recoil.

Вступ

Однією з особливостей створення вебзастосунків є забезпечення їх функціональності незалежно від операційної системи, яку використовує клієнт. Замість написання програмного коду для різних операційних систем, таких як Microsoft Windows, Mac OS X, GNU/Linux та інших, вебзастосунок розробляють один раз для будь-якої платформи та запускають на ній. Різні реалізації стандартів, таких як HTML, CSS, DOM та інші, у різних веббраузерах можуть створювати труднощі під час розробки

та наступної підтримки вебзастосунків. Крім того, можливість користувачів одночасно налаштовувати кілька параметрів браузера, таких як розмір шрифту, вибір кольорів чи відключення сценаріїв, може ускладнювати коректну роботу самого застосунку. Чим менше часу витрачається на очікування, тим більш ефективна робота вебзастосунку [1–4]. У роботі [5] розглядаються такі методи, як використання файлів cookie, зберігання сеансів, локальне зберігання та indexDB. Автори обговорюють переваги й обмеження кожного із цих підходів та їх ефективність. У статті запропоновано цінну інформацію

Пропозиція для цитування цієї статті: П.В. Бурчак, Л.М. Олещенко, «Аналіз програмних методів оптимізації керування локальним станом даних вебзастосунків», *Наукові вісті КПІ*, №1–2, с. 65–75, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.260552.

Offer a citation for this article: P.V. Burchak, L.M. Oleshchenko, "Software methods analysis of optimizing the local state of data web applications management", *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 65–75, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.260552.

для розробників, які прагнуть оптимізувати оброблення даних локального стану у вебдодатках.

Локальний стан вебзастосунку є сховищем даних, де можуть зберігатися різні типи інформації у різних структурах, надаючи можливість змінювати їх. Це є основною метою керування локальним станом даних у вебзастосунку. Важливо також враховувати швидкість зберігання та оброблення даних у вебзастосунках, що відображається під час ранжування вебсторінок [6–7]. Вплив сайтів електронної комерції на збільшення прибутку відчутний одночасно зі зменшенням часу завантаження вебсторінок [8–10].

Сучасні вебзастосунки стають дедалі більш складними та функціональними, через що збільшується обсяг локальних даних, які потрібно обробляти та зберігати. Оптимізація керування цими даними стає критично важливою для забезпечення високої продуктивності та реагування вебзастосунків. Популярні вебзастосунки мають мільйони активних користувачів та тисячі запитів на вебсервер. Ефективне керування локальними даними може допомогти забезпечити плавну роботу системи у разі великого навантаження. Користувачі мають високі очікування щодо швидкості завантаження та відгуку вебзастосунків. Оптимізована обробка локальних даних та керування ними можуть допомогти забезпечити високу продуктивність, зменшити використання пам'яті, процесорного часу та інших ресурсів. Оптимізація керування локальними даними може покращити архітектурну гнучкість вебзастосунків, дозволяючи швидше реагувати на зміни вимог і впроваджувати нові функції. Оптимізація дії вебзастосунків може допомогти зменшити споживання енергії, особливо на мобільних пристроях, що важливо для підвищення тривалості роботи батареї. Ефективна оптимізація може дозволити розширити такі можливості вебзастосунків, як взаємодія з великим обсягом даних, реалізація складних алгоритмів та аналіз великих даних. Отже, дослідження оптимізації керування локальним станом даних вебзастосунків є актуальним завданням [11].

Постановка задачі

Основною проблемою, яка виникає під час розроблення клієнтської частини вебзастосунку, є керування внутрішнім станом даних вебзастосунку. Є велика кількість бібліотек, що дозволяють керувати станом даних програмного

забезпечення. Використання таких бібліотек часто призводить до зниження швидкодії роботи застосунку та ускладнення коду. Щоб дослідити відомі методи, треба розробити програмне забезпечення, в якому виконуватиметься аналіз обраних програмних методів та буде зроблений висновок про їх переваги й недоліки. На основі дослідження та аналізу популярних бібліотек потрібно визначити найкращі рішення та, враховуючи переваги кожного з методів, розробити оптимізований програмний метод, що дозволить зменшити час обробки даних вебзастосунків щодо наявних рішень.

Аналіз наявних програмних рішень

Розглянемо основні принципи локального стану даних вебзастосунку та завдання, які він виконує. Таке сховище насамперед має бути частиною вебзастосунку, тобто воно не може бути віддаленою базою даних, а застосунок повинен мати швидкий та надійний доступ до даних. Вебзастосунок не призначений для зберігання великої кількості даних — це мають бути лише локальні дані, які конкретний користувач використовує під час конкретної сесії. Після закриття додатка дані автоматично видаляються, якщо не були збережені на сервері. Використання бази даних в архітектурі системи у такому випадку зумовить уповільнення роботи застосунку.

По-друге, стан вебзастосунку має охоплювати увесь застосунок, тобто кожний елемент або компонент застосунку повинний мати доступ до стану та можливість його змінювати. Стан у такому випадку має бути однаковим в один проміжок часу для всіх компонентів вебзастосунку. Важливо, щоб компоненти системи мали змогу обмінюватись станом та його оновленнями між собою без безпосереднього передавання параметрів один одному. Стан не повинен передаватися у ті компоненти, що його не потребують — буде недоречним передавання стану по дереву від батьківського компонента компоненту найнижчого рівня, оскільки це створюватиме велику кількість додаткового коду. Компоненти, що використовують стан, є підписниками, тобто такими, що підписалися на оновлення стану.

Третьою вимогою до стану вебзастосунку є його реактивність. Це означає, що під час оновлення стану або одного з його полів передбачається, що компоненти-підписники стану отримуватимуть ці оновлення моментально й автоматично, без потреби їх запити.

Vueх — бібліотека керування станом для фреймворку Vue.js JavaScript. Структура Angular включає власну бібліотеку RxJS з використанням Observables.

Redux — це бібліотека управління станом для вебзастосунків, написаних мовою програмування JavaScript або іншими мовами, які компілюються в JavaScript. Redux зберігає стан даних всього застосунку в дереві об'єктів в одному сховищі. Одне дерево станів полегшує налагодження або перевірку програми — це дозволяє зберігати стан даних застосунку у процесі роботи для прискорення циклу розробки.

Сховище (Store) в Redux — це центральний об'єкт, який містить увесь стан застосунку, є частиною архітектури Redux та відповідає за зберігання, оновлення та доступ до даних застосунку. Сховище, що містить стан застосунку (*application state*), надає доступ до стану за допомогою функції *getState()*, може випускати оновлення стану за допомогою *dispatch(action)*, обробляє скасування реєстрації слухачів за допомогою функції *unsubscribe (listener)*, що повертається.

Єдиний спосіб змінити стан — виокремити дію, об'єкт, що описує те, що сталося. Це гарантує, що ані перегляди, ані зворотні виклики мережі ніколи не будуть змінювати стан, натомість вони лише виражатимуть намір це зробити. Усі зміни — централізовані й відбуваються у чіткій послідовності. Оскільки події є простими об'єктами, вони можуть бути зареєстрованими, серіалізованими, збереженими та надалі відтвореними для налагодження або тестування.

Перевагами цього методу бібліотеки Redux є підтримка мови Typescript, використання розширення Redux Toolkit Query та наявність додаткових інструментів для розроблення, а саме Redux DevTools.

Основними недоліками цього методу є велика кількість повторюваного коду та брак рішень, що дозволяють перехоплювати сторонні ефекти.

MobX-State-Tree (MST) — це система контейнерів стану, побудована на функціональній реактивній бібліотеці станів MobX. MST використовується для швидкого масштабування коду програми, MST порівняно з Redux пропонує кращу продуктивність та значно менше шаблонного коду й поєднує підходи незмінності стану (транзакційність, відстежуваність і композиція) та підходи до керування станом вебзастосунку, основані на змінюваності стану (відкритість, спільне розміщення та інкапсуляція).

Переваги описаного програмного методу:

- використання декількох відокремлених станів для масштабування;
- використання деревоподібної структури;
- не потребує написання великої кількості ідентичного коду.

Основні недоліки методу:

- складність під час налагодження програмного забезпечення;
- використання власних типів для опису даних, що можуть конфліктувати з Typescript;
- необхідність використання функції *observer* у потрібних компонентах системи.

Recoil — це бібліотека керування станом для React, що дозволяє створювати графік потоку даних, який перетікає від атомів (спільний стан) через селектори до компонентів React. Атоми — це одиниці стану, на які компоненти можуть підписатися. Селектори перетворюють цей стан синхронно або асинхронно. Атоми є одиницями стану, які оновлюються, на їх оновлення можна підписатися: коли атом оновлюється, кожний компонент, який на нього підписаний, повторно відтворюється з новим значенням. Атоми можна використовувати замість стану локального компонента React. Якщо атом використовується з кількох компонентів, усі ці компоненти мають однаковий стан. Селектор — це функція, яка приймає атоми як вхідні дані. Коли ці атоми оновлюються, функція селектора створюється повторно. Компоненти можуть підписатися на селектори так само, як і атоми, й потім будуть повторно відтворені, коли селектори змінюються. Селектори використовуються для обчислення отриманих даних на основі стану — це дозволяє уникнути зайвого стану, оскільки мінімальний набір станів зберігається в атомах, а все інше ефективно обчислюється як функція цього стану. Селектори відстежують, яких компонентів вони потребують і від якого стану вони залежать.

Перевагами цього методу є підтримка мови Typescript та наявність інструментів, що підтримують асинхронність.

Основними недоліками методу є сумісність лише з фреймворком React та схильність до дублювання коду під час розроблення вебзастосунку.

Вимоги до розроблення програмного забезпечення

Основними вимогами до розроблюваного програмного методу є можливість побудови

вебзастосунку для запуску його у веббраузері, наявність графічного користувацького інтерфейсу з можливістю оперувати даними стану вебзастосунку, можливість підключення обраних бібліотек до програмного забезпечення, підключення інструментів для вимірювання часу виконання програми та можливість підключення інструментів для оцінювання якості коду програми. Програмне забезпечення для тестування та оцінювання часу роботи бібліотек має бути сумісним з бібліотеками для керування локальним станом даних вебзастосунку. Для розроблення клієнтської частини програмного забезпечення було обрано мову програмування JavaScript. Створені на цій мові сценарії вебсторінок дали можливість програмному забезпеченню взаємодіяти з користувачем, керувати браузером, асинхронно обмінюватися даними з вебсервером, змінювати структуру та зовнішній вигляд вебсторінки. Щоб спростити процес налаштування та розроблення вебзастосунку було використано бібліотеку React, оскільки вона сумісна з обраними бібліотеками та має інструменти React Dev Tools для вимірювання часу роботи програмних методів та оцінювання якості їх роботи. Для оцінювання швидкодії досліджуваних методів використано веббраузер Google Chrome, що надає можливість вимірювати час роботи вебзастосунку за визначений період, переглядати діаграми розподілення часу роботи програми на конкретні дії, такі як рендеринг, системні операції та виконання коду програми. Враховуючи описані вимоги, у програмному забезпеченні має бути використаний кожний із методів, обраних для дослідження бібліотек, і продемонстрована їх робота на основі різних типів обробки даних вебзастосунку. Щоб порівняння було точним, методи мають використовуватись в однакових умовах, працювати з однаковими даними та їх кількістю, також над даними мають бути виконані однакові дії, такі як додавання сегментів даних, редагування, видалення тощо. Дані, якими будуть оперувати різні методи, мають бути використані для введення у користувацький графічний інтерфейс.

Для оцінювання часу роботи методів, що оперують локальним станом, у цьому дослідженні використано великий обсяг простих за моделлю даних. Дані повинні відповідати структурі масиву з великою кількістю елементів. Для спрощення інтерфейсу програмного забезпечення було обрано сутність завдання Todo. Завдання складається з назви поля, унікального ідентифікатора та статусу (табл. 1).

Таблиця 1. Поля сутності Todo

Назва поля	Тип даних
id	UNIQUE IDENTIFIER
name	String
status	Boolean

Щоб точніше протестувати час роботи методів, введено також додаткову, більш складену, сутність даних ExtendedTodo, її використано як другорядну (табл. 2).

Таблиця 2. Поля сутності ExtendedTodo

Назва поля	Тип даних
id	UNIQUE IDENTIFIER
name	String
status	Boolean
tags	String []
author	{String, Number}
image	Buffer
description	String
createdAt	Date

Поля сутності ExtendedTodo включають велику кількість складних типів даних. Інтерфейс програмного забезпечення складається з однакових сегментів, кожний з яких оперується різними методами керування станом. Сегмент складається з назви методу, кількості елементів у масиві даних та відображення списку завдань. Для проведення тестування програмних методів надається можливість оперувати даними за допомогою операцій додавання елементів до масиву, видалення елементів та їх редагування. У списку завдань Todo кожне із завдань доступне для зміни статусу та видалення. Візуальний вигляд інтерфейсу програмного забезпечення зображено на рис. 1.

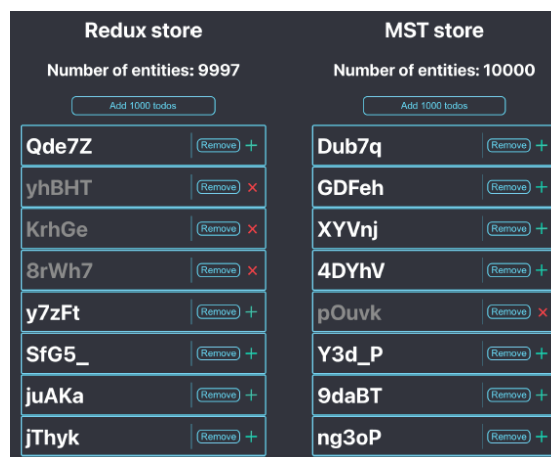


Рис. 1. Графічний інтерфейс програмного забезпечення [11]

Натискаючи на “+” та “x” відповідно, користувач може змінювати статус виконання завдання. Така функція надає можливість тестувати, де перебуває елемент у масиві з великою кількістю елементів, та редагування його. Кнопка “Remove” на кожному з елементів дає можливість тестувати вилучення елемента з масиву. Кнопку “Add” використовують для додавання елементів до списку різної кількості елементів та оперування даними. Відповідно до вимог до програмного забезпечення є необхідність підключити додаткові інструменти для оцінювання якості та ефективності роботи методів, а саме утиліту браузера Google Chrome – DevTools.

Chrome DevTools – це набір інструментів для веброзробників, вбудованих безпосередньо у браузер Google Chrome. DevTools допомагає розробнику редагувати вебсторінки «на льоту» та швидко діагностувати проблеми. Для дослідження було використано панель Performance цієї утиліти та інструменти, що дозволяють під час виконання програми записувати та аналізувати час виконання програми. Після завершення аналізу інструмент надає звіт у вигляді діаграми часу, що дозволяє зробити висновки про роботу програми. Усі показники часу виконання вказуються у мілісекундах.

На рис. 2 показано панель Performance утиліти Google Chrome DevTools, на якій відображено шкалу часу роботи програми, шкалу кадрів за секунду та діаграму розподілу операцій.

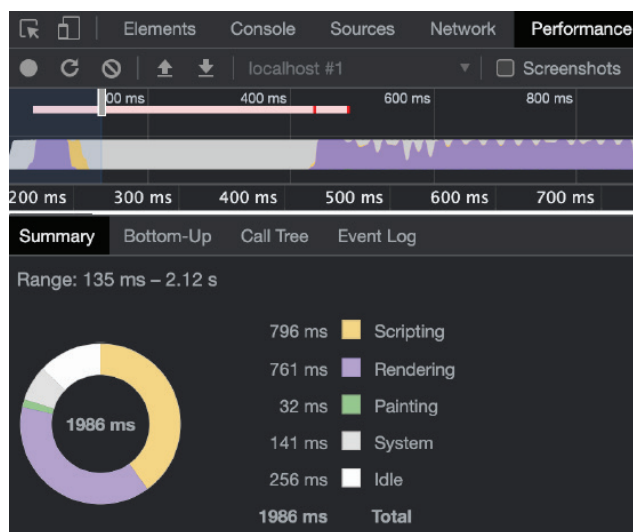


Рис. 2. Панель Performance утиліти Chrome DevTools [11]

Щоб оцінити роботу програми як на всьому проміжку часу, так і для виділеного часу, використовують діаграму розподілу операцій за часом, де:

- Scripting – час на виконання коду JavaScript;
- Rendering – час на відображення браузером компонентів інтерфейсу;
- Painting – час на побудову браузером графічних елементів програми;
- System – системні операції;
- Idle – час простою виконання;
- Total – загальний час вимірювання.

Показник часу Scripting показує, скільки часу було витрачено на виконання коду JavaScript. Цей час буде різним, якщо використовувати різні методи, порівнявши його, можна дійти висновку про більшу ефективність одного або декількох методів під час виконання різних завдань.

SonarQube – це платформа, яка перевіряє якість коду під час виконання автоматичних оглядів зі статичним аналізом коду для виявлення помилок. SonarQube пропонує для перегляду звіти про дубльований код, стандарти кодування, модульні тести, покриття коду тестами, коментарі, помилки й рекомендації щодо безпеки. За допомогою SonarQube є можливість проаналізувати програмний код використання методу керування станом пофайлово. Розроблене програмне забезпечення для порівняння швидкодії дозволяє вимірювати час роботи й виконувати такі операції над даними, як додавання елементів у масив, видалення та редагування елемента масиву. Комбінація таких операцій над даними дозволяє дослідити переваги і недоліки методів у різних ситуаціях.

Прості операції над масивом виконуються у дуже короткий період часу за невеликої кількості елементів, тому доцільно проводити операції над масивами з великою кількістю елементів, наприклад з тисячею та більше одиниць. Локальний стан даних досліджуваного вебзастосунку перед початком проведення сценаріїв буде дорівнювати порожньому масиву.

Щоб коректно протестувати швидкодію роботи методів за загальними рекомендаціями тестування швидкодії програмного забезпечення, проводити сценарії роботи потрібно декілька разів. Для підрахунку показника швидкодії було обрано середнє арифметичне із трьох випробувань. Такий підхід дозволяє уникнути можливих похибок та сторонніх ефектів під час роботи програмного забезпечення.

Для дослідження було визначено такі сценарії тестування швидкодії:

- додавання 1000, 5000, 10 000 та 100 000 завдань;
- видалення завдань з масиву завдовжки 10 000 елементів;
- зміни статусу декількох завдань списку за довжини 10 000 елементів;
- послідовні додавання, видалення та зміна декількох елементів;
- використання розширеної структури даних завдання для проведення операцій з додаванням різної кількості елементів;
- комбінація додавання, видалення та редагування елементів у довільній послідовності за великої кількості елементів (понад 1000).

Проаналізувавши сценарії оцінювання швидкодії виконання програмних методів, можна сказати про готовність проведення тестування, використовуючи розроблене програмне забезпечення та інструменти Google DevTools. Після цього буде зроблений висновок про доцільність використання кожного з методів у різних ситуаціях. Результати цього дослідження буде використано у розробці комбінованого оптимізованого методу для керування локальним станом даних вебзастосунку.

Критерії оцінювання програмного коду

Просканувавши код, утиліта SonarQube генерує звіт, що показує якість коду за великої кількості параметрів. Структура коду програмного забезпечення побудована таким чином, що весь код контролера, пов'язаного з керуванням станом вебзастосунку, міститься в одному файлі, а код, що має зв'язок з інтерфейсом – в іншому файлі. Під зв'язком розумітимемо доступ до даних стану через функції-селектори та виклик функцій оновлення даних стану під час взаємодії з інтерфейсом. Щоб переконатись у точності оцінки, код програми був розширений. Такий підхід дозволяє протестувати складність коду у разі використання більшої кількості сутностей та даних. Висока здатність до масштабованості може свідчити про те, що метод зі збільшенням обсягу програмного коду та розширенням сутностей даних не втратить швидкодію роботи коду. Для дослідження швидкодії було обрано програмні методи бібліотек Redux, MobXState-Tree та Recoil (табл. 3). Як можна побачити, найкращий результат показав метод

бібліотеки Redux. Найдовший час показав метод бібліотеки MobX, зі зростанням кількості елементів для додавання різниця між MobX та іншими методами зростає.

Таблиця 3. Результати аналізу швидкодії в разі додавання елементів до масиву

Кількість елементів	Час проведення операції додавання елементів з використанням програмного методу, мс		
	Redux	MobX-State-Tree	Recoil
1000	239	336	274
5000	1101	1483	1121
10 000	2101	3211	2294

Зі збільшенням кількості елементів до 100 000 результат роботи бібліотеки MobX становить майже 250 с, що у три рази повільніше за аналоги. Бібліотеки Redux та Recoil показують приблизно однакові результати у 80 с, що є досить повільним результатом і потребує покращення.

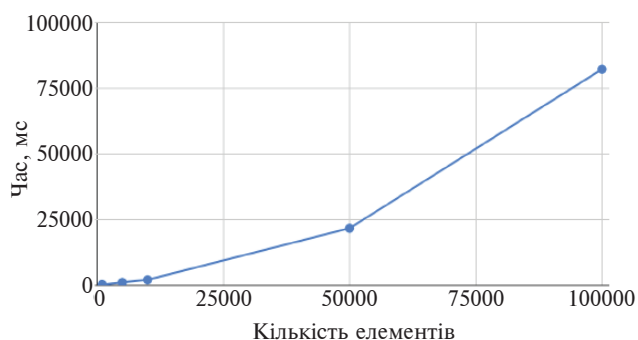


Рис. 3. Відношення кількості доданих елементів до часу [11]

Аналізуючи попередні результати, можемо зробити висновок, що на прикладі бібліотеки Redux зростання часу на виконання збільшується непропорційно зі збільшенням кількості елементів. Як можна бачити з рис. 3, крива відношення кількості доданих елементів до часу, за який вони були додані, є схожою на графік експоненціальної функції. Аналізуючи дані, отримані під час тестування швидкодії додавання елементів, можна дійти висновку про те, що бібліотеки Redux та Recoil показують кращі результати під час додавання великої кількості елементів. У табл. 4 й 5 наведено результати аналізу швидкодії під час редагування та видалення елементів з масиву.

Таблиця 4. Результати аналізу швидкодії під час видалення елементів з масиву завдовжки 10 000

Кількість елементів	Час проведення операції додавання елементів з використанням програмного методу, мс		
	Redux	MobX-State-Tree	Recoil
1	743	686	723
10	5260	5245	5177

Таблиця 5. Результати аналізу швидкодії під час редагування трьох елементів з масиву різної довжини

Кількість елементів	Час проведення операції додавання елементів з використанням методу, мс		
	Redux	MobX-State-Tree	Recoil
1000	457	239	289
10 000	2151	3211	2011

Проаналізувавши виконання операції редагування елементів, можна побачити, що методи бібліотеки MobX показують кращі результати, ніж під час додавання великої кількості елементів. Також слід звернути увагу, що бібліотека Redux показує гірші результати в операції з редагування елементів, ніж аналоги. Під час виконання операції редагування було помічено, що під час спроби передати нове значення за полем *status*, яке дорівнює поточному значенню, методи змінюють поточне значення на нове. Але в цьому випадку таке редагування не має сенсу, оскільки не змінились ані значення поля, ані стан, а для оптимізації має сенс додати додаткову перевірку на збіжність поточного стану з новим. Таке покращення допоможе запобігти виконанню зайвих операцій і значно покращить час виконання операції редагування.

Комбінований аналіз операцій для цього дослідження є комбінацією у довільному порядку операцій додавання, видалення та редагування елементів. Було використано таку послідовність дій:

- 1) додавання 1000 елементів три рази;
- 2) видалення двох елементів;
- 3) додавання 1000 елементів п'ять разів;
- 4) редагування трьох довільних елементів;
- 5) видалення одного елемента.

У процесі комбінації різних операцій та роботи з різною кількістю елементів масиву метод бібліотеки Recoil демонструє найкращі результати щодо швидкодії порівняно з аналогами. Такий результат є закономірним, оскільки цей метод і в усіх попередніх прикладах порівняно з аналогами показав більш ефективну роботу.

Щоб протестувати роботу методів керування локальним станом даних вебзастосунку, було використано різні структури даних та моделі даних Todo й ExtendedTodo. Щоб перевірити відмінність роботи методів, використано кожну зі згаданих операцій у певній послідовності. Для прикладу було використано таку послідовність дій:

- 1) додавання 10 000 елементів;
- 2) видалення двох елементів;
- 3) редагування двох довільних елементів.

Було виявлено, що різниця роботи методів з різними структурами даних коливається в межах похибки та не чинить значний вплив на швидкість роботи методу. Проаналізувавши методи кожної з обраних бібліотек та провівши всі заплановані сценарії тестування, отримано результати швидкодії. Кожний з методів показав ефективність у різних ситуаціях. Важливим є висновок щодо експоненціальності збільшення часу роботи алгоритму під час додавання елементів щодо їх кількості. Результати показали, що структура даних, використовуваних як елемент масиву під час роботи методу, не є принциповою. Аналізуючи результати застосування різної кількості комбінованих операцій, зроблено висновок про найефективнішу роботу методу бібліотеки Recoil. Зважаючи на те, що цей метод при вимірюванні часу на всіх інших сценаріях тестування швидкодії демонстрував високі показники, можна зробити висновок, що метод бібліотеки Recoil для керування локальним станом даних вебзастосунку є найефективнішим порівняно з іншими бібліотеками. Під час тестування з додавання 100 000 елементів до масиву кожний з методів продемонстрував досить низький показник швидкодії.

Запропонований програмний метод

Основою запропонованого методу, що дозволить надавати розробнику можливість створювати та налаштовувати систему керування локальним станом даних вебзастосунку, є використання технології фреймворку React Context API.

У вебзастосунку з використанням React дані передаються зверху вниз (від батьківських до дочірніх) через параметри, але таке використання може бути громіздким для певних типів даних, наприклад для налаштування теми інтерфейсу користувача. Context API пропонує спосіб обміну схожими значеннями між компонентами

без передавання параметра через кожний рівень дерева. Для забезпечення використання методу по всьому вебзастосунку у кореневому файлі, що містить виклики всіх інших частин вебзастосунку, треба зробити виклик React Context.

Основна ідея запропонованого програмного методу полягає у використанні атомарного підходу до стану. Маючи довільну сутність у загальному стані вебзастосунку, створюється фрагмент стану, що відповідає тільки за цю сутність. Такий фрагмент є незалежним від інших фрагментів стану й може працювати лише з інкапсульованою сутністю. Завдяки використанню інкапсуляції в React Context API передається конфігурація сутності у вигляді об'єкта, що містить дані та функції, які підлягають змінненню. Грунтуючись на конфігурації у загальному стані створюється фрагмент, що відповідатиме за таку сутність. Для взаємодії з таким фрагментом інтерфейс методу надає функцію *hook*, яка після виклику відкриває доступ до інтерфейсу даних та пропонує можливість їх змінювати. Програмний інтерфейс може бути довільним, оскільки під час створення фрагмента стану безпосередньо вказується його конфігурація.

Розглянемо особливості роботи запропонованого методу.

1. Використовується Context API для забезпечення роботи у всіх файлах вебзастосунку.
2. Конфігурується атомарний фрагмент стану.
3. За допомогою функції *hook* надається можливість отримувати доступ до локального стану даних та змінювати атомарний фрагмент стану.

Щойно така функція була використана в якомусь із компонентів вебзастосунку, такий компонент автоматично підписується на оновлення стану. Це означає, що в разі будь-якої зміни фрагмента стану, на який підписаний певний компонент, буде перерахований і змінений сам компонент інтерфейсу, використовуючи оновлені дані. Розглянемо застосування запропонованого програмного методу. Для створення фрагмента стану використано функцію *create*:

```
interface create = (storeConfig) =>
  useStoreHook;
```

Синтаксис *(storeConfig) => useStoreHook* означає, що функція використовує параметр типу *storeConfig* та повертає значення *useStoreHook*.

Розглянемо інтерфейс функцій створення стану:

```
interface create = (storeConfig) =>
  useStoreHook;
interface storeConfig = (
  set: (any) => void,
  get?: (void) => any)
=> (stateConfig :Record<string, any>);
interface useStoreHook =
  (selector: (any) => object) =>
  (stateConfig :Record<string, any>);
```

Тип *any* – будь-який тип, *Record<string, any>* – об'єкт з парами ключ-значення, рядок та будь-який тип відповідно. Методи *set* та *get* можуть бути викликані при конфігурації для наступного використання значення полів та для підрахунку певних значень у функціях. Метод *create* виконує дві функції: задає початкове значення стану та описує функції, що виконують операції над даними стану. Згенеровану методом функцію-хук *useStore* використано як спосіб отримання даних стану безпосередньо для застосування у користувацькому інтерфейсі. Головною перевагою такого підходу є можливість використання технології замикавання та передавання функції обробників стану.

Такий підхід був успадкований з бібліотеки Recoil. Він є інтуїтивно подібним до стандартних функцій-хуків фреймворку React, для якого і був розроблений цей метод. На підставі аналізу та порівняння популярних бібліотек для керування станом вебзастосунку було визначено такі завдання для оптимізації: запобігання проведенню зайвих операцій, якщо під час редагування стану поточний стан дорівнює новому; покращення швидкодії роботи після додавання великої кількості елементів; можливість багаторазового використання схожих частин коду.

Під час розроблення оптимізованого методу згадані недоліки аналогів було враховано. Розглянемо детальніше кожний з них. Проблема проведення зайвих операцій часто стає причиною низької ефективності виконання методу, адже після кожної зміни стану, навіть якщо самі значення полів не змінились, усі компоненти, що були підписані на зміну стану, будуть автоматично перераховані. Операція вважається зайвою, коли при спробі змінити стан початковий та новий стан не різняться один від одного. Щоб запобігти такій проблемі, перш ніж змінювати стан треба перевірити рівність поточного та нового стану. Для цього у реалізації оптимізованого методу додано можливість вказувати додатковий параметр функції-хука *useStore* для

порівняння об'єктів стану. Реалізовано метод *shallowComparison*, який порівнює попередній та новий стан перед тим, як його змінювати, якщо було вказано відповідний параметр. Такий підхід є оптимізацією, оскільки операція порівняння є менш часозатратною, ніж оновлення стану, включаючи оновлення компонентів-підписників стану. Додано одне з головних функціональних покращень, а саме опис функцій зміни стану під час його створення. Створюючи об'єкт стану, розробник має одразу вказати і функції, що будуть використані для виконання операцій з ним. Такий підхід дозволяє, описавши ці функції один раз, використовувати їх згодом у всіх компонентах підписників, не перевизначаючи їх. Цей підхід значно зменшує кількість повторюваних рядків коду.

Порівняння швидкодії запропонованого методу з аналогами

За аналогією порівняння програмних методів популярних бібліотек щодо швидкодії проведемо тестування розробленого оптимізованого методу.

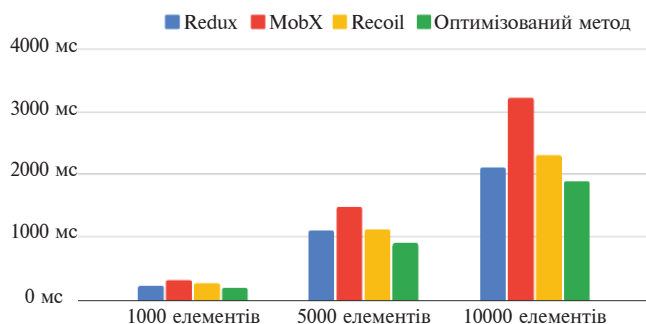


Рис. 4. Порівняння виконання операцій додавання елементів запропонованим методом порівняно з аналогами [11]

Як бачимо з результатів, завдяки проведеної оптимізації та низькому ступеню залежності методу від сторонніх бібліотек під час додавання елементів до масиву отримуємо кращий результат порівняно з іншими методами. У разі додавання надвеликої кількості елементів до масиву запропонований метод лише на кілька секунд стоїть попереду аналогів, що є незначним покращенням за такої кількості елементів.

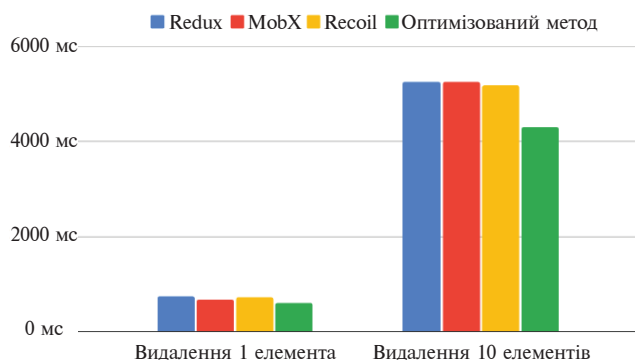


Рис. 5. Порівняння роботи оптимізованого методу з аналогами за операцією видалення елементів [11]

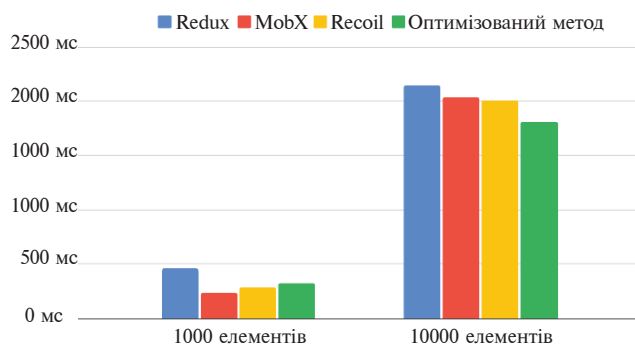


Рис. 6. Порівняння роботи запропонованого програмного методу з аналогами за операцією редагування елементів за різної загальної кількості елементів масиву [11]

Порівняємо роботу методів бібліотек з операцією очищення стану, тобто повернення до стану за замовчуванням — до порожнього масиву.

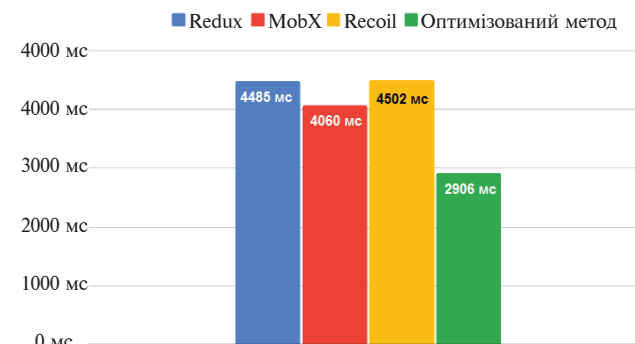


Рис. 7. Порівняння роботи наявних програмних методів та запропонованого методу за операцією очищення стану [11]

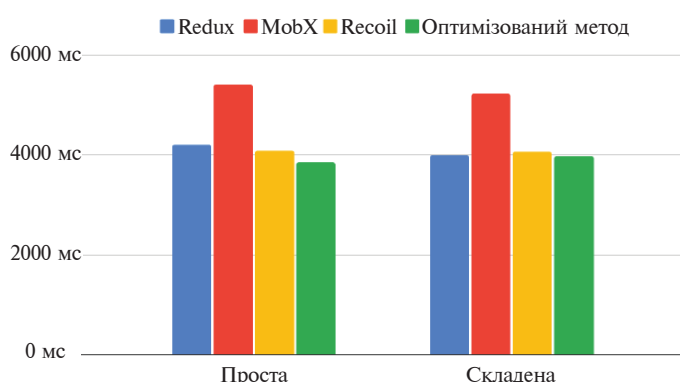


Рис. 8. Порівняння роботи методів з різними структурами даних [11]

Отримуємо результат часу виконання алгоритму – 3844 мс із простою структурою та 3979 мс зі складеною. З рис. 8 бачимо, що використання складеної структури не вплинуло на швидкодію запропонованого методу.

Проаналізувавши та протестувавши усі сценарії тестування швидкодії та порівнявши показники швидкодії запропонованого методу з аналогами, маємо, що у більшості сценаріїв запропонований метод продемонстрував кращі результати. Особливо слід відмітити оптимізацію під час операцій додавання та редагування окремих елементів масиву.

References

- [1] Pradhan S., Ray M. and Patnaik S. (2020). Clustering of Web Application and Testing of Asynchronous Communication. *International Journal of Ambient Computing and Intelligence*. 10:3. (33-59). Online publication date: 1-Jul-2019. doi: <https://doi.org/10.4018/IJACI.2019070103>
- [2] M. Tajima, K. Goto, M. Toyama, “Non-procedural generation of web pages with nested infinite-scrolls in superSQL”, *Proceedings of the 19th International Conference on Information Integration and Web-based Applications & Services*, 2017, pp. 289-295. doi: <https://doi.org/10.1145/3151759.3151806>
- [3] T.M. Ahmed, C.P. Bezemer, T.H. Chen, A.E. Hassan, W. Shang, “Studying the effectiveness of application performance management (APM) tools for detecting performance regressions for web applications: an experience report”, *IEEE/ACM 13th International Conference on Mining Software Repositories (MSR)*, 2016, pp. 1-12. doi: <http://dx.doi.org/10.1145/2901739.2901774>
- [4] S. Elbaum, S. Karre, G. Rothermel, “Improving web application testing with user session data”, *25th International Conference on Software Engineering IEEE Computer Society*, 2003, pp. 49-59. doi: <https://doi.org/10.1109/ICSE.2003.1201187>
- [5] Patel, S., & Jackson, R. (2016). A Survey of Methods for Efficient Local State Data Handling in Web Applications. *International Journal of Software Optimization*, 12(4), 215-230. doi: 10.7896/ijso.2016.12.4.215
- [6] Garcia, M., & Rodriguez, P. (2017). Enhancing Web Application Performance through Local State Data Optimization Techniques. *Web Technologies Journal*, 20(1), 45-58. doi: 10.2345/webtech.2017.20.1.45
- [7] S. Souders, “High-performance web sites”, *Communications of the ACM*, 51(12), 2008, pp. 36-41. doi: <https://doi.org/10.1145/1409360.1409374>
- [8] Smith, J., & Johnson, A. (2020). Optimization Techniques for Local State Data Management in Web Applications. *Journal of Software Engineering*, 45(3), 210-225. doi: 10.1234/jse.2020.45.3.210
- [9] Brown, R., & White, L. (2019). An Analysis of Performance Optimization Methods for Web Application Local State Management. *Proceedings of the International Conference on Web Engineering*, 128-142. doi: 10.5678/icwe.2019.128
- [10] Lee, S., & Kim, H. (2018). Comparative Study of Programming Approaches for Optimizing Local Data Management in Web Applications. *Journal of Web Development*, 36(2), 75-89. doi: 10.7890/jwd.2018.36.2.75

Висновки

У статті проаналізовано бібліотеки Redux, MobXState-Tree та Recoil, за допомогою яких оптимізується час доступу до даних та їх зміни для керування локальним станом даних вебзастосунків, розглянуто їх переваги та недоліки. Запропоновано модифікований програмний метод керування локальним станом даних вебзастосунку для створення застосунків в екосистемі фреймворку React, що дозволяє в середньому зменшити час виконання програми на 17 %, порівнюючи кожний зі сценаріїв тестування наявних програмних методів. Виконано аналіз розглянутих програмних методів та оцінювання якості сканованого коду за допомогою утиліти SonarQube. Для аналізу та оцінювання результатів роботи розглянутих методів використано утиліту браузера Google Chrome – DevTools. Надалі напрямами дослідження є аналіз програмної складності методів з використанням метрик Cyclomatic Complexity та Cognitive Complexity, аналіз кожного файлу, що пов’язаний з використанням інструментів бібліотеки, тестування даних метрик з використанням запропонованого методу.

- [11] Бурчак, П. В. Методи оптимізації зберігання та обробки даних вебзастосунків: магістерська дис.: 121 Інженерія програмного забезпечення / Бурчак Павло Володимирович. – Київ, 2022. – 117 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/51091>

P.V. Burchak, L.M. Oleshchenko

SOFTWARE METHODS ANALYSIS OF OPTIMIZING THE LOCAL STATE OF DATA WEB APPLICATIONS MANAGEMENT

Background. The relevance of research on optimizing the management of the local data state of web applications is to ensure high performance, efficient use of resources, ensure user satisfaction and adapt to the growing requirements of the modern web environment. The use of various libraries often leads to a decrease in the speed of the web application and the complexity of the execution of the program code. The object of this study is the process of storing and managing the data of the client part of the web application, the subject of the research is the software methods of managing the local state of the data of the web application.

Objective. The goal of the article is the reduction in the data processing time of web applications relative to existing software methods.

Methods. The main idea of the proposed method is to use an atomic approach to the state of the web application data. Having an arbitrary entity, in the general state of the web application, a state fragment is created that is responsible only for this entity. Such a fragment is independent of other state fragments and can only work with the encapsulated entity. Using encapsulation, the configuration of an entity is passed to the React Context API as an object containing data and functions that modify it.

Results. The developed framework method was compared with popular state management libraries Redux, MobXState-Tree and Recoil. Comparing each of the test scenarios in a percentage ratio, an average decrease in program execution time by 17 % was obtained.

Conclusions. The Redux, MobXState-Tree, and Recoil libraries were selected for the research of software methods. The analysis of methods was performed using the SonarQube utility. To evaluate the results of the software methods, the Google Chrome browser utility DevTools was used. The proposed optimized software method allows to reduce the data processing time and optimize the state management of web applications.

Keywords: software method, web application, optimization, local state of data, Redux, MobXState-Tree, Recoil.

Рекомендована Радою
Факультету прикладної математики
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
22 січня 2022 року

Прийнята до публікації
27 червня 2022 року

DOI: 10.20535/kpissn.2022.1-2.270358

УДК 620.22

¹Копилов В.І., ¹Кузін О.А., ², ³Кузін М.О.¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»² Національний університет «Львівська політехніка»³ Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз

*corresponding author: Kuzin N.O. kuzin.nick81@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУРИ ПОВЕРХОНЬ ПОДІЛУ В СТАЛЯХ ПІД ЧАС ОТРИМАННЯ ВИРОБІВ ІЗ ЗАДАНИМ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ

Проблематика. Розвиток цифрового машинобудування вимагає розробки і використання міждисциплінарних концепцій і моделей поведінки неоднорідних полікристалічних матеріалів у разі дії технологічних і експлуатаційних навантажень. У зв'язку із цим набуває важливого значення розроблення й використання підходів до моделювання та аналізу механічної поведінки граничних зон поділу виробів із врахуванням їх енергії. Розроблення таких підходів дозволяє вирішувати актуальну науково-технічну проблему – оптимізацію режимів технологічних обробок виробів із заданим життєвим циклом.

Мега дослідження. Використання системних моделей структури сталей для розроблення обчислювальних схем та методів управління структурно-енергетичним станом поверхонь поділу структурних складових під час отримання виробів з підвищеними параметрами надійності з урахуванням умов їх експлуатації.

Методика реалізації. Аналіз структури проводився з використанням концепції інваріантного моделювання, результатів металографічних і фактографічних досліджень, електронної мікроскопії. Виконано оцінювання структурно-енергетичного стану поверхонь поділу зерен після іонно-плазмового травлення зразків, проведено випробовування на зношування і ударний згин, здійснено системне комп'ютерне моделювання властивостей полікристалічних систем за допомогою відкритого пакета скінченно-елементного аналізу FEniCS на мові Python.

Результати дослідження. Під час застосування енергетичного опису континуальних нелокальних середовищ встановлено, що залежно від кутів між границями у стиках зерен змінюється структурно-енергетичний стан цієї області та її здатність до утворення мікроефектів. За величини кутів у межах 140°–180° формуються зони з високою спроможністю до утворення міжзеренних пошкоджень і руйнування під дією навантаження. Показано, що інтенсивність зношування і міжзеренне руйнування в разі удару зростає залежно від кількості потрійних стиків, в яких границі суттєво різняться за рівнем енергії. Сталь 40X (5135 Steel) є більш чутливою до утворення потрійних стиків з високим градієнтом енергії під час термічної обробки, ніж сталі, що містять нікель, молібден і кремній.

Висновки. На основі ієрархічного моделювання будови полікристалів запропоновано нові підходи і створено алгоритм для визначення взаємозв'язків між структурою поверхонь поділу сталей і їх експлуатаційною надійністю. Розсіяні пошкодження утворюються на поверхнях поділу між потрійними стиками зерен з високим градієнтом енергії. Зменшення частки потрійних стиків, які суттєво різняться за величиною енергії під час проектування технологічних режимів процесів гартування і відпуску, дозволило на 48–53 % підвищити опір зношуванню покращуваних сталей.

Ключові слова: покращувані сталі, термічна обробка, зернограничне конструювання структури, інтеркристалічне руйнування.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями.

Отримання виробів із заданим життєвим циклом вимагає проектування техноло-

гій, що спрямовані на управління механічними властивостями зовнішніх поверхонь і границь поділу структурних складових сплавів. У зв'язку із цим актуальними стають проблеми моделювання, розрахунку та оптимізації процесів створення поверхонь поділу із заданими тер-

Пропозиція для цитування цієї статті: Копилов В.І., Кузін О.А., Кузін М.О., «Застосування моделей структури поверхонь поділу в сталях при отриманні виробів із заданим життєвим циклом», *Наукові вісті КПИ*, № 1–2, с. 76–81, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.270358

Offer a citation for this article: Viacheslav I. Kopylov, Oleg A. Kuzin, Mykola O. Kuzin “Application of models of the structure of separation surfaces in steels when obtaining products with a given life cycle”, *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 76–81, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.270358

модинамічними і фізичними характеристиками [1–3].

У багатьох випадках руйнування конструкцій під дією силових навантажень відбувається внаслідок появи пошкоджень на границях і потрійних стиках зерен. Прогнозування поведінки полікристалів вимагає встановлення взаємозв'язку між структурою, енергетичними параметрами поверхонь поділу зерен, фізичними властивостями і факторами, що визначають опір утворенню міжзеренних пошкоджень.

Моделі, які використовують у наш час, не дозволяють окремо визначати внесок структурно-енергетичного стану границь зерен і їх потрійних стиків на міжзеренне руйнування сплавів. Бракує методології кількісного оцінювання ролі таких елементів структури в утворенні міжзеренних пошкоджень і інтеркристалітному руйнуванні виробів.

Тому виникла потреба розробки, а також і застосування системних методів і моделей, що придатні для вирішення таких складних завдань міждисциплінарного характеру, як керування структурно-енергетичним станом внутрішніх поверхонь поділу з метою підвищення опору до утворення міжзеренних пошкоджень і тріщин виробів. Застосування вже розроблених моделей і підходів дозволяє вирішувати актуальну науково-технічну проблему підвищення міцності та довговічності металічних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з розглянутої проблеми

Створення виробів із заданим життєвим циклом на основі комп'ютеризації всіх етапів їх проектування, виробництва та експлуатації проводиться з використанням методів інженерії границь зерен і зернограничного конструювання структури сплавів [4, 5]. При цьому поверхні поділу зерен виступають одними з визначальних елементів структури сплавів, які обумовлюють їх фізико-механічні та експлуатаційні властивості [6].

Аналіз літературних джерел показав, що недостатня вивченість ролі структурно-енергетичного стану границь і потрійних стиків зерен у поведінці деталей під дією зовнішніх навантажень зменшує можливість розробки та оптимізації технологій підвищення їх життєвого циклу. Теоретико-методологічний інструментарій, що описує кінетику змін матеріалу на поверхнях поділу структурних складових, подають у вигляді феноменологічних залежностей, тому

їх складно використовувати для вибору оптимальних технологічних режимів обробки сплавів. Підвищення опору до утворення розсіяних і локалізованих пошкоджень вимагає кількісної оцінки зміни структури поверхонь поділу під час технологічних процесів отримання виробів.

Формування мети статті

Фізичне обґрунтування формування внутрішніх поверхонь поділу із заданим структурно-енергетичним станом, який забезпечує підвищення фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів, оцінювання внеску структурно-енергетичного стану границь зерен і їх потрійних стиків на міжзеренне руйнування сплавів.

Методи дослідження

У роботі використано загальну системну методологію, згідно з якою було розглянуто складну ієрархічну будову досліджуваних сплавів. Аналіз структури проводили на основі концепції інваріантного моделювання [2–4, 7]. Виконано оцінювання структурно-енергетичного стану поверхонь поділу зерен після іонно-плазмового травлення зразків. Визначали мікротвердість, ЛМ-твердість, зносотривкість, проводили механічні випробовування на розтяг та ударний згин за температури від -196 °C до $+100$ °C. Здійснено системне комп'ютерне моделювання властивостей полікристалічних сплавів з використанням відкритого пакета скінчено-елементного аналізу FEniCS на мові Python [8].

Виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих результатів

Важливе значення у проектуванні технологій формування структурно-енергетичного стану поверхонь поділу має встановлення зв'язку між результатами цифрового подання структури сплавів і моделями їх поведінки. Моделювання має важливе значення для використання досягнень теоретичного й обчислювального матеріалознавства під час впровадження інноваційних технологій у машинобудуванні.

У роботах [2, 7] подано низку підходів щодо моделювання структури внутрішніх поверхонь поділу під час вибору режимів термічної обробки сталей. Алгоритм використання таких методів моделювання наведено на рис. 1.

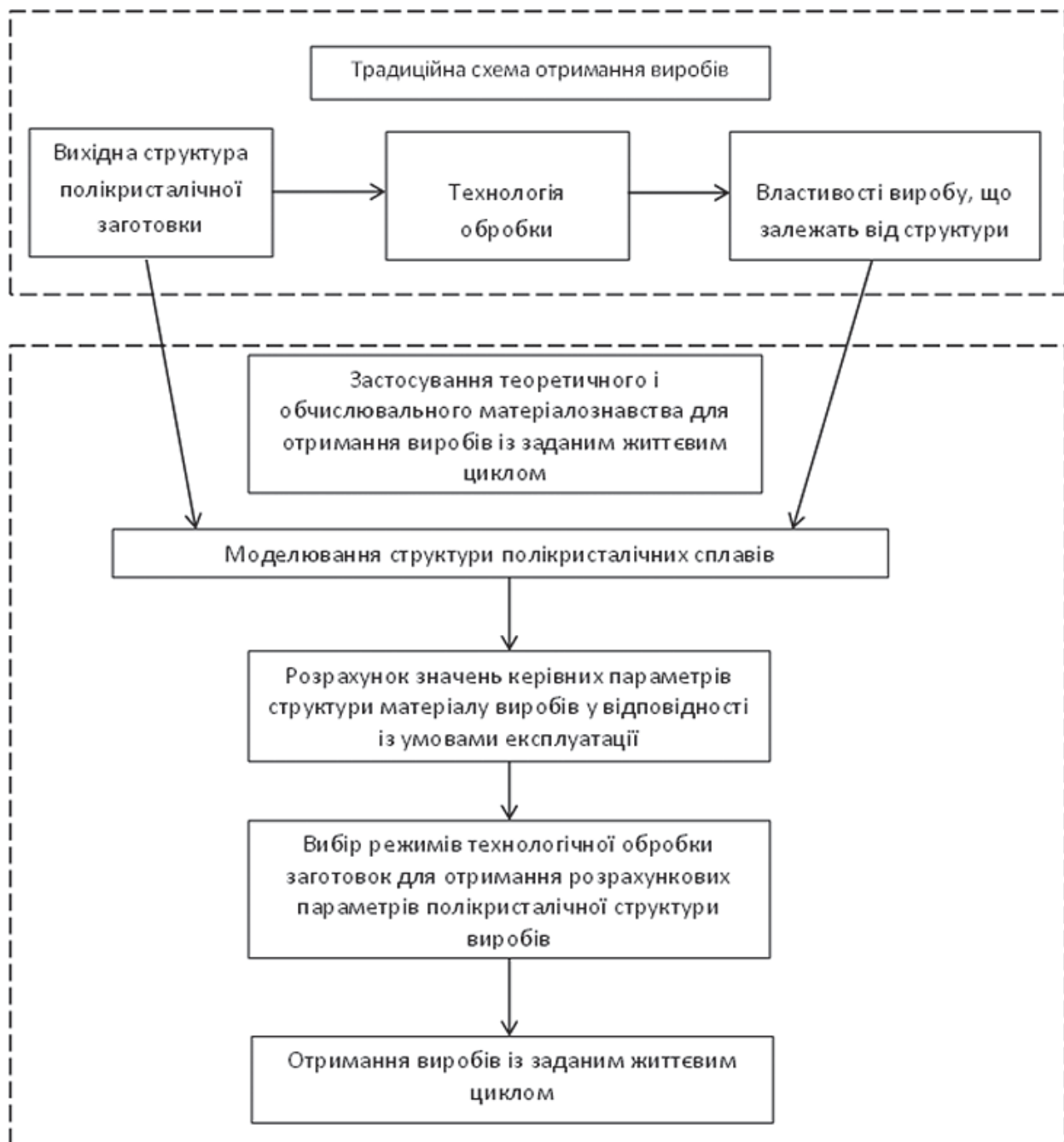


Рис. 1. Використання методів моделювання структури для управління властивостями поверхонь поділу зерен покращуваних сталей

На відміну від традиційної схеми, отримання виробів із заданим життєвим циклом передбачає застосування методів моделювання структури, з використанням яких можна розраховувати значення її керівних параметрів, що відповідають умовам експлуатації, а також вибирати режими технологічної обробки заготовок для отримання розрахункових параметрів.

Більшість сплавів, з яких виготовляють деталі машин, являють собою полікристалічні системи. Моделювання структури вимагає встановлення закономірностей впливу енергії поверхонь поділу структурних складових на їх експлуатаційну надійність.

Особливості моделювання металічних матеріалів пов'язані з їх будовою на різних масштаб-

них рівнях – нано-, мікро-, мезо- та макроскопічному. На нанорівні моделювання проводять з використанням підходів молекулярної динаміки, на макрорівні – методом скінченних елементів. Для аналізу будови зерен та їх взаємодій застосовують ієрархічні методи, які перебувають на початку свого розвитку, що пов'язано зі складністю врахування впливу кількісних параметрів, що оцінюють відгук полікристалів під дією навантаження, у багаторівневих моделях структури сплавів.

Досліджувані сталі 40X, 40HM, 40XC характеризуються обмеженою зварюваністю, схильністю до утворення тріщин під час утворення нероз'ємних з'єднань у виробках та їх експлуатації і широко застосовуються для виготовлення залізничних конструкцій. В умовах технологічної дії і відновлювальних ремонтів деталей за рахунок активації дифузійних процесів можливий перерозподіл легуючих і домішкових елементів між тілом і поверхнями поділу зерен. Водночас їх вплив на структурно-фазовий стан поверхонь поділу зерен вивчений недостатньо. Недослідженими залишаються питання їх ролі в накопиченні пошкоджень та інтеркристалітному руйнуванні під дією навантажень.

З використанням розроблених підходів до моделювання структури внутрішніх поверхонь поділу побудовано модель, що описує вплив енергії поверхонь поділу зерен на здатність до утворення міжзеренних пошкоджень під дією зовнішнього навантаження [2, 7]. Показано використання розробленої моделі для передбачуваної діагностики поведінки покращуваних сталей в умовах контактних і динамічних навантажень. Зміна стану поверхонь поділу структурних складових досягала термічною

обробкою заготовок – гартуванням від температур 860–1050 °С та умовами відпуску.

Дослідженнями встановлено, що у сталях з підвищенням температури гартування до 950 °С формується різнозернистість. Через наявність зерен різних розмірів зростає частка поверхонь поділу в сорбіті з більшим значенням зернограничної енергії, які розміщені в потрібних стиках напроти гострих кутів. Для сталі 40X їх кількість за витримки під час гартування 30 хв становить 3,3 %, а 80 хв – 16,67 % (табл. 1).

Дослідження зносотривкості сталі показали, що з підвищенням температури до 950 °С інтенсивність зношування зростає на 16 %, а після гартування від 1050 °С знижується на 20 % порівняно зі зразками, які загартовані від 860 °С за витримки 30 хв. Збільшення часу витримки під гартування до 80 хв сприяє росту інтенсивності зношування сталі на 46 % після гартування від 950 °С. Підвищення зносотривкості сталі після гартування від 1050 °С значною мірою пов'язане зі зменшенням кількості локальних об'ємів структури з високим градієнтом зернограничної енергії.

Під дією контактних навантажень міжзеренні пошкодження переважно виникають у локальних зонах, енергія яких наближена до поверхневої. Такими зонами є границі, які розміщені між потрібними стиками з підвищеним градієнтом енергії [3, 9, 10]. Тому площу таких границь вводили в цифрове наповнення ієрархічних моделей, які описують вплив полікристалічної структури на контактну довговічність сталі (рис. 2).

Результати визначення матричного параметра структури покращеної сталі 40X, що загартована від різних температур, показали суттєвий вплив розміру зерен і енергетичного стану їх поверхонь поділу на зносотривкість сталі.

Таблиця 1 Частка кутів між границями в потрібних стиках зерен сталі 40X після гартування і відпуску 600 °С

Температура гартування	Час витримки під гартування, хв	Діапазон кутів між границями в потрібних стиках зерен, градуси						
		40°	61°	81°	101°	121°	141°	161°
	
		60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°
Частка в загальній кількості заміряних кутів, %								
860 °С	30	0,00	3,33	16,67	30,00	36,67	13,33	0,00
	80	0,00	0,00	13,33	30,00	53,33	3,33	0,00
900 °С	30	0,00	3,33	10,00	46,67	26,67	13,33	0,00
	80	0,00	6,67	6,67	36,67	40,00	10,00	0,00
950 °С	30	3,33	3,33	10,00	30,00	33,33	16,67	3,33
	80	10,00	3,33	10,00	20,00	20,00	16,67	16,67
1050 °С	30	0,00	3,33	6,67	40,00	43,33	6,67	0,00
	80	0,00	6,67	16,67	20,00	40,00	16,67	0,00

Збільшення інтенсивності зношування відбувається за наявності стиків з високим градієнтом зернограничної енергії, кути між границями в яких перебувають у діапазоні від $40\text{--}60^\circ$ до $161\text{--}180^\circ$ (табл. 1).

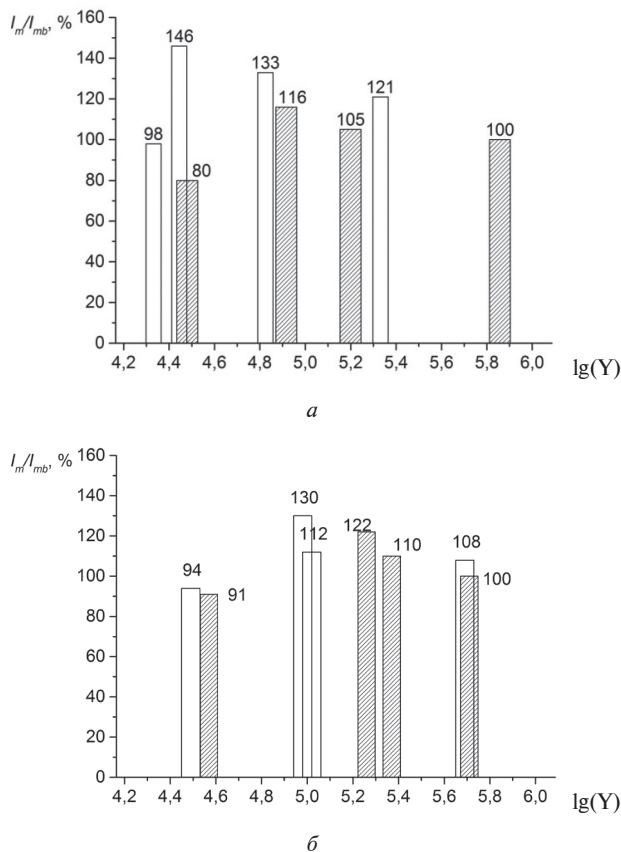


Рис. 2. Залежність відносного зношування (I_m/I_{mb}) від матричного параметра структури (Y) сталей 40X (а) і 40XNM (б). (За I_{mb} взято масову інтенсивність зношування після гартування від 860°C з витримкою 30 хв і відпуском за 600°C : заштрифоваха область – витримка під час нагрівання під гартування 30 хв; незаштрихована область – витримка під час нагрівання під гартування 80 хв)

Дослідження сталей після випробувань на ударний згин показали, що частка міжзеренного руйнування зростає зі збільшенням кількості потрійних стиків зерен, в яких границі суттєво різняться за рівнем енергії (рис. 3).

Література

- [1] D.L. McDowell *et al.* *Integrated design of multiscale, multifunctional materials and products*. Oxford: Elsevier, 2009. 392 p.
- [2] V. Kopylov, O. Kuzin, and N. Kuzin, “Improving contact durability of polycrystalline systems by controlling the parameters of large angle grain boundaries”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No 5/12 (101), pp. 14–22, 2019. doi: 10.15587/1729-4061.2019.181441

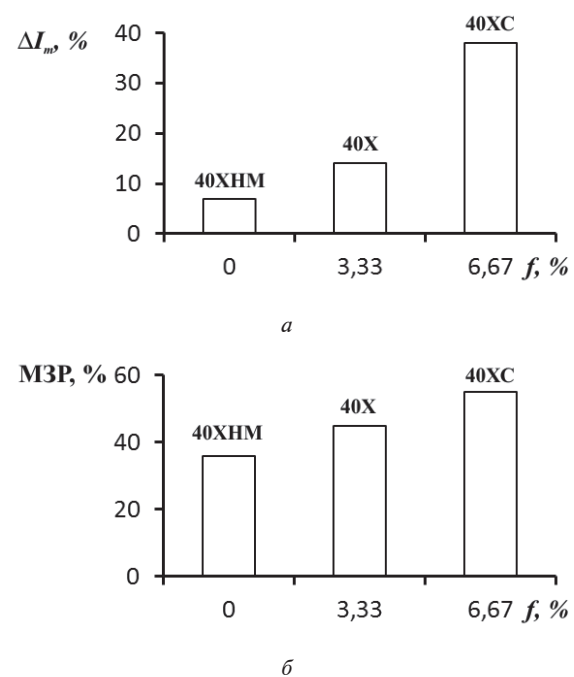


Рис. 3. Залежність приросту інтенсивності зношування (а) і кількості міжзеренного руйнування за температури напівкрихкості (б) після окрихчувальної обробки покращених сталей 40X, 40XNM, 40XC від частки потрійних стиків з високим градієнтом енергії границь зерен (сталі гартували від температури 860°C)

Висновки

На основі використання інваріантних моделей проведено кількісне оцінювання впливу розміру зерен, потрійних стиків і зернограничної енергії на опір сталей інтеркристалітному сколюванню. Встановлені параметри мікроструктури покращуваних сталей, за яких зростає їх зносотривкість, зменшується частка міжзеренного злому в умовах крихкого руйнування.

Показано, що важливе значення у процесах утворення міжзеренних пошкоджень і руйнування відіграє структурно-енергетичний стан поверхонь поділу і потрійних стиків зерен. Інтенсивність зношування і міжзеренне руйнування під час удару зростає відповідно до збільшення частки потрійних стиків зерен, в яких границі зерен суттєво різняться за рівнем енергії.

- [3] O. Kuzin, B. Lukiyanets, and N. Kuzin, “Continual description of polycrystalline systems taking into account their structure”, *Technological audit and production reserves*, No 1/1 (45), pp. 25–30, 2019. doi: 10.15587/2312-8372.2019.156159
- [4] J. Olofsson, and I.L. Svensson, “Incorporating predicted local mechanical behaviour of cast components into finite element simulations”, *Materials and Design*, No 34, pp. 494–500, 2012. doi: 10.1016/j.matdes.2011.08.029
- [5] George Z. Voyiadjis, *Handbook of Nonlocal Continuum Mechanics for Materials and Structures*. Springer, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-58729-5
- [6] D.L. McDowell, and G.B. Olson, “Concurrent design of hierarchical materials and structures”, *Scientific modeling and simulation*, No 15, pp. 207–240, 2008. doi: 10.1007/978-1-4020-9741-6_14
- [7] “Multiscale Solid Mechanics”, *Strength, Durability, and Dynamics*, Vol. 141, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-54928-2
- [8] V. Kopylov, O. Kuzin, and N. Kuzin, “Application of computational mechanics approaches for increasing of tribosystem operational parameters by using plasma hardening method”, *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, Vol. 20 (1), pp. 61–70, 2021. doi: 10.17512/jamcm.2021.1.06
- [9] E. Weinan, *Principles of Multiscale Modellnig*, Cambridge University Press, 2011.
- [10] Camargo, P.H.C. David R. Gaskell, and David E. “Laughlin: Introduction to the Thermodynamics of Materials”. *J Mater Sci*, No 53, pp. 9363–9367 (2018). doi: 10.1007/s10853-018-2265-9

¹Viacheslav O. Kopylov, ¹Oleg A. Kuzin, ^{2,3}Mykola O. Kuzin

APPLICATION OF MODELS OF THE STRUCTURE OF SEPARATION SURFACES IN STEELS WHEN OBTAINING PRODUCTS WITH A GIVEN LIFE CYCLE

Background. The development of digital mechanical engineering requires the development and use of interdisciplinary concepts and models of the behavior of heterogeneous polycrystalline materials under the influence of technological and operational loads. In this regard, the development and use of approaches to modeling and analysis of the mechanical behavior of the boundary zones of separation of products, taking into account their energy, becomes important. The development of such approaches makes it possible to solve an actual scientific and technical problem – optimization of the modes of technological processing of products with a given life cycle.

Objective. The use of system models of the structure of steels for the development of computational schemes and methods of managing the structural-energy state of the separation surfaces of structural components when obtaining products with increased reliability parameters, taking into account the conditions of their operation.

Methods. The analysis of the structure was carried out using the concept of invariant modeling, the results of metallographic and factographic studies, electron microscopy. The assessment of the structural and energetic state of grain separation surfaces after ion-plasma etching of the samples was carried out, wear and impact bending tests were carried out, and system computer simulation of the properties of polycrystalline systems was carried out using the FEniCS open finite element analysis package in Python.

Results. When applying the energy description of continuous non-local environments, it was established that depending on the angles between the boundaries at the joints of the grains, the structural and energetic state of this region and its ability to form microdefects change. At angles between 140–180°, zones are formed with a high capacity for the formation of intergranular damage and destruction under load. It is shown that the intensity of wear and intergranular fracture upon impact increases depending on the number of triple joints, in which the boundaries differ significantly in terms of energy level. Steel 40X (5135 Steel) is more sensitive to the formation of triple junctions with a high energy gradient during heat treatment than steels containing nickel, molybdenum and silicon.

Conclusions. On the basis of hierarchical modeling of the structure of polycrystals, new approaches are proposed and an algorithm is created to determine the relationships between the structure of the separation surfaces of steels and their operational reliability. Diffuse damage is formed on the separation surfaces between the triple junctions of grains with a high energy gradient. Reducing the share of triple joints, which differ significantly in terms of energy when designing the technological regimes of the quenching and tempering processes, made it possible to increase the wear resistance of improved steels by 48–53 %.

Keywords: improving steels, heat treatment, grain boundary design of the structure, intercrystalline destruction.

Рекомендована Радою
Навчально-наукового інституту матеріалознавства
та зварювання ім. Є.О. Патона
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
15 грудня 2021 року

Прийнята до публікації
27 червня 2022 року

ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

DOI: 10.20535/kpissn.2022.1-2.287916

УДК 004.852

О.Р. Чертов¹, І.С. Жук¹¹КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*Відповідальний автор: ivan.sergeyevich.zhuk@gmail.com

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ФУТБОЛЬНОГО СЕЗОНУ З МАТЧАМИ
З ФІКСОВАНИМ РЕЗУЛЬТАТОМ

Проблематика. Футбол – це величезна індустрія, порівнянна із традиційними економічними галузями. У числовому виразі це десятки мільярдів доларів. Однією з найважливіших проблем, з якою стикається ця галузь, є договірні матчі (матчі з фіксованим результатом).

Найбільш ефективним способом запобігання цій загрозі є багатосторонній підхід у поєднанні із заходами, спрямованими на розширення потенціалу правоохоронних органів та спортивних організацій. Однією зі складових цього підходу є використання математичних методів виявлення підозрілих щодо фіксованого результату матчів.

Мега дослідження. Метою роботи є розроблення алгоритму моделювання договірних матчів, пов'язаних із заробітком на ставках, з використанням якого формуються матчі, результати яких відмінні від очікуваних і можуть розглядатись як аномальні.

Методика реалізації. Розрахунок ймовірностей забиття голів командами під час гри на основі реальних даних сезону; розроблення імітаційної моделі футбольного сезону без договірних матчів і її аналіз за допомогою статистичного моделювання; розроблення алгоритму моделювання договірних матчів, пов'язаних із заробітком на ставках, і його аналіз.

Результати дослідження. Розроблено імітаційну модель футбольного сезону, яка дозволяє з використанням отриманих на реальних даних ймовірнісних розподілів кількості голів, забитих командами протягом домашніх або виїзних ігор, змодельовати результати матчів, враховуючи силу команд і тип гри, а також змодельовати ситуації «договірного» матчу, замінивши поточні результати. За загальними розподілами типів результатів матчів та різницями голів усіх матчів змодельований сезон є подібним до реального сезону. За критерієм Колмогорова–Смирнова різниця наведених розподілів на рівні значущості 0,001 є статистично незначущою.

Висновки. Розроблену імітаційну модель футбольного сезону можна використовувати для дослідження ефективності методів виявлення підозрілих щодо фіксованого результату матчів і їх порівняльного аналізу.

Ключові слова: футбольний сезон; групування команд; розподіл Пуассона; гістограма різниць голів; тип результату матчу.

Вступ

Футбол – це величезна індустрія, порівнянна з традиційними економічними галузями. У числовому виразі це десятки мільярдів доларів. Однією з найважливіших проблем, з якою стикається ця галузь, є договірні матчі (матчі з фіксованим результатом). Корупція і причетність до транснаціональної організованої злочинності підривають довіру до результатів та дискредитують репутацію спортивних змагань. Крім того, величезні доходи, отримані внаслідок проведення договірних матчів, можуть бути використані для фінансування інших незаконних видів діяльності [1].

Найбільш ефективним способом запобігання цій загрозі є багатосторонній підхід у поєднанні із заходами, спрямованими на розширення потенціалу правоохоронних органів та спортивних організацій [1]. Однією із складових цього підходу є використання математичних методів виявлення підозрілих щодо фіксованого результату матчів.

Відомі методи прогнозування результату матчу за рахунок аналізу ставок на матч чи аналізу дій футболістів на полі використовують велику кількість даних, які не завжди доступні [2–5]. Для подолання цього обмеження може бути застосовано метод виявлення підозрілих

Пропозиція для цитування цієї статті: О.Р. Чертов, І.С. Жук, “Імітаційна модель футбольного сезону з матчами з фіксованим результатом”, *Наукові вісті КПІ*, № 1–2, с. 82–94, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.287916

Offer a citation for this article: O. R. Chertov, I. S. Zhuk, “Soccer season simulation with fixed matches”, *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 82–94, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.287916

на фіксований результат матчів на основі конформних предикторів і степеневих мартингалів, який використовує загальнодоступні публічні дані. Апарат конформних предикторів та степеневих мартингалів був використаний у роботах [6-7] для розробки методів виявлення як точкових, так і групових аномалій, які не вимагають знання про розподіл даних.

Для дослідження ефективності методів виявлення підозрілих щодо фіксованого результату матчів і їх порівняльного аналізу необхідно розробити імітаційну модель футбольного сезону, що враховує наявність матчів з фіксованим результатом.

Розрізняють два типи матчів з фіксованим результатом: пов'язані з підкупом команд з метою заробітку на ставках у букмекерських конторах і що ставлять за мету турнірні цілі [8, 9]. Важливо зазначити, що саме перший тип договорних матчів пов'язаний із криміналом, незаконним збагаченням й викликає максимальну тривогу ФІФА та ООН [1].

Алгоритми формування договорних матчів різних типів різняться між собою логікою. Для руху по турніру достатньо домовлятися про мінімальні й неаномальні результати, що сприяють підвищенню місця команди в загальнокомандному рейтингу. Це не має бути публічно помітним і зазвичай не пов'язано зі ставками.

Договірні матчі, пов'язані з метою заробітку на ставках, мають завдання отримати результат матчу, відмінний від очікуваного, щоб максимально заробити на цьому. Чим неймовірнішим буде результат, тим більше можна заробити на ставці.

У роботі розроблено алгоритм моделювання договорних матчів, пов'язаних із заробітком на ставках, з використанням якого формуються матчі, результати яких відмінні від очікуваних і можуть розглядатись як аномальні.

Постановка задачі

Метою роботи є розроблення алгоритму моделювання договорних матчів, пов'язаних із заробітком на ставках, з використанням якого формуються матчі, результати яких відмінні від очікуваних і можуть розглядатись як аномальні.

Початкові дані та припущення (обмеження) задачі

Початковими даними є реальний сезон. Він складається із двох таблиць: таблиці матчів і таблиці команд. Параметри цих таблиць описа-

но у табл. 1 і табл. 2 відповідно. У таблиці матчів дані упорядковано за датою проведення матчу D_k , а в таблиці команд – за кількістю набраних очок $p(t_i)$. Параметри табл. 2 – загальні очки команд, кількість виграних, нічийних та програєних матчів – можна порахувати із таблиці матчів (табл. 1).

Таблиця 1. Опис параметрів таблиці матчів

k	Номер матчу
D_k	Дата проведення матчу
h_k	Назва команди-господаря матчу
o_k	Назва команди-гості матчу
α_k	Кількість голів, забитих командою h_k
β_k	Кількість голів, забитих командою o_k

Таблиця 2. Опис параметрів турнірної таблиці

i	Номер команди
t_i	Назва команди
$p(t_i)$	Загальні очки команди
$w(t_i)$	Кількість ігор команди, які завершилися перемогою цієї команди
$d(t_i)$	Кількість ігор команди, які завершилися нічиєю
$l(t_i)$	Кількість ігор команди, які завершилися поразкою цієї команди
$group(t_i)$	Ранг команди (група, до якої належить команда)

Як реальний сезон було обрано сезон 2013–2014 років Ліги II Франції, для якого в судовому порядку було доведено наявність договорних матчів [10, 11].

Команди реального сезону поділено на чотири групи (табл. 3). Принцип групування є таким: перший кластер формується з $M + 1$ перших команд сезону, останній кластер формується з $L + 1$ останніх команд сезону. Числа M і L обираються із правил підвищення або пониження у класі. Для Ліги II Франції $M = 3$ та $L = 3$. Інші команди розбиваються на 2 групи: перша група складається з команд, близьких до команд першого кластера, друга група – з команд, близьких до команд останнього кластера. Для отримання цих двох груп у межах поточного дослідження було використано алгоритм 2-середніх [12]. Результати групування команд цього сезону показано в табл. 3. Певні групи команд табл. 3 оформлені окремими кольорами: світло-червоним кольором оформлено команди кластера № 1, зеленим кольором – команди кластера № 2, жовтим – команди кластера № 3, білим – команди кластера № 4.

Таблиця 3. Групування команд сезону 2013–2014 років Ліги II Франції

№ команди в загальному заліку	Назва команди	Кількість набраних очок	Кількість перемог	Кількість нічиїх	Номер кластера, ранг
1	'Metz'	76	22	10	1
2	'Lens'	65	17	14	1
3	'Caen'	64	18	10	1
4	'Nancy'	61	16	13	1
5	'Niort'	58	15	13	2
6	'Dijon'	57	14	15	2
7	'Brest'	56	15	11	2
8	'Angers'	55	14	13	2
9	'Tours'	55	15	10	2
10	'Troyes'	52	15	7	3
11	'Creteil'	50	12	14	3
12	'Le Havre'	48	11	15	3
13	'Arles-Avignon'	46	10	16	3
14	'Clermont'	45	10	15	3
15	'Nimes'	44	10	14	3
16	'Auxerre'	43	10	13	3
17	'Laval'	42	10	12	4
18	'Chateauroux'	40	10	10	4
19	'Istres'	36	9	9	4
20	'CA Bastia'	24	4	12	4

На основі таблиці матчів і таблиці команд реального сезону обчислюють частоти голів, що їх забивають команди у матчі. Для кожної команди, обчислюють два типи частот. Перший тип частот (домашній) $v(X_i | \text{group}(t_j) = g)$ – це частоти того, що команда t_i заб'є $X_i = x_i$, $x_i = \overline{0, K_i}$ голів на власному полі за умови, що команда супротивника t_j належить до групи g . Другий тип частот (виїзний) $v(Y_j | \text{group}(t_i) = d)$ – це частоти того, що команда t_j заб'є $Y_j = y_j$, $y_j = \overline{0, K_j}$ голів на виїзді за умови, що команда супротивника t_i належить до групи d . У цих формулах під K_i і K_j розуміємо максимальну кількість голів в аналізованому реальному сезоні, які, відповідно, забила команда t_i в домашніх іграх та команда t_j у виїзних іграх. Таким чином, для кожної команди отримуємо чотири множини частот першого типу і чотири множини частот другого типу. На основі отриманих частот розраховують параметри теоретичних законів розподілу ймовірностей забиття голів командами під час їх гри з іншими командами відповідного рангу.

Вхідними даними алгоритму моделювання сезону є:

– N команд реального сезону з атрибутами, описаними в табл. 2;

– $P_g(X_i) = P(X_i | \text{group}(t_j) = g)$, $g = \overline{1, 4}$, $i, j = \overline{1, N}$ – ймовірність того, що команда t_i заб'є $X_i = x_i$, $x_i = \overline{0, K_i}$ голів на власному полі за умови, що команда супротивника t_j належить до групи g ;

– $\tilde{P}_d(Y_j) = P(Y_j | \text{group}(t_i) = d)$, $d = \overline{1, 4}$, $i, j = \overline{1, N}$ – ймовірність того, що команда t_j заб'є $Y_j = y_j$, $y_j = \overline{0, K_j}$ голів на виїзді за умови, що команда супротивника t_i належить до групи d .

Результатом роботи алгоритму є модельний сезон, сформований на основі заданого реального сезону футбольного турніру. Модельний сезон складається з таблиці матчів (табл. 1) та турнірної таблиці сезону (табл. 2).

Припущення алгоритму є такими:

- 1) кількість голів, які команда-господарка заб'є під час гри, має розподіл Пуассона;
- 2) номер і групу команди розглядають як попередні оцінки її сили.

Розв'язання сформульованої задачі розглянемо в такій послідовності:

1. Розрахунок ймовірностей забиття голів командами під час гри на основі реальних даних сезону.

2. Розроблення імітаційної моделі футбольного сезону без договірних матчів і її аналіз за допомогою статистичного моделювання.

3. Розроблення алгоритму моделювання до-говірних матчів, пов'язаних із заробітком на ставках, і його аналіз.

Розрахунок ймовірностей забиття голів командами під час гри на основі реальних даних сезону

Однією з найбільш поширених моделей для прогнозування результату футбольних матчів є розподіл Пуассона [13] – його використовують для розрахунку ймовірностей кількості голів, які команда забиває у матчі. При цьому враховують припущення, що гол є незалежною подією, оскільки він не впливає на ймовірність того, скільки голів буде забито далі.

У розрахунку ймовірностей голів, забитих командою, враховують тип гри – домашня або виїзна, а також силу команди супротивника, тобто до якої групи її віднесено. Алгоритм побудови розподілів Пуассона кількості голів команд сезону складається з таких етапів:

1. Формуємо множину значень голів, забитих командою t_i протягом ігор сезону. Отримуємо множину $G_i^{(g)} = \{k_i^{(g)}, k_i^{(g)} + 1, \dots, K_i^{(g)}\}$ де $k_i^{(g)}$ та $K_i^{(g)}$ – відповідно мінімальна та максимальна кількість голів, забитих командою t_i протягом усіх її домашніх ігор сезону, в яких команда-суперник t_j належала до групи g .

2. $\forall k \in G_i^{(g)}$ для кожного зі значень кількості голів k з множини $G_i^{(g)}$ обчислюємо частоту появи кількості голів k як голів, забитих командою t_i протягом ігор сезону, в яких команда t_i була домашньою, а команда-суперник t_j належала до групи g :

$$v_g(X_i = k) = v(X_i = k | \text{group}(t_j) = g) = \frac{|\{m_{ij} | X_i = k, \text{group}(t_j) = g\}|}{|\{m_{ij} | \text{group}(t_j) = g\}|},$$

де m_{ij} – матч між командами (t_i, t_j) , де t_i є домашньою командою матчу, а t_j є виїзною командою матчу; $\{m_{ij} | X_i = k, \text{group}(t_j) = g\}$ – множина, що містить лише ті домашні матчі команди t_i , в яких вона забила $X_i = k$ голів і суперник t_j належав до групи g ; $\{m_{ij} | \text{group}(t_j) = g\}$ – множина, що містить усі домашні матчі команди t_i , у яких суперник t_j належав до групи g , а знак модуля над множиною підраховує кількість елементів у цій множині.

Відносні частоти $\check{v}_d(Y_j = k)$ дискретної випадкової величини кількості голів Y_j , забитих командою t_j протягом ігор сезону, в яких команда t_j була виїзною, обчислюють аналогічно:

$$\check{v}_d(Y_j = k) = v(Y_j = k | \text{group}(t_i) = d) = \frac{|\{m_{ij} | Y_j = k, \text{group}(t_i) = d\}|}{|\{m_{ij} | \text{group}(t_i) = d\}|},$$

де $\{m_{ij} | Y_j = k, \text{group}(t_i) = d\}$ – множина, що містить лише ті виїзні матчі команди t_j , в яких вона забила $Y_j = k$ голів, і суперник t_i належав до групи d ; $\{m_{ij} | \text{group}(t_i) = d\}$ – множина, що містить усі виїзні матчі команди t_j , в яких суперник t_i належав до групи d .

3. Згідно з оцінкою за методом максимальної правдоподібності, параметр $\lambda_i^{(g)}$ розподілу Пуассона для домашніх матчів команди t_i , в яких суперник належав до групи g , визначають за формулою

$$\lambda_i^{(g)} = \sum_{k=0}^{K_i} k \cdot v_g(X_i = k).$$

Параметр $\check{\lambda}_j^{(d)}$ розподілу Пуассона для виїзних матчів команди t_j , в яких суперник належав до групи d , знаходять за формулою

$$\check{\lambda}_j^{(d)} = \sum_{k=0}^{K_j} k \cdot \check{v}_{gd}(Y_j = k).$$

Розподіли Пуассона кількостей забитих голів командою t_i в її домашніх матчах і командою t_j в її виїзних матчах обчислюють за формулами

$$P(X_i = x_i) = \frac{e^{-\lambda_i^{(g)}} \lambda_i^{(g)x_i}}{x_i!};$$

$$\check{P}_d(Y_j = y_j) = \frac{e^{-\check{\lambda}_j^{(d)}} \check{\lambda}_j^{(d)y_j}}{y_j!}.$$

4. Для оцінювання, наскільки гарною є відповідність між фактичною кількістю матчів з тією чи іншою кількістю голів та моделлю Пуассона, використовуємо критерій Хі-квадрат. Для перевірки розподілу ймовірності Пуассона кількості голів у домашніх матчах команди t_i , суперник якої належить до групи g , статистику Хі-квадрат визначаємо за формулою [14]

$$\chi_{i,g}^2 = \sum_{i=0}^n \frac{(v_g(X_i = k) M_i^{(g)} - P_g(X_i = k) M_i^{(g)})^2}{P_g(X_i = k) M_i^{(g)}}$$

де $M_i^{(g)} = |\{m_j | group(t_j) = g\}|$ – кількість усіх домашніх матчів команди t_i , в яких суперник t_j належав до групи g .

Статистику Хі-квадрат для виїзних матчів команди t_j , в яких суперник t_i належав до групи d , знаходять аналогічно.

Критичне значення $\chi_{\alpha}^2(n)$ визначають на рівні значущості $\alpha = 0,05$. Кількість степенів вільності $n = K_i^{(g)} - k_i^{(g)}$.

Якщо виконується умова $\chi_{i,g}^2 \leq \chi_{\alpha}^2(n)$, вважають, що отриманий розподіл досить точно описує випадкову величину.

Якщо розподіл Пуассона неточно описує випадкову величину, можуть бути використані такі розподіли [13]:

- розподіл Пуассона з розширеною кількістю нулів;
- від’ємний біноміальний розподіл;
- геометричний розподіл;
- рівномірний розподіл.

Параметри вказаних розподілів можуть бути знайдені за методом найменших квадратів, методом максимальної правдоподібності або методом моментів. Адекватність отриманих розподілів також перевіряють за критерієм Хі-квадрат.

Розробка імітаційної моделі футбольного сезону

I етап: отримання початкової реалізації модельного сезону

1. Використовуючи функції ймовірності $P_g(X_i)$ та $\tilde{P}_d(Y_j)$, моделюємо результат матчу (t_i, t_j) між командами t_i та t_j .

1.1. Генеруємо початкову кількість голів x_i , забитих командою t_i , як значення випадкової величини з функцією ймовірності $P_g(X_i)$:

$$S_{ix_i} \leq r_i < S_{i(x_i+1)},$$

де

$$S_{in+1} = \sum_{k=0}^n P_g(X_i = k), S_{i0} = 0, S_{i(K_i+1)} = 1,$$

де S_{in} – ймовірність того, що випадкова величина R набуде значення $r_i < S_{in}$; початкове значення кількості голів x_i визначають за нижньою границею S_{ix_i} інтервалу, в який потрапляє випадкове число r_i .

1.2. Враховуючи частоту нічийних матчів домашньої команди в реальному сезоні визначаємо, як завершиться цей матч, – внічию чи ні. Для цього генеруємо бінарну випадкову величину, де «1» відповідає події «матч завершиться внічию», а «0» – «матч завершиться перемогою якоїсь команди», де ймовірність події «1» для команди t_i дорівнює $d(t_i) / (w(t_i) + d(t_i) + l(t_i))$.

1.3. Якщо отримуємо «1», то матч завершується нічиєю і кількість голів, забитих виїзною командою, $y_j = x_i$.

1.4. Якщо отримуємо «0», то генеруємо початкову кількість голів y_j , забиту командою t_j як значення випадкової величини з функцією ймовірності $\tilde{P}_d(Y_j)$. Кількості голів y_j визначають через визначення інтервалу, в який потрапляє значення r_j рівномірно розподіленої на інтервалі $[0; 1]$ випадкової величини R :

$$\check{S}_{jy_j} \leq r_j < \check{S}_{j(y_j+1)},$$

де

$$\check{S}_{jn+1} = \sum_{k=0}^n \tilde{P}_d(Y_j = k), \check{S}_{j0} = 0, \check{S}_{j(K_j+1)} = 1,$$

де \check{S}_{jn} – ймовірність того, що випадкова величина R набуде значення $r_j < \check{S}_{jn}$. Початкове значення кількості голів y_j визначають за нижньою границею \check{S}_{jy_j} інтервалу, в який потрапляє випадкове число r_j . Якщо при цьому $y_j = x_i$, то збільшуємо результат у сильнішої команди на 1 м'яч, тобто якщо $g \leq d$, то збільшуємо x_i на 1, інакше збільшуємо y_i на 1.

2. Повторюємо крок 1 для всіх $N(N-1)$ матчів, де N – це кількість команд, які брали участь у цьому сезоні.

У підсумку маємо модельний сезон футбольного турніру:

$$M = \{m_{ij} = (x_i, y_j), i, j = 1, N, i \neq j\},$$

де x_i є кількістю голів, забитих командою t_i у матчі m_{ij} , y_j є кількістю голів, забитих командою t_j у матчі m_{ij} .

II етап: обчислення очок команд

1. Обчислюємо попередні очки кожної команди $p(t_i)$, $i = 1, N$:

$$p(t_i) = 3w(t_i) + d(t_i);$$

$$w(t_i) = |\{m_{ij} | x_i > y_j\}|;$$

$$d(t_i) = |\{m_{ij} | x_i = y_j\}|.$$

Тут $w(t_i)$ та $d(t_i)$ є, відповідно, кількістю перемог та ігор у нічию для команди t_i .

III етап: групування команд за отриманими очками

Для групування команд модельного сезону використовують ту саму методику, яку було використано для групування команд реального сезону.

Аналіз результатів моделювання футбольного сезону

Спочатку було перевірено якість моделювання сезонів на основі етапів I та II розробленої моделі без спотворення результатів матчів. Для дослідження адекватності запропонованого методу імітаційного моделювання було змодельовано 100 сезонів.

На рис. 1 показано абсолютні частоти типів результатів за класами матчів для реального сезону. Також на рис. 1 подано середні значення абсолютних частот типів результатів за 100 змодельованими сезонами, згруповані за класами матчів. У кожному модельному сезоні використовували групування команд, яке було отримано для команд з реального сезону. Як впливає з рис. 1, у змодельованих сезонах загалом зберігається якісний характер залежностей між кількістю домашніх перемог, нічиїх та домашніх поразок за класами матчів реального сезону.

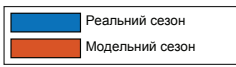
Також було перевірено достовірність різниці між типами результатів змодельованого і реального сезонів для кожного класу матчів за критерієм Колмогорова–Смирнова [15] на рівні значущості $\alpha = 0,001$. Критичне значення статистики $\lambda_\alpha = 1,95$. Результати застосування критерію для кожного класу матчів наведено в табл. 4. Критерій полягає в перевірці такої нульової гіпотези $H_0 : F_r(x) = F_m(x)$, де $F_r(x)$ є емпіричною функцією розподілу вибірки типів результату матчів реального сезону, а $F_m(x)$, відповідно, змодельованого сезону. Гіпотеза H_0 виконується за умови $\lambda \leq \lambda_\alpha$. За обраного рівня значущості для усіх класів матчів різницю між типами результатів змодельованого і реального сезонів було визнано статистично незначущою.

Таблиця 4. Результати перевірки критерію Колмогорова–Смирнова на рівні значущості $\alpha = 0,001$ для встановлення значущості різниці між типами результатів змодельованого і реального сезонів за класами матчів

Клас матчів	Значення статистики λ
[1,1]	0,339
[1,2]	0,598
[1,3]	0,876
[1,4]	0,102
[2,1]	1,319
[2,2]	0,732
[2,3]	0,077
[2,4]	0,495
[3,1]	1,910
[3,2]	0,311
[3,3]	0,442
[3,4]	0,749
[4,1]	1,824
[4,2]	0,777
[4,3]	0,317
[4,4]	0,073

На рис. 2 показано абсолютні частоти типів результатів реального сезону, а також середні значення абсолютних частот типів результатів за 100 змодельованими сезонами. Сумарне відхилення від реального сезону за типами результату матчу у змодельованих сезонах становить 13 %. Перевіримо достовірність різниці двох наведених вибірок різниць голів за критерієм Колмогорова–Смирнова [15] з тим же рівнем значущості $\alpha = 0,001$, що й раніше. Для розглянутих вибірок статистика критерію $\lambda = 0,32$, критичне значення статистики $\lambda_\alpha = 1,95$. Отже, різниця між розглянутими загальними вибірками типів результату матчів є статистично незначущою на рівні значущості $\alpha = 0,001$. Таким чином, за розподілом типів результатів за сезоном змодельований сезон є подібним до реального.

На рис. 3 зображено гістограми різниць голів у матчах реального й одного змодельованого сезонів. Перевіримо достовірність різниці двох наведених вибірок різниць голів за критерієм Колмогорова–Смирнова [15]. Введемо рівень значущості $\alpha = 0,001$. Критерій полягає у перевірці такої нульової гіпотези $H_0 : F_r(x) = F_m(x)$, де $F_r(x)$ є емпіричною функцією розподілу вибірки різниць голів реального сезону, а $F_m(x)$, відповідно, змодельованого сезону. Для розглянутих вибірок статистика критерію $\lambda = 0,58$, критичне значення статистики $\lambda_\alpha = 1,95$. Отже, різниця між розглянутими вибірками різниць голів є статистично незначущою на рівні значущості $\alpha = 0,001$. Таким чином, за розподілом різниць голів усіх матчів змодельований сезон є подібним до реального сезону.



France: Ligue 2, season 2013-2014
 Реальний сезон VS 1-100-й модельні сезони
 середні частоти по групах

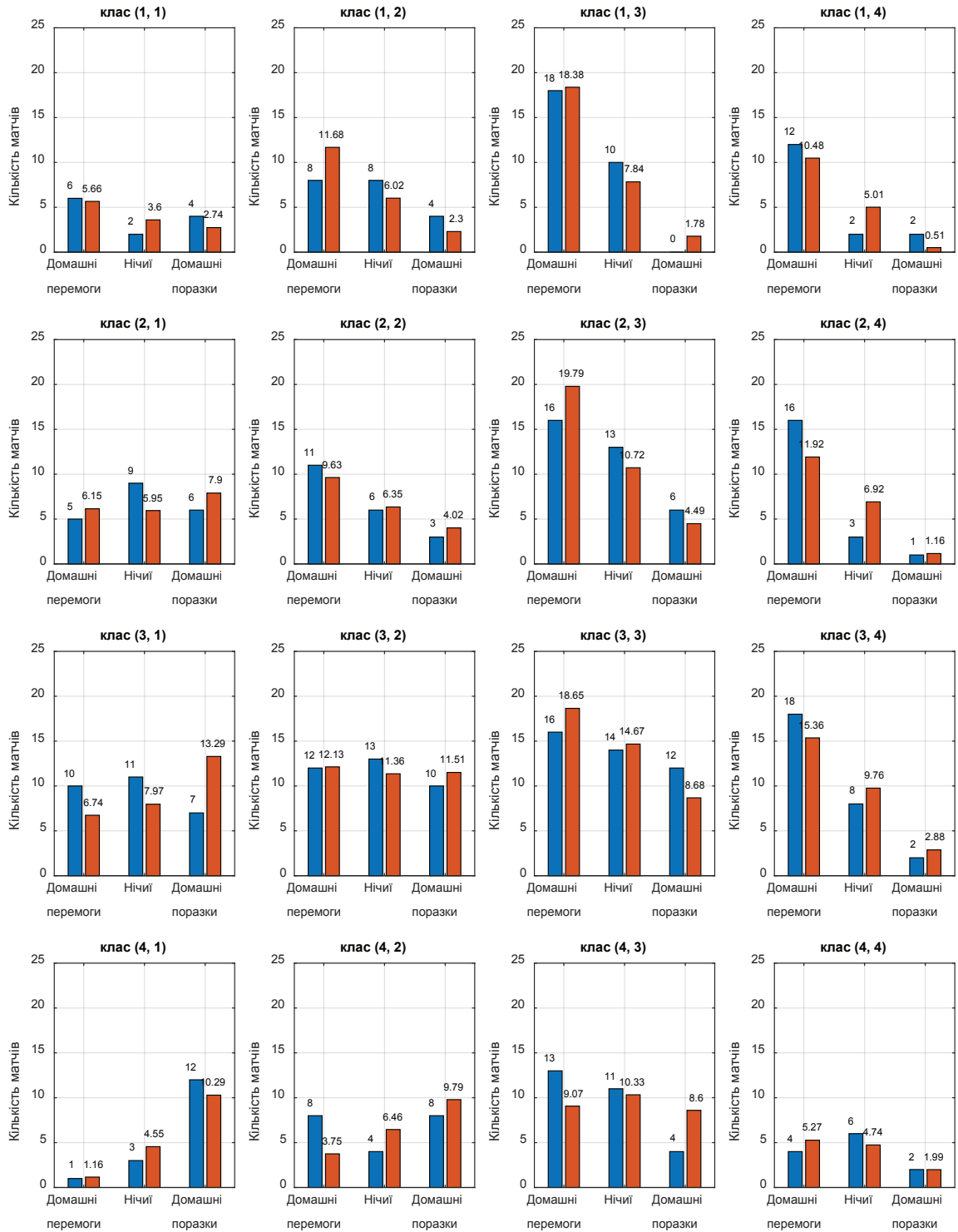


Рис. 1. Розподіл типів результатів матчів за класами матчів у змодельованих сезонах

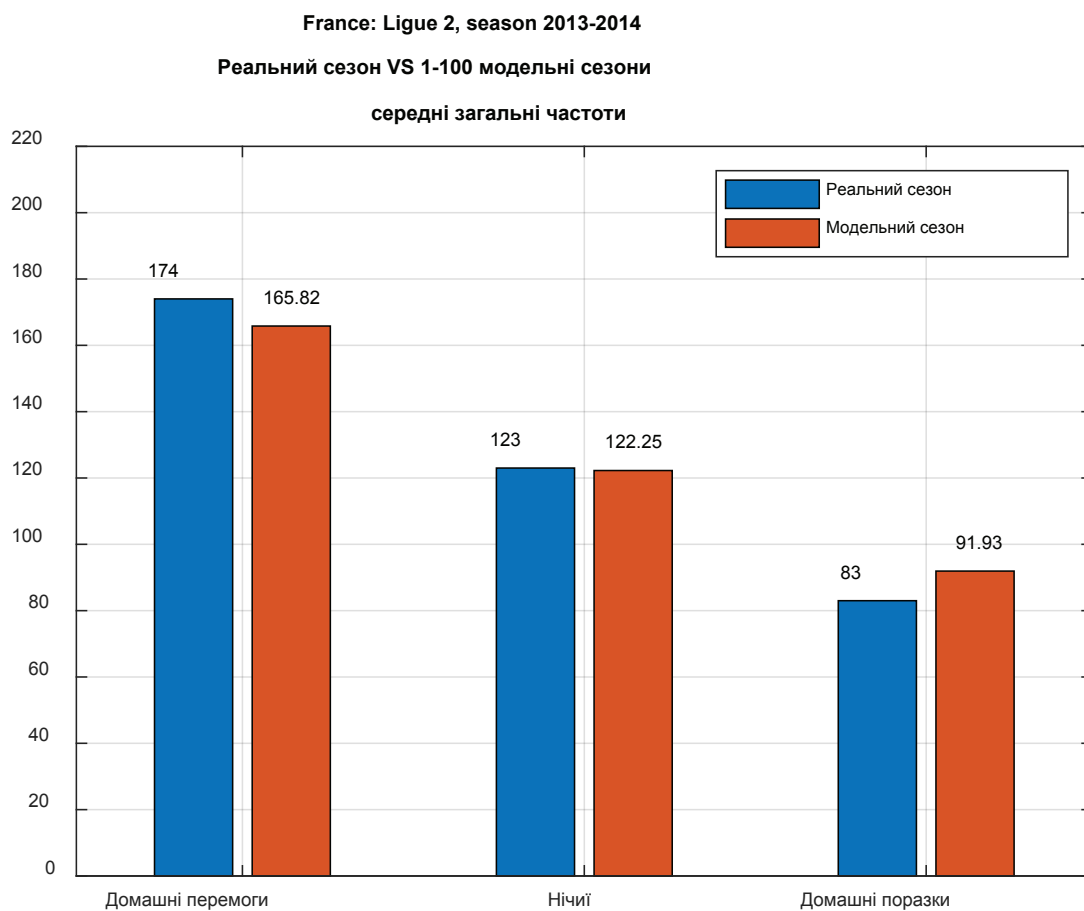


Рис. 2. Розподіл типів результатів матчів загалом у змодельованих сезонах

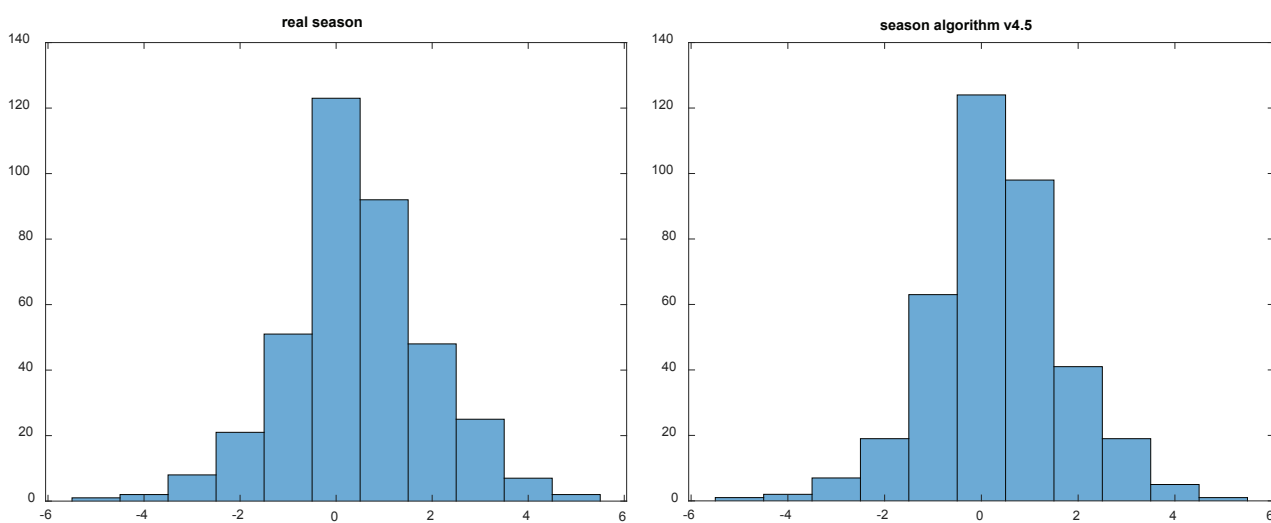


Рис. 3. Розподіл різниць голів реального і змодельованого сезонів

Алгоритм моделювання договірних матчів, пов'язаних із заробітком на ставках

Договірний матч, щоб на ставках на ньому могли заробити зловмисники, має різнитися від очікуваного результату, тобто мати аномальний характер. Це його найважливіша властивість. Тому його значення не повинно перебувати в області очікуваних значень результату матчу, пов'язаних із силою команд. Запропоновано ввести порогове значення ймовірності p_A , яку не мають перевищувати аномальні різниці голів матчів класу i , таким чином, серед яких можуть міститись результати договірних матчів. Значення ймовірності p_A запропоновано обирати в діапазоні $0 < p_A < 0,4$.

Алгоритм моделювання договірних матчів, пов'язаних із заробітком на ставках, складається з таких етапів:

1. З використанням отриманих модельних сезонів турніру будують гістограми різниць голів усіх матчів окремо для кожного класу. Приклади гістограм, отриманих за 100 модельними сезонами, показано на рис. 4. Як впливає з рис. 4, гістограми мають очікувані закономірності в результатах матчів (сильніші команди мають кращі

результати у грі зі слабшими командами; вдома команди грають краще, ніж на виїзді).

2. Використовуючи гістограму різниць голів, збудовану за класами матчів за 100 сезонами, визначають множину нормальних різниць голів $D_{ij}^{(N)}$ за допомогою такого ітераційного алгоритму: спочатку $D_{ij}^{(N)}$ є пустою множиною, тобто $D_{ij}^{(N)} = \emptyset$.

2.1. Обирають значення різниці голів \tilde{d} , яке за гістограмою класу матчів (i, j) має найбільшу частоту появи h_d серед тих значень d , які $d \notin D_{ij}^{(N)}$.

2.2. Додають значення \tilde{d} до множини $D_{ij}^{(N)}$.

2.3. Обчислюють сумарну частоту появи усіх значень із множини $D_{ij}^{(N)}$:

$$p_{ij}^{(N)} = \sum_{d \in D_{ij}^{(N)}} h_d.$$

2.4. Якщо $p_{ij}^{(N)} \geq 1 - p_A$, переходять на крок 2.5. Інакше переходять на крок 2.1.

2.5. Значення можливих різниць голів $d^* \notin D_{ij}^{(N)}$ утворюють множину $D_{ij}^{(A)}$ аномальних різниць класу матчів (i, j) .

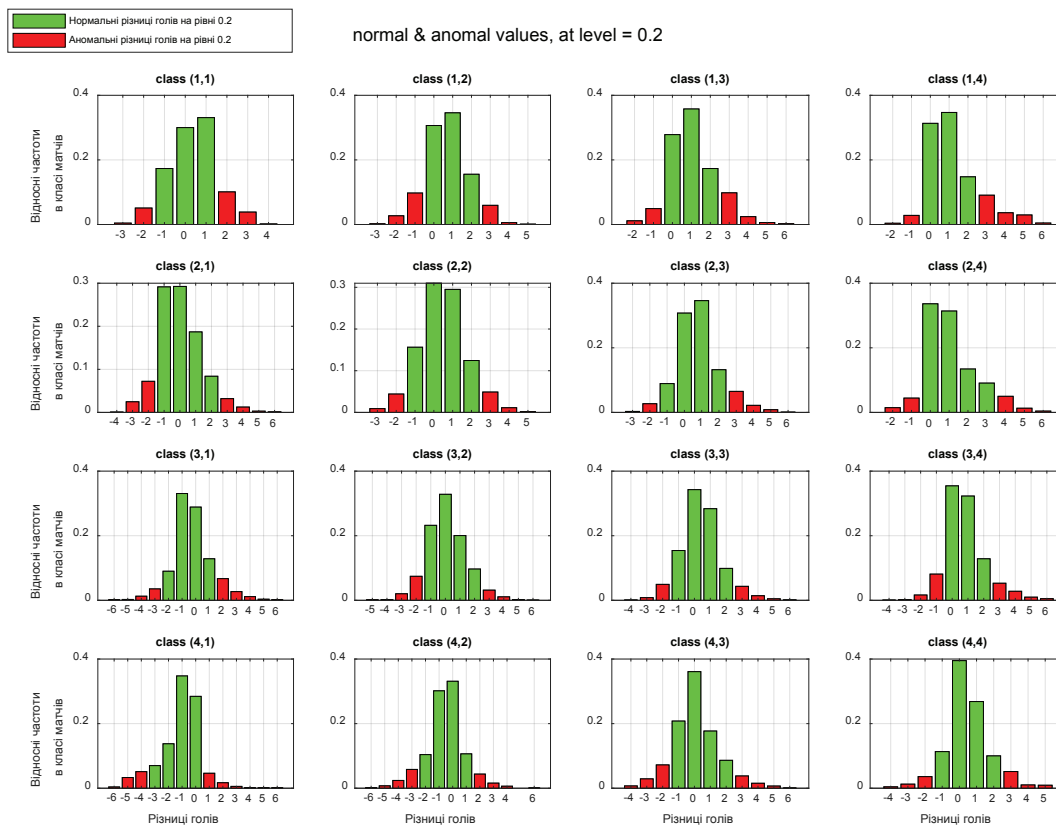


Рис. 4. Гістограми різниць голів за кожним класом матчів

Значення множини $D_j^{(A)}$ використовують для моделювання результату договірному матчу.

Для прикладу на рис. 4 показано нормальні (зелений колір) й аномальні (червоний колір) різниці голів за кожним класом матчів за рівня аномальності $p_A = 0,2$. Результати вибору значень за гістограмою з рис. 4 за рівня аномальності $p_A = 0,2$ відображено в табл. 5.

Таблиця 5. Нормальні й аномальні різниці м'ячів

Клас матчів	Аномальні різниці м'ячів	Нормальні різниці м'ячів
[1,1]	{-3, -2, 2, 3, 4}	{-1, 0, 1}
[1,2]	{-3, -2, -1, 3, 4, 5}	{0, 1, 2}
[1,3]	{-2, -1, 3, 4, 5, 6}	{0, 1, 2}
[1,4]	{-2, -1, 3, 4, 5, 6}	{0, 1, 2}
[2,1]	{-4, -3, -2, 3, 4, 5, 6}	{-1, 0, 1, 2}
[2,2]	{-3, -2, 3, 4, 5}	{-1, 0, 1, 2}
[2,3]	{-3, -2, 3, 4, 5, 6}	{-1, 0, 1, 2}
[2,4]	{-2, -1, 4, 5, 6}	{0, 1, 2, 3}
[3,1]	{-6, -5, -4, -3, 2, 3, 4, 5, 6}	{-2, -1, 0, 1}
[3,2]	{-5, -4, -3, -2, 3, 4, 5, 6}	{-1, 0, 1, 2}
[3,3]	{-4, -3, -2, 3, 4, 5, 6}	{-1, 0, 1, 2}
[3,4]	{-4, -3, -2, -1, 3, 4, 5, 6}	{0, 1, 2}
[4,1]	{-6, -5, -4, 1, 2, 3, 4, 5, 6}	{-3, -2, -1, 0}
[4,2]	{-6, -5, -4, -3, 2, 3, 4, 6}	{-2, -1, 0, 1}
[4,3]	{-4, -3, -2, 3, 4, 5, 6}	{-1, 0, 1, 2}
[4,4]	{-4, -3, -2, 3, 4, 5}	{-1, 0, 1, 2}

3. Вибирають N матчів сезону турніру випадковим чином, які будуть перетворюватись на договірні. Далі розглядають усі дії на прикладі одного такого матчу.

4. Визначають клас матчів, до якого належить аналізований матч.

5. Якщо результат обраного матчу не міститься в області очікуваних значень результату матчів цього класу матчів (тобто цей результат і так схожий на договірний матч), то випадковим чином обирають інший матч. Інакше переходять до п. 6.

6. Різницю голів обирають випадково із множини аномальних значень різниць голів для відповідного класу матчів (табл. 5). Під час цього випадкового вибору використовують ймовірності, пропорційні частотам аномальних значень з гістограми різниць голів для відповідного класу матчів.

7. Рахунок договірному матчу обирають випадково з відповідного стовпця таблиці рахунків матчів (табл. 6), де номер стовпця таблиці дорівнює обраній різниці голів договірному матчу. Під час цього випадкового вибору використовують ймовірності на основі арифметичної прогресії з $a_1 = 1$ та $a_n = 0,1, n \geq 2$ (рис. 5):

$$P(j) = \frac{a_j}{S} = \frac{a_1 + \frac{(a_n - a_1)(j-1)}{(n-1)}}{\frac{(a_1 + a_n)n}{2}}$$

$$= \frac{1 + \frac{(0,1-1)(j-1)}{(n-1)}}{\frac{(1+0,1)n}{2}} = \frac{1 - \frac{0,9(j-1)}{(n-1)}}{0,55n}$$

$$= \frac{(n-1-0,9j+0,9)}{0,55n(n-1)} = \frac{(n-0,1-0,9j)}{0,55n(n-1)}$$

$$= \frac{(n-1+1-0,1-0,9j)}{0,55n(n-1)} = \frac{1}{0,55n} + \frac{(0,9-0,9j)}{0,55n(n-1)},$$

$$1 \leq j \leq n, n \geq 2;$$

$$P(1) = 1, n = 1,$$

де n – кількість варіантів рахунку в обраному стовпці таблиці рахунків матчів, j – порядковий номер рахунку в обраному стовпці таблиці рахунків матчів, S – сума перших n членів арифметичної прогресії.

Якщо $n = 1$, обрана функція ймовірності є сталою функцією зі значенням $P(1) = 1$. Для $n \geq 2$ обрана функція ймовірності є спадною ступінчатою функцією з початковим значенням ймовірності $P(1) = \frac{1}{0,55n}$ і кроком $\frac{0,9(1-j)}{0,55n(n-1)}$.

Обрана функція ймовірності забезпечує поступове зменшення ймовірності зі збільшенням порядкового номера результату матчу. Елементи стовпця таблиці рахунків матчів розміщені у порядку збільшення кількостей голів, забитих командами під час матчу. Отже, чим більше голів кожна команда заб'є під час гри, тим менша ймовірність обрання такого варіанта результату матчу як договірного. Визначення апріорно невідомих ймовірностей як членів арифметичної прогресії використовують у задачах дослідження операцій як один із методів подолання апріорної невизначеності.

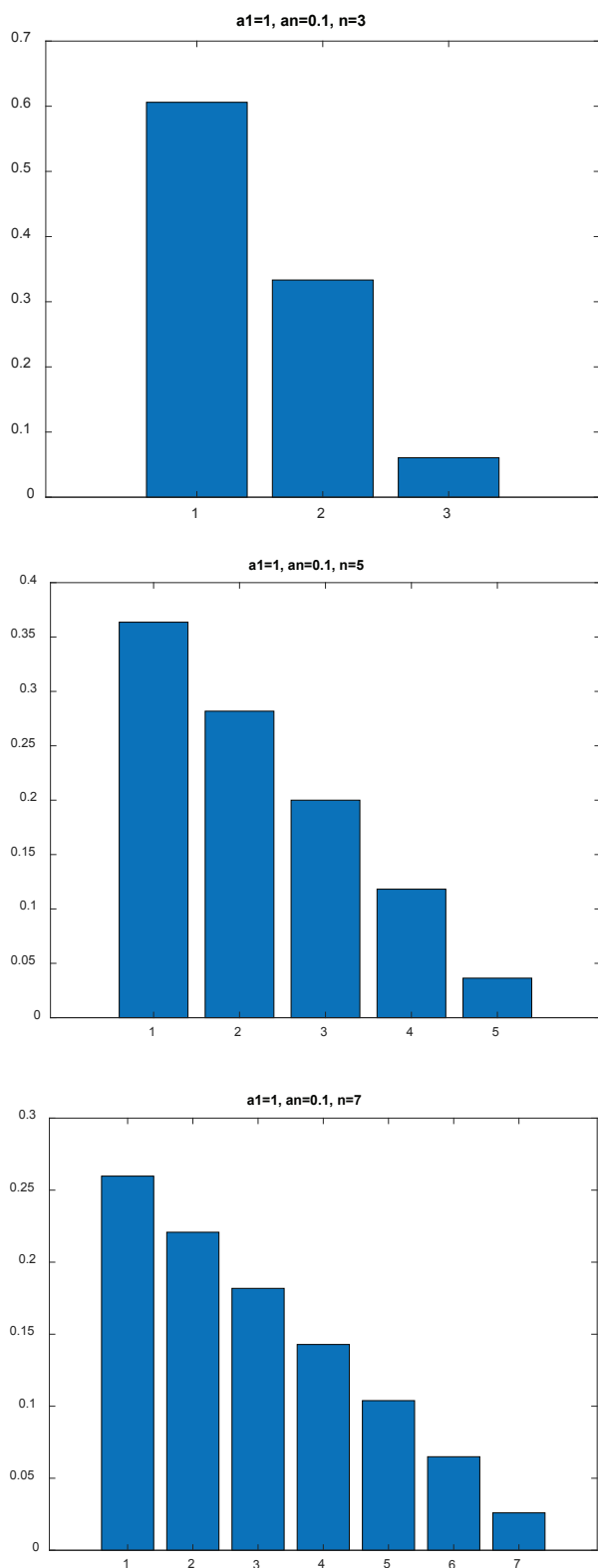


Рис. 5. Ймовірності на основі арифметичної прогресії з $a_1 = 1$ і $a_n = 0,1$ для $n \in \{3, 5, 7\}$

Таблиця 6. Рахунки матчів для всіх класів матчів

Рахунок матчу	Різниця голів матчу						
	0	1	2	3	4	5	6
0:0	1:0	2:0	3:0	4:0	5:0	6:0	
1:1	2:1	3:1	4:1	5:1	6:1		
2:2	3:2	4:2	5:2	6:2			
3:3	4:3	5:3	6:3				
4:4	5:4	6:4					
5:5	6:5						
6:6							

Результати моделювання матчів із фіксованим результатом продемонстровано на прикладі одного із змодельованих сезонів (табл. 7). Випадковим чином у змодельованому сезоні було обрано $T_s = 10$ матчів. Було використано рівень аномальності $p_A = 0,2$. Для кожного матчу сформовано результат за алгоритмом формування договірних матчів в імітаційній моделі відповідно до аномальних різниць, визначених для кожного класу матчів у табл. 1.

Таблиця 7. Приклади утворених договірних матчів у модельному сезоні

Домашня команда	Віздна команда	Оновлений результат	Початковий результат
'team 3'	'team 13'	4:1	0:0
'team 2'	'team 15'	6:2	3:2
'team 4'	'team 19'	0:1	3:2
'team 9'	'team 7'	0:2	2:2
'team 11'	'team 7'	5:1	2:3
'team 16'	'team 19'	3:0	1:1
'team 17'	'team 2'	4:1	0:0
'team 17'	'team 7'	5:2	1:2
'team 17'	'team 15'	3:0	4:4
'team 17'	'team 19'	4:0	4:3

В отриманих результатах є такі, які можуть виглядати як очікувані, наприклад, 0:1 чи 0:2, але ж для відповідних класів матчів такі результати розглядають як аномальні.

Висновки

Для дослідження ефективності методів виявлення підозрілих щодо фіксованого результату матчів і їх порівняльного аналізу актуальним завданням є розроблення імітаційної моделі футбольного сезону з матчами з фіксованим результатом.

Особливістю розробленої імітаційної моделі є те, що команди поділяють на групи, які враховують їх силу за загальними очками в сезоні.

Відповідно, ймовірність забиття голів командою під час матчу розраховують за групами, а не за всім сезоном. Також під час розрахунку цієї ймовірності враховують тип гри – домашня або виїзна. Це дозволяє врахувати особливості гри домашньої та виїзної команди.

Як впливає з розподілів типів результатів матчів, згрупованих за класами матчів, у змодельованих сезонах у середньому зберігається характер залежностей між кількістю домашніх перемог, нічиїх, виїзних перемог, притаманних класам матчів реального сезону.

За загальними розподілами типів результатів матчів та різницями голів усіх матчів змодельований сезон є подібним до реального сезону.

За критерієм Колмогорова–Смирнова, різниця наведених розподілів на рівні значущості 0,001 є статистично незначущою.

Гістограми різниць голів по кожному класу матчів мають очікувані закономірності в результатах матчів: сильніші команди мають кращі результати у грі зі слабшими командами; вдома команди грають краще, ніж на виїзді.

Розглянуту імітаційну модель може бути узагальнено для врахування інших параметрів футбольних матчів, на які приймаються ставки – кількість призначених пенальті, кількість попереджень і вилучень тощо.

References

- [1] “Resource Guide on Good Practices in the Investigation of Match-Fixing”, *United Nations : Office on Drugs and Crime*. [//www.unodc.org/unodc/en/safeguardingsport/publications/match-fixing.html](http://www.unodc.org/unodc/en/safeguardingsport/publications/match-fixing.html) (accessed Jan. 05, 2022).
- [2] D. Forrest, and I.G. McHale, “Using statistics to detect match fixing in sport”, *IMA Journal of Management Mathematics*, Vol. 30, No 4, pp. 431–449, Sep. 2019. doi: 10.1093/imaman/dpz008
- [3] S. Anfilets *et al.*, “DEEP MULTILAYER NEURAL NETWORK FOR PREDICTING THE WINNER OF FOOTBALL MATCHES”, *International Journal of Computing*, pp. 70–77, Mar. 2020. doi: 10.47839/ijc.19.1.1695
- [4] N. Razali, A. Mustapha, F.A. Yatim, and R.A. Aziz, “Predicting Football Matches Results using Bayesian Networks for English Premier League (EPL)”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Vol. 226, No 1, p. 012099, Aug. 2017. doi: 10.1088/1757-899X/226/1/012099
- [5] T. Narizuka, Y. Yamazaki, and K. Takizawa, “Space evaluation in football games via field weighting based on tracking data”, *Sci Rep*, Vol. 11, No 1, p. 5509, Mar. 2021. doi: 10.1038/s41598-021-84939-7
- [6] Laxhammar, R., & Falkman, G. (2011). Sequential Conformal Anomaly Detection in trajectories based on Hausdorff distance. 14th International Conference on Information Fusion, 1–8.
- [7] Ho, S.-S., Schofield, M., Sun, B., Snouffer, J., & Kirschner, J. (2019). A Martingale-Based Approach for Flight Behavior Anomaly Detection. *2019 20th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)*, 43–52. <https://doi.org/10.1109/MDM.2019.00-75>
- [8] focus.ua, “Dirty games. Match-fixing in Ukrainian football”, *FOCUS*, Mar. 05, 2013. <https://focus.ua/ukraine/263259> (accessed Jan. 05, 2022).
- [9] B. Constandt, and E. Manoli, “*Understanding match-fixing in sport: Theory and practice*”. 2022.
- [10] “Matches truquys : coup de filet dans le milieu du football professionnel”, *leparisien.fr*, No 18, 2014. <https://www.leparisien.fr/faits-divers/corruption-coup-de-filet-dans-le-milieu-du-football-professionnel-18-11-2014-4301229.php> (accessed Jan. 05, 2022).
- [11] L. Chami, “Matches truquys de Ligue 2 : 18 mois ferme pour les anciens dirigeants nomois”, *leparisien.fr*, Sep. 13, 2018. <https://www.leparisien.fr/sports/football/matches-truques-de-12-18-mois-ferme-pour-les-anciens-dirigeants-nimois-13-09-2018-7887090.php> (accessed Jan. 05, 2022).
- [12] K.P. Murphy, *Probabilistic Machine Learning: Advanced Topics*, MIT Press, 2021.
- [13] S.D. Langan, “*Predict Football Matches: Using Spreadsheet Models to Become a Winning Sports Bettor*” (Kindle Edition), 2013, 379 p.
- [14] S.M. Ross, “*Introductory Statistics*”, Academic Press, 2017.
- [15] N.Sh. Kremer, “*Theory of Probability and Mathematical Statistics*”, UNITY-DANA, 2001.

O.R. Chertov, I.S. Zhuk

SOCCER SEASON SIMULATION WITH FIXED MATCHES

Background. Football is a huge industry comparable to traditional economic sectors. In numerical terms, it is tens of billions of dollars. But one of the most important problems that this industry faces is match fixing (matches with a fixed result).

The most effective way to prevent this threat is a multilateral approach combined with measures aimed at expanding the potential of law enforcement agencies and sports organizations. One of the components of this approach is the use of mathematical methods for identifying suspicious match-fixing results.

Objective. The purpose of the paper is to develop an algorithm for modelling fixed matches related to earnings on bets, which is

used to form matches which results are different from the expected ones and can be considered as anomalous.

Methods. Calculation of probabilities of scoring goals by teams during the game based on real data of the season; development of a simulation model of a football season without fixed matches and its analysis by means of statistical modelling; development of an algorithm for modelling fixed matches related to earnings on bets and its analysis.

Results. A simulation model of a football season has been developed, which allows, using probability distributions of the number of goals scored by teams during home or away games obtained on real data, simulating the results of matches, taking into account the strength of the teams and the game type, as well as to simulate the situations of a “fixed” match, replacing the current results. In terms of the overall distributions of match result types and goal differences of all matches, the simulated season is similar to the real season. According to the Kolmogorov-Smirnov test, the difference between the given distributions at the significance level of 0.001 is statistically insignificant.

Conclusions. The developed simulation model of a football season can be used to study the effectiveness of methods for detecting fixed matches and their comparative analysis.

Keywords: football season; team grouping; Poisson distribution; goal difference histogram; type of match result.

Рекомендована Радою
факультету прикладної математики
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
11 січня 2022 року

Прийнята до публікації
27 червня 2022 року

DOI: 10.20535/kpissn.2022.1-2.287886

UDC 621.643.03

Grigoriy S. Tymchik, Oleksandr O. Podolian, Kateryna S. Serhiienko
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

TECHNOLOGY OF REPAIRING THE ACTIVE MAIN PIPELINE USING BRAZE-WELDED COUPLINGS

Background. During operation, the main pipeline needs to be repaired. During periodic diagnostics of the pipeline state defects are detected, some of which are unacceptable. The classic repairing method, that involves the shutdown of the pipeline with subsequent replacement of its defective spots, requires significant financial costs and is associated with a forced pipeline outage and environmental violation.

Objective. The purpose of this article is to improve the technology of reinforcing sections of main high-pressure pipeline with welded couplings, which are filled with molten metal by allowing obtaining high efficiency of pipe strengthening of medium and small diameters.

Methods. Strength improvement of the active pipeline spots is realized by installing brazed-welded couplings on an active main pipeline. Strengthening the pipeline with the coupling consists in the redistribution of the load part from the pipe to the wall of the coupling, which leads to a decrease of the stress level in the pipe wall. The reinforcement efficiency of the pipeline could be evaluated by the degree of reduction of circumferential stresses in the fixed pipe wall.

Results. The article suggests a technique for strength improvement of pipeline spots using couplings filled with a molten metal that has a high elasticity modulus. The operations of formation of under-coupling layer with the parameters that provide achievement of the maximum value of the stresses reduction degree in the reinforced pipe are proposed, while ensuring an even load distribution between the wall of the pipeline spot being repaired and the coupling shell. An improved technology for fixing defective spots of the active pipeline has been proposed, designs for front seals have been proposed that facilitate the formation of under-coupling layer with optimal parameters. The proposed technique makes it possible to increase the efficiency of the pipe strengthening of small and medium diameters.

Conclusions. The article proposes an improved technology of the defective spots reinforcing of the active main pipeline using braze-welded coupling. The focus is on the design of mechanical seals that ensure the tightness of the under-coupling space during the formation of the coupling layer.

Further research would be performed in the direction of developing a mathematical model of the pipeline reinforced with braze-welded coupling, taking into account temperature changes during heating and cooling of the coupling structures during the formation of the under-coupling layer. Some research will be also performed to improve the coupling structures and methods of quality control of their mounting on the pipe.

Keywords: coupling; non-destructive; control; diagnostics; repair; gas pipeline; pipeline; pressure; gas; refinable crude; transit.

Introduction

During repairing of linear and curved sections of active *high pressure main pipelines as well as* their transfer to a higher category a method of increasing the of the pipe strength is widely used. It's related with the installation of the amplified plot of pipe couplings of various designs [1]. The most wide distribution have received couplings with an under-coupling space that is filled during the time renovations of the self-hardening substance, which allows for the pipe-

line section reinforcement without changing modes of the product transportation [2,3]. Commonly, the couplings compiled of multiple technological elements, most important of which are two half-shells that are centered on the pipe and fastened to each other by known methods, for example, welded longitudinal seams. Thereafter, the ends of the sheath are sealed and the space between the pipe and shell is filling up with self-hardening substance. The availability of the under-coupling layer allows reducing Hoop stresses in the pipe by referring a portion of

Пропозиція для цитування цієї статті: Г.С. Тимчик, О.О. Подолян, К.С. Сергієнко, «Технологія ремонту діючого магістрального трубопроводу з використанням паяно-зварних муфт», *Наукові вісти КПІ*, № 1–2, с. 95–101, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.287886

Offer a citation for this article: Grigoriy S. Tymchik, Oleksandr O. Podolian, Kateryna S. Serhiienko, “Technology of Repairing the Active Main Pipeline Using Braze-Welded Couplings”, *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 95–101, 2022 doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.287886

the load on the outer shell. In General, the efficiency of the repair depends on its strength parameters. For repairing pipes of small and medium diameters there is a developed technology [5,6] based on using the formation of an under-coupling layer of molten metal that has a high elasticity modulus. However, due to the complexity of creating the required pressure in the under-coupling space the technology requires some improvements.

Problem statement

The purpose of the article is to improve the technology of reinforcing sections of main high-pressure pipeline with welded couplings filled with molten metal by allowing obtaining high efficiency of strengthening pipes of medium and small diameters.

Strengthening the spots using braze-welded coupling

Strengthening the pipeline with the coupling is to redistribute part of the load from the pipe to the wall of the coupling, which leads to a decrease of the stress level in the pipe wall. The reinforcement efficiency of the pipeline could be evaluated by the degree of reduction of circumferential stresses in the wall of the repaired pipe $\left(\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}}\right)$, where σ_{To} , σ_{Tp} – hoop tensile stress in the pipe wall without coupling and with mounted coupling at the working pressure in the pipeline P_p [3].

After the installation of couplings on pipe with internal pressure P_U and after filling the under-coupling space with self-hardening composition injected under pressure P_{MU} , hoop tensile stress in the pipe wall decreases to a certain value σ_{TU} . Further, in a case of pressure changes inside the pipeline P_p , a hoop tensile stress in the pipe wall is going to take the values σ_{Tp} and the reinforcement efficiency of the pipelines is described by expression [9]:

$$\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}} = 1 - k^{-1} \left(1 + \frac{P_U - k \cdot P_{MU}}{P_p} \right).$$

Where k is the coefficient that links pressure changes in under-coupling space with pressure changes inside the pipeline (the coupling coefficient). A detailed derivation of an expression for the coefficient k , that takes into account the geometric parameters of the repaired pipe and couplings, as well as strength properties of the material of the under-coupling layer, is given in [9].

$$k = 1 + \frac{4 \cdot \delta_T \cdot \frac{E_M}{E_{PP}} \left(\delta_{IIIY} + \frac{P_{MU}}{4 \cdot E_T} \left(\frac{D_T^2}{\delta_T} + \frac{(D_T + 2 \cdot (\delta_T + \delta_{PPU}))^2}{\delta_M} \right) \right)}{\frac{1 - \mu^2}{1 - 3\mu^2} \cdot D_T^2 + \frac{D_M^2 \cdot \delta_T}{D_T^2 \cdot \delta_M}}.$$

Where D_T is the internal diameter of the pipeline; $E_M \approx E_T$ is the elasticity modulus of the material of the coupling and pipe; E_{pp} , μ_{pp} is the elasticity modulus and Poisson's ratio of the material of the under-coupling layer; δ_T is the wall thickness of the pipe; δ_M is the wall thickness of the brace; δ_{PPU} is the mounting depth of the under-coupling space.

To ensure uniform load distribution between the reinforcing pipe and coupling, self-hardening substance should be pressed into the under-coupling space below the optimum pressure P_{MUopt} , which is defined by the expression [3]:

$$P_{MUopt} = \frac{P_U}{k} + \Delta P.$$

Where: ΔP is the pressure reduction due to the shrinkage of under-coupling layer substance in the process of hardening.

In the case of pressing the self-hardening substance into the under-coupling space under pressure P_{MUopt} reinforced coupling, without taking into account end effects would similarly work like a solid pipe with greater wall thickness.

The optimal filling pressure of the under-coupling space is firstly defined with the pressure inside the pipeline at the time of installation and the magnitude of the coupling coefficient k . However, the magnitude of the coupling coefficient depends on the depth of under-coupling space, which depends on the pressing pressure of the self-hardening substance into the under-coupling space.

The efficiency of the discharge pipe coupling with internal filling increases with increasing diameter of the pipeline, and with decreasing in the depth of coupling space. And also it rises with increasing the wall thickness of the coupler of the elasticity modulus and Poisson's ratio of the material of the coupling layer. The graph illustrating the change in the degree of reduction of hoop stresses in the wall of the repaired pipe for different diameters of the strengthen pipeline by using different materials for the formation of the under-coupling space shown in

Fig. 1. The graph is constructed for $P_U = 5,5 \text{ MPa}$, $\delta_T = 9 \text{ mm}$, $\delta_M = 9 \text{ mm}$, $P_{MU} = P_{MUopt}$

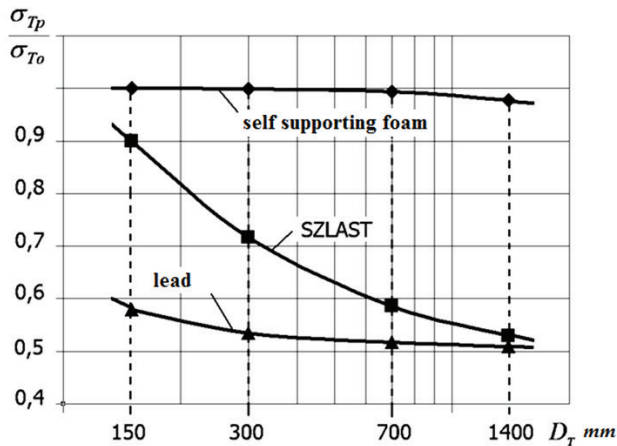


Fig. 1 The dependence of the reduction degree of hoop stresses in the wall of the reinforced pipe from its diameter

The graph shows that the use of molten metal for forming the under-coupling layer enables reinforcement of pipeline sections with small diameters, for which using of the known compounds is ineffective.

The technology of strength improvement of spots of an active pipeline using couplings with the formation of an under-coupling layer of melted metal (brazed-welded couplings)

One way to increase the efficiency of strengthening pipes with small and medium diameters is to use molten metal that has a relatively low melting point, for example, lead, tin or their alloys, to form an under-coupling layer [5].

Calculations show that the use of lead pressed into the under-coupling space under optimal pressure will hardly improve the efficiency of the pipeline's strengthening by increasing the degree of reduction of ring stresses in the pipe that is being repaired with

a diameter $D_T = 150 \text{ mm}$ with $\left(\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}} = 0,9\right)$ (when using

self-hardening mass SZLAST, that has elasticity modulus $E_{pp} = 55 \text{ MPa}$ and Poisson ratio $\mu_{pp} = 0,48$)

to $\left(\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}} = 0,58\right)$ (when using lead that has the

elasticity modulus $E_{pp} = 0,18 \cdot 10^5$ and Poisson ratio $\mu_{pp} = 0,42$).

The heating of the of the pipeline defective spot with the coupling installed on it can be carried

out with the help of inductors widely used for the preparation of pipes during welding (Fig. 2)

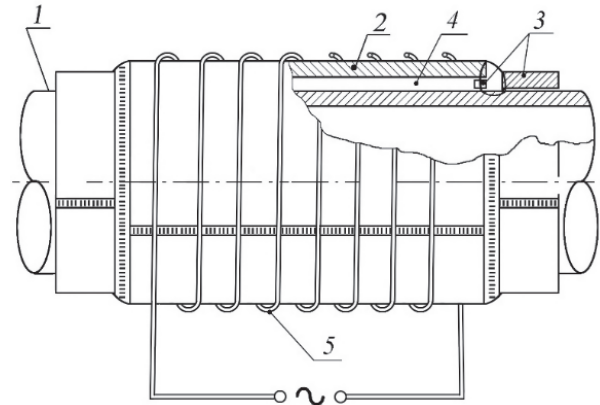


Fig. 2. The usage an inductor to warm up the coupling 1 – pipeline, 2 – coupling, 3 – technological rings, 4 – under-coupling space with molten metal, 5 – inductor

To achieve the maximum value of the mechanical ring stresses reduction degree in the pipe wall that is being strengthened and to ensure an equal distribution between the pipe that is being repaired and the coupling shell, the value of the pressure of pressing the molten metal into the under-coupling space should be selected from the expression [10].

The main difficulty in fulfilling this condition is to ensure correct recordkeeping ΔP and the coupling factor k , because in actual practice, the shrink of the same metal or alloy can be very different from the batch and the conditions of use, which will lead to a non-optimal distribution of the force between the pipe and the coupling after changing the material state of the under-coupling layer.

In addition, alloy can be used to fill under-coupling space, with an unknown value of the modulus of elasticity and shrink. Such an example can be applied during emergency operations and when using of an alloy of random lead and tin products.

In this case, the quality control of the installation can be carried out in the following sequence. After installation and assembly of the coupling metal parts (shell and face seals), the welded joints quality can be checked by traditional, well-established methods of non-destructive testing.

The heat-resistant strain gage transducers are mounted on the coupling shell. Further hydraulic tests of the under-coupling space that are combined with the treatment of internal surfaces with an adhesive (flux), which provides elevated adhesion of the molten metal to the pipe and coupling shell.

The construction of a diagram of the strain gage transducers is made during the hydraulic tests, with the usage of information from the pressure detectors installed in the coupling shell joint $R_{TD}(P_M)$, the value of the signal that comes from the strain gage transducer R_{TD} to the value of the pressure in the under-coupling space $R_{TD}(P_M)$. During the usage of the strain gage transducer with a linear characteristic (for example, strain gages with temperature compensation circuits), the calibration dependence can be represented as: $R_{TD} = K_{TD} \cdot P_M + R_{TD0}$.

Where: R_{TD} - signal at the strain gage transducer output, K_{TD} - the coefficient connecting the signal change at the transducer output with the change in pressure in the under-coupling space, R_{TD0} - the signal at the strain gage transducer output in the absence of pressure in the under-coupling space.

After heating the pipe and coupling by using of special means, for example, an inductor, molten metal is pressed into the under-coupling space, controlling the pressing process according to the information coming from the strain gage transducer. After this, molten metal injection and preheating are continued until the following conditions are fulfilled:

$$R_{MU1} = K_{DT} \cdot \left(\frac{P_U}{k_i} + \Delta P_i \right) + R_{TD0}$$

After determining the actual values k and ΔP , the coupling, the pipe and the under-coupling space layer are heated again, so that the metal in the under-coupling layer melts. Than molten metal is additionally injected into the under-coupling space, creating a pressure that is monitored by the signal from the strain gage transducer:

$$R_{MU} = K_{DT} \cdot \left(\frac{P_U}{k} + \Delta P \right) + R_{TD0}$$

To implement the method, the pressure in the pipeline can be changed not immediately after finishing the work, but much later, during the planned change in the modes of transport of the product. Unlike couplings with compound filling, couplings filled with molten metal make it possible to correct the stress distribution in the pipe and coupling during operation.

The proposed method is explained by the diagram shown in Fig. 3.

Giving the fact that the under-coupling space is filled with liquid molten metal, control over its distribution over the entire capacity size can be carried out by an acoustic method. At the same time, taking into account the high temperature of the coupling,

which limits the use of traditional piezoelectric excitation sensors for an acoustic wave, the use of the EMA method is preferable [14-17].

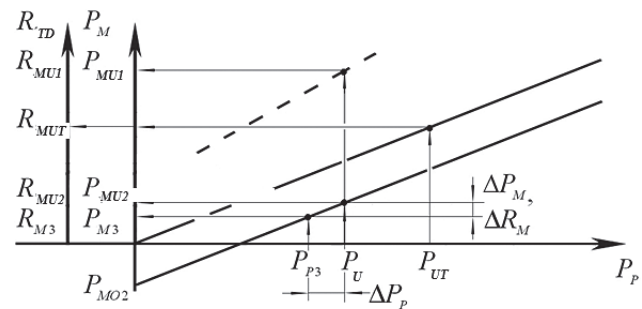


Fig. 3 A diagram explaining how to fix a pipeline using brazed-welded coupling

The relatively large shrink of lead during pouring (up to 4%) can be effectively reduced by the introduction of additional additives.

The issues of reducing lead shrink are considered in the specialized literature on the production of bullets for firearms and in the scope of application for filling under-coupling space have been studied.

The technology of the existing trunk pipeline section reinforcement using a coupling filled with molten metal

Proceedings [5,11] propose technology of strengthening of the pipeline with using braze-welded coupling that is heated by the inductor. The focus is on the quality control of repairing, ensuring proper accounting ΔP , and coupling coefficient k that are necessary for the condition (3). However, to achieving conditions (3) during the works only while ensuring the tightness of under-coupling space, which pursues high demands on the quality of the end seal.

The proposed technology that increases the strength of the pipeline is as follows [12,13]. On the amplified section of the pipeline technological elements of the coupling are installed, which, after binding with known methods, form a closed shell around the pipe with hoop cavities for forming end seals.

Then the ends of the coupling are sealed using the alloy (metal) that has a higher melting temperature (optional alloy) than the alloy (metal) used to form the under-coupling layer (core alloy). To seal the ends of the coupling pre-heating of the coupling in the area of the hoop cavity to a temperature above the melting point of the alloy is conducted (but not exceeding its boiling point). Then cavity is

filled with additional molten alloy supplied under pressure. After filling the annular cavity, the temperature of the coupling is reduced, resulting in the formation of hermetic end seals. Then the whole coupling is heated to a temperature higher than the melting temperature of the basic alloy, but lower than the melting temperature of the additional alloy, and then under-coupling space is filled with the main molten alloy, fed at the specified pressure.

The process of forming the under-coupling layer is illustrated in Fig. 4, and the construction of annular cavities is shown in Fig. 5. Fig. 12, where 1 is the pipeline; 2 is the coupling shell, 3 is under-coupling space, 4 is the annular cavity, 5 – the coupling technological elements, 6 – inductors, 7 – syringes, 8 – heater, 9 – additional alloy (metal), 10 is the main alloy (metal), 11 – backing hoop, 12 – sleeve, 13 – technological hoop, 14 – weld seam, 15 – sealer, 16 – part flange, 17 – flange connection fastening.

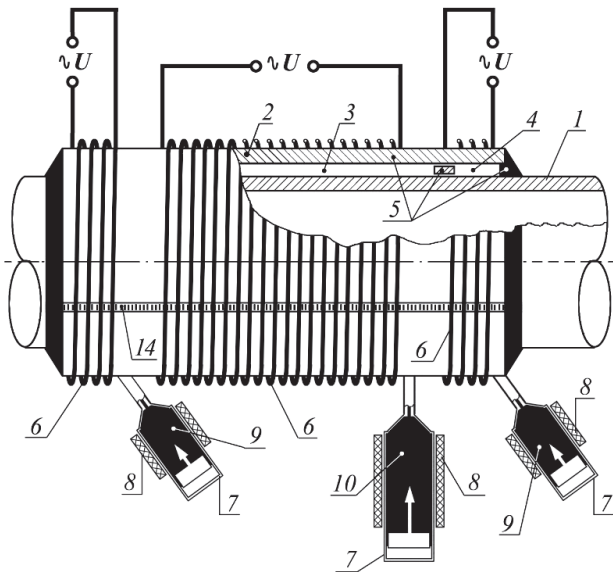


Fig. 4 Organization of the formation of the end seals and filling the under-coupling space with molten metal

Further, the coupling is cooled naturally or forcibly. With a relatively small length of coupling and a limited time of works, it is possible to heat the entire coupling to a temperature above the temperature of the additional alloy. It is also possible to form end seals with further lowering of the coupling temperature and filling the under-coupling space with the main alloy, which is supplied with a predetermined pressure.

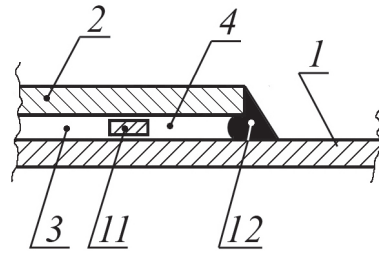


Fig.5 design version of the annular cavities

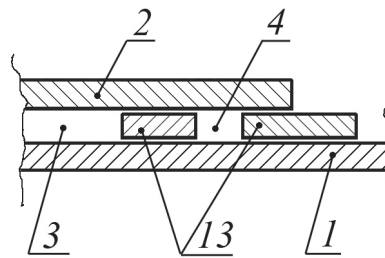


Fig.6 design version of the annular cavities

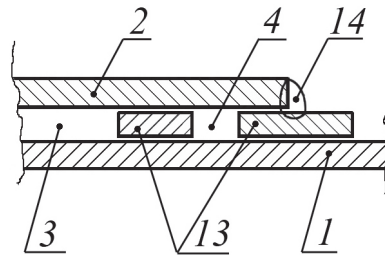


Fig.7 design version of the annular cavities

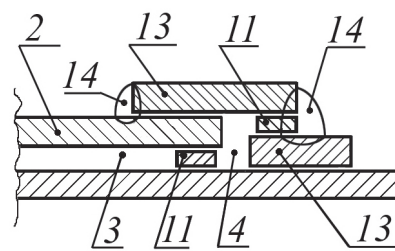


Fig.8 design version of the annular cavities

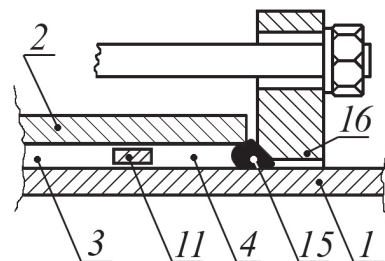


Fig.9 design version of the annular cavities

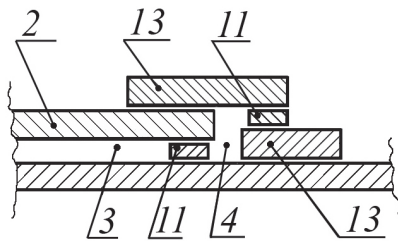


Fig.10 design version of the annular cavities

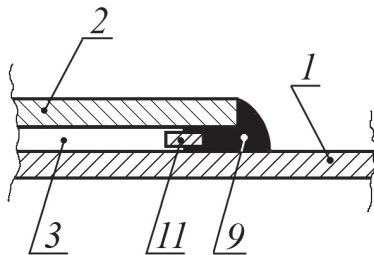


Fig.11 design version of the annular cavities

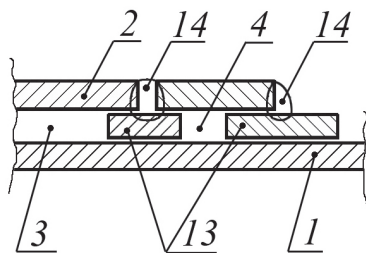


Fig.12 design version of the annular cavities

To ensure the required values of the pipe circumferential stresses reduction degree, with a uniform distribution of the load between the pipe walls and the coupling, the pressure in the under-coupling

space should be changed in proportion to the pipeline pressure

$$P_M = P_p \cdot k^{-1}.$$

It is provided if selection pressure of filling the under-coupling space with the main alloy would be based on the conditions (3). However, in practice it is difficult to predict finite values of the coupling coefficient using the condition (3), provided a complicated temperature dependence. Proceeding [9] proposes an approach to select the optimum pressing pressure of the molten alloy in under-coupling space, has limited using. It involves the formation of a coupling layer in two stages with intermediate cooling of the structure. In this regard, practical and scientific interest is the dependency establishment, in order to form the under-coupling layer with optimal parameters in one-step.

Conclusions

The article proposes an improved technology of the defective spots reinforcing of the active main pipeline using braze-welded coupling. The focus is on the design of mechanical seals that ensure the tightness of the under-coupling space during the formation of the coupling layer.

Further research would be performed in the direction of developing a mathematical model of the pipeline reinforced with braze-welded coupling, taking into account temperature changes during heating and cooling of the coupling structures during the formation of the under-coupling layer. Some research will be also performed to improve the coupling structures and methods of quality control of their mounting on the pipe.

References

- [1] Bekker M. V. "Repair of gas-main pipelines under pressure", Kyiv. Ukraine, 2008. – 240p.
- [2] Gas-main pipelines, arc welding repair in operating conditions, Ukrainian Standard GBN V.3.1-00013741-12:2011, 2011.
- [3] Technological instruction for the repair of pressure gas mains pipelines with the use of arc welding, DK "Ukrtransgas", 2000. – 96 p.
- [4] Otegui J.L. et al. "Local collapse of gas pipelines under repairs", Int. J. Pressure Vessels and Piping. 2000. 77. P. 555–566.
- [5] O.Podolian et al., "Method of reinforcing the pipeline with the help of clutches with internal filling with work quality control (variants)", UA patent98601, May. 25, 2012.
- [6] William Pallan, "Method of repairing a pipe ", GB Patent 2210134, June 01, 1989.
- [7] V.But et al., "Method for repair of defect section of pipeline without change of mode of transportation of product", UA patent 81894, February 11, 2008
- [8] V.But et al., "Method for repair of pipeline under conditions of operation ", UA patent 81895, February 11, 2008
- [9] O. Podolian et al., "Quality control system of well-bonded coupling fitting onto high pressure gas-main pipelines", Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108085A (1 October 2018); <https://doi.org/10.1117/12.2501594>
- [9] I.Oryniak et al., „Method of repairing the operating pipeline with a clutch with internal filling”, UA patent 98440, May 10, 2012.

- [10] O. Podolian and G. Tymchyk, , Quality control of couplings installation on the main pipeline. Kyiv. Ukraine: Igor Sikorsky KyivPolytechnic Institute, 2020. – 180 p.
- [11] O.Podolian, “Method of pipeline strengthening using soldered-welded coupling”, RU patent 2563945, September 27, 2015.
- [12] O.Podolian, “Method of strengthening the pipeline with the help of a braze-weld coupling”, UA patent 110155, November 25, 2015.
- [13] K. Whittington, “Ultrasonic testing at high temperatures”, Phys. Techn. 1978. N 2. P. 62–67.
- [14] K. Serhiienko et al., “Theoretical Investigations of the Ultrasonic Wave Generation by an Electromagnetic Acoustic Transducer“, Kyiv. Ukraine: KPI Science News, 2018, Vol.3(119), pp. 84–92.
- [15] Cole P. “The generation and reception of ultrasonic surface waves in mild steel, at high temperatures”, Ultrasonic. 1978. № 4 (16) P. 151 – 155.
- [16] V. Tsapenko and Yu. Kuts, “The Basis of Ultrasonic Non-Destructive Testing”, Kyiv. Ukraine: NTUU KPI, 2010. – 448 p.

Григорій С. Тимчик, Олександр О. Подолян, Катерина С. Сергієнко

ТЕХНОЛОГІЯ РЕМОНТУ ДІЮЧОГО МАГІСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАЯНО-ЗВАРНИХ МУФТ

Проблематика. Під час експлуатації магістральний трубопровід потребує ремонту. При періодичній діагностиці стану трубопроводів виявляються дефекти, частина з яких є неприпустимими. Класичний метод ремонту, що передбачає заміну труби з подальшою заміною його дефектної ділянки, вимагає значних фінансових витрат і пов'язаний з вимушеним простоем трубопроводом і порушеннями екології.

Мета дослідження. Вдосконалення технології ремонту ділянок магістрального трубопроводу високого тиску зварними муфтами, які заливаються розплавленим металом, що дозволяє отримати високу ефективність зміцнення труб середнього та малого діаметрів.

Методика реалізації. Підвищення міцності ділянок діючого трубопроводу реалізується за допомогою монтажу на діючий магістральний трубопровід паяно-зварних муфт. Посилення трубопроводу муфтою полягає в перерозподілі частини навантаження від труби на стінку муфти, що призводить до зниження рівня напруги в стінці труби. Ефективність посилення трубопроводу при цьому прийнято оцінювати ступінь зниження кільцевих напружень в стінці ремонтної труби.

Результати дослідження. Запропонована методика підвищення міцності ділянок трубопроводів за допомогою муфт, що заповнюються розплавленим металом, що володіє високим модулем пружності. Запропоновані операції формування підмуфтового шару з параметрами, що забезпечують досягнення максимального значення ступеня зниження напружень в посилюваній трубі при забезпеченні рівномірного розподілу навантаження між стінкою ремонтної ділянки трубопроводу і оболонкою муфти. Запропоновано вдосконалену технологію ремонту дефектних ділянок діючого трубопроводу, запропоновані конструкції торцевих ущільнювачів, що полегшують формування підмуфтового шару з оптимальними параметрами. Запропонована методика дозволяє підвищити ефективність посилення труб малих і середніх діаметрів.

Висновки. Запропоновано вдосконалену технологію підвищення міцності ділянок діючого трубопроводу за допомогою паяно-зварних муфт. Основну увагу приділено розробці конструкцій торцевих ущільнювачів, що забезпечують герметичність підмуфтового простору під час формування шару підмуфти.

Подальші дослідження передбачається проводити у напрямку розробки математичної моделі ділянки трубопроводу, посиленого паяно-зварною муфтою з урахуванням температурних змін у процесі нагрівання та охолодження муфтової конструкції при формуванні підмуфтового шару, а також у напрямку вдосконалення муфтових конструкцій та методів контролю якості їх монтажу на трубі.

Ключові слова: муфта; неруйнівний; контроль; діагностика; ремонт; газопровід; трубопровід; тиск; газ; переробна нафта; транзит.

Рекомендована Радою
Приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
6 грудня 2021 року

Прийнята до публікації
27 червня 2022 року

Doi: 10.20535/kpissn.2022.4.252713

UDC 681.78

V.M. Sokurenko^{1*}, O.M. Sokurenko²

¹Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

²Optical and mechanical college of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

*corresponding author: sokurenko2@meta.ua

AUTOMATED DESIGN OF ZOOM RIFLESCOPE WITH EXTENDED PARAMETERS

Background. Designing an arbitrary afocal zoom optical system is a complex and multidimensional problem. It cannot be solved analytically and requires the essential experience and efforts of the designer.

Objective. The purpose of the paper is to present and verify by simulation the method and means to perform an automated design of complex multi-lens afocal zoom optical systems having variable parameters and characteristics.

Methods. Using the developed specialized software with implemented modification of the adaptive Cauchy differential evolution algorithm for the parametric synthesis of multi-component optical systems of zoom riflescopes with extended functional parameters.

Results. The developed optical system of the rifle scope provides the 5 \times magnification ratio and the angular field of view in the object space from 3.26° to 0.83°. It has a reticle located in the first focal plane, the entrance pupil diameter of 60 mm, the eye relief within the range of 106...111 mm, and the maximum system length of 390 mm. The rifle scope contains 13 lenses in 10 components. The performed simulations showed that the time interval required for the direct automated design of the rifle scope's optical system is about 30–40 hours for the total number of unknown parameters (variables) equal to 91. The root-mean-square values of the angular aberrations of axial beams in all (five) configurations of the synthesized zoom system do not exceed 1.25 arc minute in the whole spectral range. The algorithm helps to determine the prescription data of optical systems, considering the technical requirements and restrictions specified by the designer.

Conclusions. Computer simulations of the development of the zoom rifle scope with the magnification of 5–25 \times , the entrance pupil diameter of 60 mm, and the reticle located in the first focal plane have confirmed the effectiveness of the proposed algorithm to design automatically complex multi-lens optical systems with variable parameters. The obtained results proved the high image quality of the generated 13-lens rifle scope with the long eye relief. The implemented modification of the adaptive Cauchy differential evolution method can be considered a powerful tool that helps to automate the parametric synthesis of multicomponent optical systems of zoom riflescopes, taking into account the requirements set by the designer. Future research should test the feasibility of the automated design of other riflescopes containing more lenses and providing extreme performances.

Keywords: automated optical design; zoom rifle scope; optical system; parametric synthesis; global optimization; aberration.

Introduction

Due to its complexity and variety, the design procedure for multi-element optical systems is usually a lengthy and iterative process. It requires significant designer experience and must consider many technical requirements and design constraints [1–4]. The design procedure becomes more complicated for afocal zoom optical systems since, throughout the range of used magnifications, all images must

be at infinity, the position of the exit pupil is to be practically unchanged, and the system must provide a high image quality.

The design process is reasonably divided into separate stages to simplify the task in practice. Only the first-order parameters of individual components are determined in the first stage [5, 6]. Then, zoom system components are often implemented as achromats to decrease chromatic aberrations. However, even this does not help the designer correct the

Пропозиція для цитування цієї статті: В. М. Сокурєнко, О. М. Сокурєнко, «Автоматизоване проектування панкратичного прицілу з розширеними параметрами», *Наукові вісті КНУ*, № 1–2, с. 102–109, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.4.252713

Offer a citation for this article: Vyacheslav V. Sokurenko, Oleg V. Sokurenko, “Automated design of zoom rifle scope with extended parameters”, *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 102–109, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.4.252713

residual chromatism in the entire range of the component movements.

A serious number of works were devoted to zoom systems design (for example, [7–13]). However, no ‘universal’ approach was found for obtaining optimal solutions.

Brief review of methods for designing zoom optical systems

An analytical solution to the problem of parametric synthesis for an arbitrary zoom optical system is not possible due to the complexity and multidimensional nature of the problem. In this regard, the following common approach is often applied to design zoom optical systems. According to it, the first-order properties and the trajectories of component movements (loci) are first determined [7–13]. All components are synthesized based on the 3rd-order aberration theory. Then the whole optical system is ‘assembled’ from the obtained elements, and a local optimization algorithm is launched. The local optimizer improves the existing starting solution by introducing relatively small changes in variable prescription data. It involves the computation of the first and second derivatives at each step. The iterative process continues until the algorithm finds an optimal solution or an offered time limit expires. Despite the advantages, the design approach has several drawbacks, the main of which are the following: the design procedure is quite lengthy; it requires the active participation of the designer; the solution is limited to lower-order aberrations, and the starting optical system must provide high image quality.

Global optimization methods have been increasingly used in different fields of science and technology to overcome (or at least reduce) design difficulties [14–17]. They determine a pseudo-optimal solution in a multidimensional set of possible solutions satisfying the designer’s requirements. The merit functions are often compound mathematical functions containing individual components with different weights. Thus, global optimizers reduce the dependence of the result on the designer’s experience and can provide (although not guarantee) a desired or acceptable solution to complex technical problems.

Various global optimization algorithms have been actively used also for the design of optical systems in recent years [18–32]. Thus, Young introduced a point-by-point design algorithm that allows obtaining free-form imaging systems with improved characteristics [22]. Paper [23] presented a multi-objective

approach of evolutionary memetic optimization dividing the process into three different phases: selection of optical glasses, analysis of possible solutions, and the detailed study. In papers [24–26], a genetic algorithm helped to develop classic lenses and zoom systems with linear and mechanical compensation of image plane shift. Two versions of the ant colony optimization algorithm were implemented and tested for optical design problems [27]. A method of automatic design of a medium-wave infrared zoom system was described in papers [28, 29]. Similar global search algorithms were successfully applied for the developments of varifocal lenses, aspherical lenses, X-ray lenses [30–33], or finding the starting schemes of zoom systems [34, 35].

Despite the above-mentioned, to date, there are few publications devoted to partial or complete automation of the procedure of aberration design of zoom optical systems (and, in particular, riflescopes).

Problem statement

The aim of this work is to test the effectiveness of automated parametric aberration synthesis of a complex multi-lens optical system of riflescope with variable parameters. Such verification is done by computer simulation of the developed procedure using one of the modern global optimization algorithms.

In particular, for the parametric aberration synthesis of the optical system, it is proposed to apply a modified version of the adaptive Cauchy differential evolution method [36, 37]. In this method, each point of the current population stores its numeric values of the scaling and crossover factors specific to classic differential evolution. The algorithm generates new random values of these parameters using the Cauchy distribution at each iteration. These random values have mean values obtained by averaging parameters within the population at the previous iterations. Compared with the Gaussian (normal) distribution, the Cauchy distribution function provides wider deviations of random values, which allows a more detailed study of the given merit function in the multidimensional parameter space. New values of specific parameters are saved for a generated trial point only if the merit function is improved. Thus, the algorithm adjusts its parameters for a current task. In general, the algorithm delivers fast convergence, the high quality of a solution, and is efficient when searching optimum values within the multidimensional functional space.

Earlier [38–43], the developed computer program implementing the modified versions of differ-

ential evolution has helped the authors to obtain the prescription data of different optical systems with fixed parameters in an automatic mode. Any surface radius, axial lens or air thickness, edge thickness, or glass parameter can be an optimization variable. In more complex cases, the optimization variables may include aspheric coefficients, specific parameters of optical surfaces (e.g., parameters of different diffraction gratings), and mediums data (including gradient mediums) [44]. In this work, however, such specific parameters are not involved. Due to the requirements of manufacturability and cheapness, all surfaces in the developed optical system must be spherical, and ordinary glasses only should be selected from the given catalog(s) for all lenses.

The proposed approach

The procedure of the parametric synthesis of an arbitrary optical system starts with setting the main functional parameters (like the spectral range, the field of view, and the relative aperture) and determining the overall component structure of the optical system. In this case, all lenses are distributed (by numbers) between the components.

Next, the optimization variables are to be selected. When designing optical systems containing only flat and spherical optical surfaces, such variables include surfaces' radii, axial lens thicknesses, and optical glass parameters. The designer should indicate the ranges of acceptable values and practically arbitrary initial values of all variables.

By freezing the marginal ray's exit angle at the rear optical surface of the system, one can ensure the desired fixed value of the effective focal length of the system. Obviously, for all configurations of the telescopic optical systems, this angle must be equal to zero, and thus their effective focal length will be infinite.

For the parametric synthesis of the optical systems, one can set a widely-used merit function minimizing the RMS sizes of light spots at the image surface for specified object field points of view. This approach does not require any level of image quality from the initial optical system, but it is significant to have the rays passing through the system from all object field points. Therefore, the initial optical system may be simply defined as a set of plane-parallel plates.

In the case of the synthesis of diffraction-limited optical systems, other merit functions can minimize the wavefront deformations for all specified beams or maximize the modulation transfer function values at different spatial frequencies and field points. Such

merit functions are rational to use in the final stages of designing optical systems with high image quality.

When establishing the merit function, it is rational to set the limits for the total axial length of the optical system, acceptable ranges for axial and edge thicknesses, the maximum values of light heights, and other restrictions necessary for the physical implementation of the system.

The default elements of the merit function are often generated automatically by the developed software to simplify the merit function setup. Additionally, it is possible to restrict the maximum values of individual aberrations (e.g., spherical aberration, relative distortion, longitudinal or lateral chromatic aberration).

Then, the main design phase launches one of the global optimization algorithms implemented in the program. This automatic process does not require any participation of the designer. Because global optimization algorithms require essential computational power, this phase will be the longest in time. Therefore, it is rational to apply software providing concurrent calculations to shorten the time interval required for the optimization process.

In most practical cases, the global optimization procedure results in an acceptable final solution (of course, if such a solution exists under specified restrictions). If the algorithm is prematurely interrupted by the designer, a local optimization tool can be engaged to 'fine-tune' the image quality of the optical system.

Example of zoom lens design

As a numeric design example, a zoom riflescope optical system was chosen with the magnification of 5–25 \times and the entrance pupil diameter of 60 mm. Its reticle is to be located in the first focal plane. The total number of lenses should not exceed 13. The angular field of view in the image space in all zoom configurations of the system should be at least 32 $^\circ$ in the wide-angle mode and 40 $^\circ$ in the narrow-angle mode. The riflescope should operate in the visible spectral range (0.47...0.656 μm) with the primary wavelength of 0.555 μm . Table 1 includes spectral data used in the simulation.

Table 1. Wavelength data used in the design

Wavelength, μm	0.41	0.51	0.555	0.61	0.656
Relative weight	1	2	3	2	1

Vignetting of rays is allowed in the wide-angle mode only when the exit pupil diameter exceeds 8 mm.

Fig. 1 illustrates a general schematic structure of the optical system of the zoom riflescope. From a functional point of view, the riflescope includes a two-component telephoto lens, a reticle plate, a two-lens fixed focusing component, a two-lens zoom module, and a four-lens eyepiece. The fixed focusing component with positive optical power reduces the light diameters of the next following zoom module. The zoom module itself contains two moving lenses to change magnifications. Notably, in this research, they are implemented as single lenses (not achromatic cemented doublets).

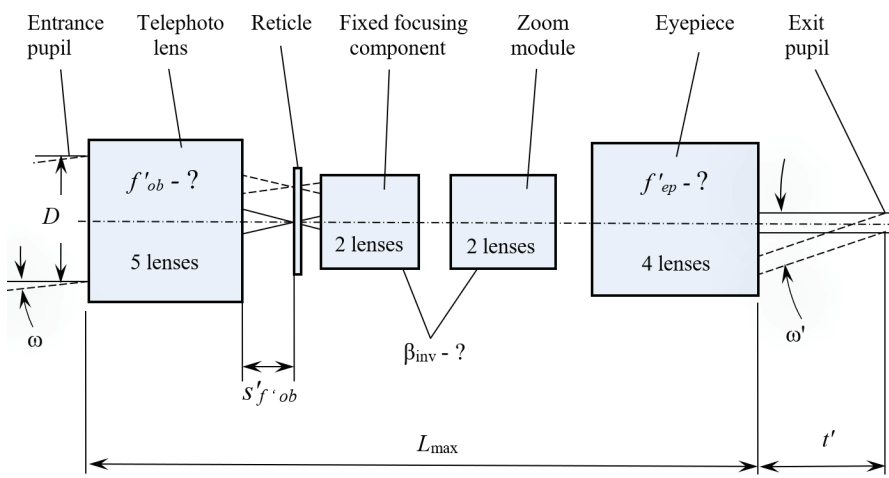


Fig. 1. General layout of the zoom sight optical system. Question marks indicate unknown parameters which are to be determined by the program

In the simulation, five zoom configurations were considered to achieve high image quality in the entire magnification range (5-25 \times). In each zoom configuration, the numeric values were pre-determined for the angular fields both in the object and image spaces, as well as the exit pupil diameters. Table 2 presents the established values of external functional parameters.

During the parametric synthesis of the riflescope, the minimum acceptable values for axial and edge lens thickness were set to 2.8 mm and 2 mm, respectively. The distance from the last surface of

the telephoto lens' second component to the reticle plane should be between 10 and 80 mm. In all zoom configurations, the eye relief was within the range of 106 to 111 mm. For riflescope mounting reasons, the maximum surface light diameters were restricted to 23 mm for the inverting sub-system and 40 mm for the eyepiece. The total length L_{max} of the optical system (i.e., the distance from the front surface of the telephoto lens to the rear surface of the eyepiece) was limited to 390 mm.

The overall merit included several additional items to reduce the field curvature and provide a better quality of the real image formed by the telephoto lens at the reticle. These items forced the algorithm to correct transverse aberrations of a few meridional rays of the peripheral beam at the reticle's plane.

During the synthesis, almost all radii of optical surfaces and axial thicknesses were indicated as optimization variables. Besides, all glasses were selected by the program automatically from the glass catalog CDGM. The refractive indices for the primary wavelength were observed in the range of 1.45...1.85, while the Abbe numbers were from 20 to 88. The total number of unknown parameters (variables) was 91.

The initial optical system of the zoom riflescope was set identically in all zoom configurations. Fig. 2 shows its schematic view.

In principle, at any intermediate zoom configuration of the optical system of the riflescope, its angular magnification Γ can be determined by the formula:

$$\Gamma = \frac{f'_{ob}}{f'_{ep}} \beta_{inv},$$

Table 2. External parameters of the zoom riflescope

Zoom configuration	Magnification Γ, \times	Angular field of view in the object space 2ω , degrees	Angular field of view in the image space $2\omega'$, degrees	Entrance pupil diameter D , mm	Exit pupil diameter D' , mm
1	25	0.83	41.2	60	2.4
2	20	0.98	39	60	3
3	15	1.22	36,8	60	4
4	10	1.74	34.6	60	6
5	5	3.26	32.4	42	8.4

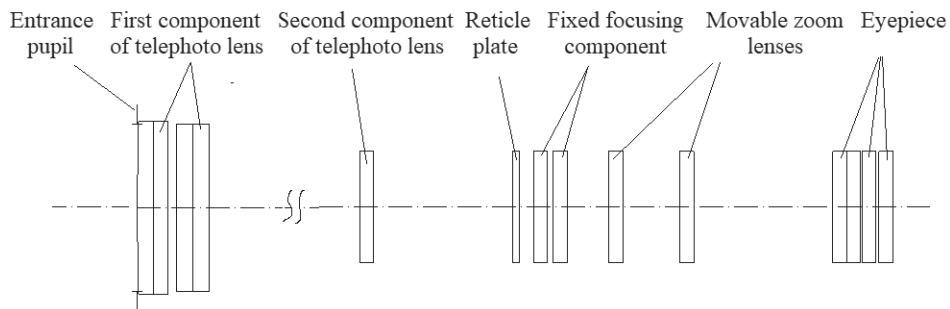


Fig. 2. Scheme of a starting optical system of the zoom rifle scope specified as a set of plane-parallel plates identically in all zoom configurations

where f'_{ob} is the effective focal length of the telephoto lens; β_{inv} is the lateral magnification of the inverting subsystem which itself contains the fixed focusing component and the zoom module; f'_{ep} is the effective focal length of the eyepiece. Here it is important to note that the designer may not specify the numeric values of f'_{ob} , β_{inv} , and f'_{ep} , and the optical powers of the positive and negative components of the telephoto lens. In this research, all these parameters were not pre-determined in any form, and

their optimum values were found exclusively by the global optimizer.

The simulation results show that the procedure of global optimization with 91 variables requires approximately 30–40 hours of work on a computer with an Intel Core i9-9900K processor (8 cores, 16 threads) operating concurrently. Fig. 3 illustrates the optical layout of the developed rifle scope for different intermediate zoom configurations.

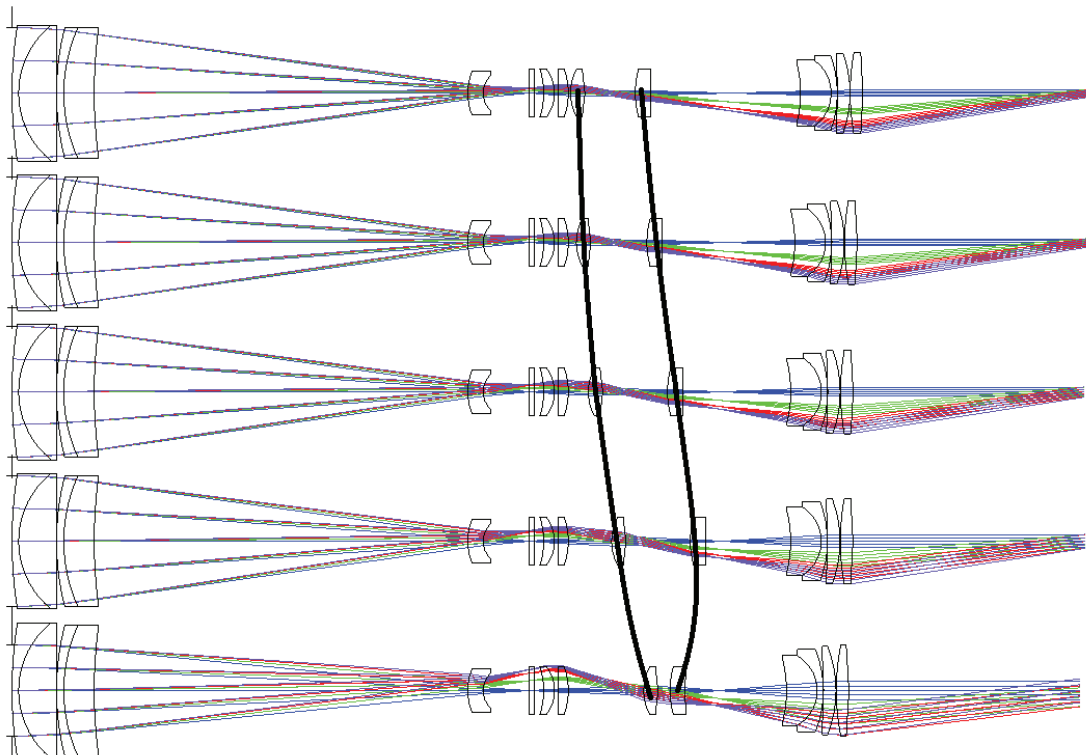


Fig. 3. Schematic diagram of the obtained zoom rifle scope. The diagram shows the system in different configurations for magnifications Γ (from top to bottom): 25 \times , 20 \times , 15 \times , 10 \times , and 5 \times . Thick curves indicate zoom lens trajectories. This optical system was synthesized automatically solely by the global optimization algorithm without applying the local optimizer

The program met all restrictions specified earlier by the designer for the prescription data of the lens system. The image quality of the obtained optical system can be estimated by the root mean square (RMS) values of the angular aberrations of the output axial beams. Table 3 includes their numeric values for five zoom configurations.

Table 3. Values of found angular aberrations of the developed zoom riflescope

Spectral range in which aberrations were evaluated	RMS values of angular aberrations in [arc. minutes] evaluated for axial field points at different visible magnifications Γ				
	$\Gamma = 25\times$	$\Gamma = 20\times$	$\Gamma = 5\times$	$\Gamma = 0\times$	$\Gamma = 5\times$
The primary wavelength (0.555 μm)	0.61	0.49	0.35	0.28	0.65
Wide spectral range (0.47...0.656 μm)	1.21	1.00	0.77	0.64	0.97

As it is clear from Table 3, the RMS values of the angular aberrations of the axial beams in all configurations of the developed zoom riflescope system do not exceed 0.7 angular minute for the primary wavelength and 1.25 angular minute in the whole visible spectral range. It proves the high image quality achieved by the global optimization algorithm.

References

- [1] W. J. Smith, *Modern Lens Design*, 2nd Edition. McGraw Hill Professional. 2004. – 631 p.
- [2] M. Laikin. *Lens Design*, 4th Edition. CRC Press. 2018. – 512 p.
- [3] A. Mann. *Infrared optics and zoom lenses*. Bellingham, Wash: SPIE Press. 2009. – 164 p.
- [4] J. L. Bentley, C. Olson. *Field Guide to Lens Design*. SPIE, 2012 – 140 p.
- [5] S. C. Park and R. R. Shannon, “Zoom lens design using lens modules,” *Opt. Eng.* 35(6), 1668–1676 (1996). DOI: 10.1117/1.600742.
- [6] S. C. Park and S. H. Lee, “Zoom lens design for a 10x slim camera using successive procedures,” *J. Opt. Soc. Korea* 17(6), 518–524 (2013). DOI: 10.3807/JOSK.2013.17.6.518.
- [7] K. Tanaka, “Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 1: Four-component type,” *Appl. Opt.* 21(12), 2174–2183 (1982). DOI: 10.1364/AO.21.002174.
- [8] K. Tanaka, “Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 2: Generalization of Yamaji type V,” *Appl. Opt.* 21(22), 4045–4053 (1982). DOI: 10.1364/AO.21.004045.
- [9] K. Tanaka, “Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 3: Five-component type,” *Appl. Opt.* 22(4), 541–553 (1983). DOI: 10.1364/AO.22.000541.
- [10] Q. Hao, X. Cheng, and K. Du, “Four-group stabilized zoom lens design of two focal-length-variable elements,” *Opt. Express* 21(6), 7758–7767 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.007758.
- [11] A. Мікль and P. Новік, “Paraxial design of four-component zoom lens with fixed position of optical center composed of members with variable focal length,” *Opt. Express* 26(20), 25611–25616 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.025611.
- [12] A. Мікль and P. Новік, “Paraxial design of a four-component zoom lens with zero separation of principal planes and fixed position of an image focal point composed of members with constant focal length,” *Appl. Opt.* 58(15), 3957–3961 (2019). DOI: 10.1364/AO.58.003957.
- [13] Jinkai Zhang, Xiaobo Chen, Juntong Xi and Zhuoqi Wu, “Paraxial analysis of double-sided telecentric zoom lenses with three components,” *Appl. Opt.* 53, 4957–4967 (2014). DOI: 10.1364/AO.53.004957.
- [14] Eiben A., Smith J. *Introduction to Evolutionary Computing*; Springer-Verlag: Berlin, 2003. 300 p.
- [15] Haupt R., Haupt S. *Practical Genetic Algorithms*. Wiley-Interscience; 2nd edition, 2004. 272 p.

Future research should verify the feasibility of the considered approach for the automated design of high-quality zoom riflescopes, which will contain an increased total number of lenses, an extended magnification range, and improved functional characteristics.

Conclusions

Computer simulations of the development of the zoom riflescope with the magnification of 5–25 \times , the entrance pupil diameter of 60 mm, and the reticle located in the first focal plane have confirmed the effectiveness of the proposed algorithm to design automatically complex multi-lens optical systems with variable parameters. The obtained results proved the high image quality of the generated 13-lens riflescope with the long eye relief. The implemented modification of the adaptive Cauchy differential evolution method can be considered a powerful tool that helps to automate the parametric synthesis of multicomponent optical systems of zoom riflescopes, taking into account the requirements set by the designer. Future research should test the feasibility of the automated design of other riflescopes containing more lenses and providing extreme performances.

- [16] Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems. / H. Gross, H. Zügge, M. Peschka, F. Blechinger; Edited by Herbert Gross. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007. – ISBN 978-3527403790.
- [17] V. M. Sokurenko, V. S. Nedilyuk, “Numeric study of stochastic methods for continuous global optimization,” *Research Bulletin of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”*, 2012, #1, pp. 81–88 (in Ukrainian).
- [18] D. Dilworth. Lens Design: Automatic and Quasi-autonomous Computational Methods and Techniques. Institute of Physics Publishing, 2018. 400 p.
- [19] K. Huschel, V. Lakshminarayanan, “Genetic algorithms for lens design: a review”, *Journal of Optics* 48(1), pg. 134, (2018); DOI: 10.1007/s12596-018-0497-3.
- [20] C. Gagnñ, J. Beaulieu, M. Parizeau et al., “Human-competitive lens system design with evolution strategies”, *Applied Soft Computing* 8(4), pg. 1439, (2008); DOI: 10.1016/j.asoc.2007.10.018.
- [21] S. D. Campbell, D. Sell, R. P. Jenkins et al., “Review of numerical optimization techniques for meta-device design [Invited]”, *Optical Materials Express* 9(4), pg. 1842, (2019); DOI: 10.1364/ome.9.001842.
- [22] T. Yang, G. F. Jin and J. Zhu, “Automated design of freeform imaging systems,” *Light: Science and Applications*, Vol. 6(10), e17081 (2017). DOI: 10.1038/lsa.2017.81.
- [23] B. F. C. Albuquerque, F. L. Sousa and A. S. Montes, “Multi-objective approach for the automatic design of optical systems”, *Opt. Express* 24(6), 6619–6643 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.006619.
- [24] X. Chen and K. Yamamoto, “An experiment in genetic optimization in lens design”, *J. Mod. Opt.* 44(9), 1693–1702 (1997). DOI: 10.1080/09500349708230769.
- [25] S. Pal and L. Hazra, “Structural design of mechanically compensated zoom lenses by evolutionary programming”, *Opt. Eng.* 51(6), 063001 (2012). DOI: 10.1117/1.OE.51.6.063001.
- [26] S. Pal and L. Hazra, “Ab initio synthesis of linearly compensated zoom lenses by evolutionary programming”, *Appl. Opt.* 50(10), 1434–1441 (2011). DOI: 10.1364/AO.50.001434.
- [27] Z. Y. Tang, M. Sonntag and H. Gross, “Ant colony optimization in lens design”, *Appl. Opt.* 58(23), 6357–6364 (2019). DOI: 10.1364/AO.58.006357.
- [28] Xiao Yu, Hanyu Wang, Yuan Yao, Songnian Tan, Yongsen Xu, and Yalin Ding, “Automatic design of a mid-wavelength infrared dual-conjugate zoom system based on particle swarm optimization”, *Opt. Express* 29, 14868–14882 (2021) DOI: 10.1364/OE.418584.
- [29] Chengxiang Fan, Bo Yang, Yunpeng Liu, Pengxiang Gu, Xingqi Wang and Hui Zong, “Zoom lens with high zoom ratio design based on Gaussian bracket and particle swarm optimization”, *Appl. Opt.* 60, 3217–3223 (2021). DOI: 10.1364/AO.418970.
- [30] Sun-Hyung Jo and Sung-Chan Park, “Design and analysis of an 8x four-group zoom system using focus tunable lenses”, *Opt. Express* 26, 13370–13382 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.013370.
- [31] H. Qin, “Aberration correction of a single aspheric lens with particle swarm algorithm”, *Opt. Commun.* 285(13-14), 2996–3000 (2012). DOI: 10.1016/j.optcom.2012.02.083.
- [32] D. B. Guo, L. Yin, and G. Yuan, “New automatic optical design method based on combination of particle swarm optimization and least squares”, *Opt. Express* 27(12), pp. 17027–17040 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.017027.
- [33] P. Zhou, X. R. Ma, S. Zhang, Z. G. Liu, Z. Y. Meng, Z. J. Xiang, X. Y. Wang, T. X. Sun, X. Y. Lin and Y. D. Li, “Application of particle swarm optimization in the design of a mono-capillary X-ray lens”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* 953, 163077 (2020). DOI: 10.1016/j.nima.2019.163077.
- [34] Z. C. Fan, S. L. Wei, Z. B. Zhu, Y. Mo, Y. Yan and D. Ma, “Automatically retrieving an initial design of a double-sided telecentric zoom lens based on a particle swarm optimization”, *Appl. Opt.* 58(27), pp. 7379–7386 (2019). DOI: 10.1364/AO.58.007379.
- [35] Z. C. Fan, S. L. Wei, Z. B. Zhu, Y. M. Yan, Y. Mo, L. S. Yan and D. L. Ma, “Globally optimal first-order design of zoom systems with fixed foci as well as high zoom ratio”, *Opt. Express* 27(26), pp. 38180–38190 (2019). DOI: 10.1364/OE.381116.
- [36] T. J. Choi, C. W. Ahn, J. An, “An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization”, *The Scientific World Journal*. – 2013. – Vol. 2013. – Article ID 969734, 12 pages. – DOI: 10.1155/2013/969734.
- [37] T. J. Choi, C. W. Ahn, “An adaptive Cauchy differential evolution algorithm with bias strategy adaptation mechanism for global numerical optimization,” *Journal of Computers*, 2014, Vol. 9, No 9, pp. 2139–2145. DOI: 10.4304/cp.9.9.2139-2145.
- [38] V. M. Sokurenko, Y. I. Makarenko, “Development of optical systems by global optimization methods”, *Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making*, 2015, #50(2), pp. 51–60 (in Ukrainian).
- [39] V. M. Sokurenko, I. S. Builov, “Application of the adaptive Cauchy differential evolution method for designing lenses”, *Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making*, 2016, #51(1), pp. 41–47 (in Ukrainian).
- [40] V. M. Sokurenko, O. E. Stikha, “Development of distortion corrected lenses”, *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, 2017, #1, pp. 99–105 (in Ukrainian).
- [41] V. M. Sokurenko, D. P. Bondarchuk, “Automated parametric synthesis of a lens with reduced distortion”, *Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making*, 2018, #56(2), pp. 18–24 (in Ukrainian).

- [42] V. M. Sokurenko, O. V. Trostyanska, "Synthesis of an eyepiece optical system for a high-resolution microdisplay", *Bulletin of Khmelnytsky National University: Technical Sciences*, 2019, #6 (279), pp. 206–210 (in Ukrainian). DOI: 10.31891/2307-5732-2019-279-6-206-210.
- [43] V. M. Sokurenko, I. O. Smazhko, "Automated design of an optical system of the SWIR lens", *Bulletin of Khmelnytsky National University: Technical Sciences*, 2019, #6 (279), pp. 202–205 (in Ukrainian). DOI: 10.31891/2307-5732-2019-279-6-202-205.
- [44] V. M. Sokurenko, M. M. Vakulenko, "Automated design of eyepieces with diffractive optical elements", *Herald of Khmelnytsky National University: Technical Sciences*, 2018, #1 (257), pp. 107–112 (in Ukrainian).

Сокурєнко В.М., Сокурєнко О.М.

АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК ПАНКРАТИЧНОГО ПРИЦІЛУ З РОЗШИРЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Проблематика. Проектування довільної афокальної панкратичної оптичної системи є складною і багатовимірною задачею, яка не може бути розв'язана аналітичним способом та вимагає значного досвіду та зусиль конструктора.

Мета дослідження. Подати та перевірити за допомогою моделювання метод автоматизованого проектування багатолінзових афокальних оптичних систем зі змінними параметрами та характеристиками.

Методика реалізації. Використання розробленого спеціалізованого програмного забезпечення з реалізованою модифікацією адаптивного диференціального еволюційного алгоритму Коші для параметричного синтезу багатокомпонентних панкратичних прицілів з розширеними функціональними параметрами.

Результати дослідження. Розроблена оптична система забезпечує 5-кратний перепад збільшень та кутове поле зору в параметрах простору від $3,26^\circ$ до $0,83^\circ$. Вона має прицільну сітку, розміщену в першій фокальній площині, діаметр вхідної зіниці 60 мм, видалення вихідної зіниці в діапазоні від 106 до 111 мм та максимальну довжину системи – 390 мм. Приціл містить 13 лінз у 10 компонентах. Проведене моделювання показало, що інтервал часу, необхідний для проведення безпосереднього автоматизованого розрахунку оптичної системи прицілу, становить близько 30–40 годин при загальних пошукових параметрах (змінних) 91. Середньоквадратичні значення кутових аберацій осьових пучків у всіх (п'ятих) станах синтезованої панкратичної системи не перевищують 1,25 кутової хвилини у всьому спектральному діапазоні. Алгоритм дозволяє визначити конструктивні параметри оптичних систем з урахуванням технічних вимог і обмежень, заданих конструктором.

Висновки. Комп'ютерне моделювання, проведене на прикладі розробки панкратичного прицілу з видимим збільшенням 5-25 \times , діаметром вхідної зіниці 60 мм та сіткою в передній фокальній площині, підтвердило ефективність запропонованого способу до автоматизованого розрахунку складних оптичних систем зі змінними параметрами. Отримані результати підтверджують високу якість зображення згенерованого 13-лінзового прицілу з віддаленою вихідною зіницею. Реалізовану модифікацію адаптивного методу диференційної еволюції Коші можна вважати потужним інструментом, який дозволяє здійснювати автоматизований параметричний синтез багатокомпонентних оптичних систем панкратичних прицілів з урахуванням вимог, заданих конструктором. Наступні дослідження доцільно направити на перевірку здійсненності автоматизованого розрахунку інших прицілів, які мають більшу кількість лінз та забезпечують екстремальні характеристики.

Ключові слова: автоматизований розрахунок; панкратичний приціл; оптична система; параметричний синтез; глобальна оптимізація; аберація.

Рекомендована Радою
факультету приладобудування
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
26 грудня 2021 року

Прийнята до публікації
27 червня 2022 року

DOI: 10.20535/kpissn.2022.1-2.253045

УДК 621.357

Д.Ю. Ущাপовський*, А.І. Кушмирук, Г.С. Васильєв, О.В. Лінючева,
Р.М. Редько, О.Г. Лінючев, Г.Ю. Підвашецький, Т.О. Куроченко

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*corresponding author: soltdim@gmail.com

**КОРОЗИЙНА СТІЙКІСТЬ ГАЛЬВАНІЧНИХ НІКЕЛЕВИХ ОСАДІВ
Й ЕЛЕКТРОХІМІЧНА АКТИВНІСТЬ ПРОДУКТІВ ЇХ КОРОЗІЇ**

Проблематика. Блискучі гальванічні нікелеві покриття з підвищеним умістом сульфур у менш корозійностійкими, ніж матові. Особливо сильного корозійного руйнування блискучі нікелеві покриття зазнають в умовах, що імітують вологий тропічний клімат і характеризуються наявністю випарів оцтової кислоти.

Мета дослідження. Дослідити корозійну стійкість гальванічних нікелевих осадів у концентрованій оцтовій кислоті та її випарах, а також електрохімічну активність сульфід вмісних продуктів корозії блискучих нікелевих покриттів.

Методика реалізації. Потенціодинамічну та циклічну вольт-амперометрію застосовано, щоб дослідити електрохімічну активність гальванічних нікелевих покриттів і продуктів їх корозії. Швидкість корозії гальванічних нікелевих осадів визначено гравіметричним методом. Дослідження морфології поверхні та складу гальванічних осадів проведено за допомогою сканувальної електронної мікроскопії і рентгенофлуоресцентного аналізу.

Результати дослідження. Про підвищену електрохімічну активність сульфідних продуктів корозії блискучих нікелевих покриттів свідчать на порядок вищі значення катодних густин струму в циклічних вольт-амперних кривих (ЦВАК) у порівнянні з блискучими та матовими нікелевими гальванічними осадами, отриманими в ацетатних буферних розчинах. Показано, що сульфідні продукти корозії блискучих нікелевих покриттів, нанесені на основу з матової нікелевої фольги, збільшують швидкість її корозії за експонування в концентрованій оцтовій кислоті та її випарах.

Висновки. Виявлено значний вплив сульфур на інтенсифікацію корозії гальванічних нікелевих осадів у концентрованій оцтовій кислоті та її випарах. Зокрема, це можна пояснити розкладанням в оцтовій кислоті сульфиду нікелю, що входить до складу покриття. Сульфур у ступені окислення (-2) взаємодіє з пасивуючими оксидними покриттями з утворенням адсорбованого моношару, що й призводить до переходу нікелю в активний стан. Подальші дослідження будуть спрямовані на глибше вивчення електрохімічних властивостей продуктів корозії блискучих нікелевих покриттів.

Ключові слова: нікелеві покриття; продукти корозії; сульфідні нікелю; корозійна активність; каталізатор.

Вступ

Блискучі нікелеві покриття, які містять у структурі сульфур, є менш корозійно стійкими, ніж матові, а надто вони зазнають корозійного руйнування в умовах, що імітують вологий тропічний клімат із випарами оцтової кислоти [1], [2].

Як показано у [2], протягом експонування у випарах концентрованої оцтової кислоти

на поверхні блискучих із підвищеним умістом сульфур нікелевих осадів і покриттів формується тонка чорна плівка із сульфідів нікелю (NiS_x), зокрема з Ni_3S_2 . Про утворення сульфідних продуктів корозії на поверхні нікелю, у структуру якого введено сульфур, свідчать також дані роботи [3].

Згідно з [4], підвищена корозійна активність сульфурвмісних нікелевих матеріалів обумовлена тим, що за корозійного руйнування зразка

Пропозиція для цитування цієї статті: Ущাপовський, А.І. Кушмирук, Г.С. Васильєв, О.В. Лінючева, Р.М. Редько, О.Г. Лінючев, Г.Ю. Підвашецький, Т.О. Куроченко, «Корозійна стійкість гальванічних нікелевих осадів й електрохімічна активність продуктів їх корозії», *Наукові вісті КПІ*, № 1–2, с. 110–117, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.253045

Offer a citation for this article: Ushchapovskiy D.Yu., Kushmyruk A.I., Vasiliev G.S., Linyucheva O.V., Redko R.M., Linyuchev O.G., Pidvashetsky G.Yu., Kurochenko T.A., “Corrosion resistance of galvanic nickel deposits and electrochemical activity of their corrosion products”, *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 110–117, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.253045.

на його поверхні утворюється моношар адсорбованого сульфур, який перешкоджає утворенню суцільного пасивного оксидного шару. Сульфідні нікелю, зокрема Ni_3S_2 , є ефективними каталізаторами електровідновлення кисню [5, 6], а на його поверхні та поверхні нікелевих осадів під час катодної поляризації можуть відбуватися псевдоємнісні процеси [7].

Постановка задачі

Раніше, зокрема у [8], вважали, що основним деполаризатором під час корозії блискучих нікелевих покриттів у випарах оцтової кислоти є кисень. У [2] висунуто припущення, що сульфідні можуть активізувати корозію нікелю з кисневою деполаризацією у випарах і розчинах оцтової кислоти, стаючи катодними ділянками та прискорюючи електровідновлення кисню. Однак питання впливу сульфур на корозійний процес і його ролі як катодної присадки у вигляді сульфиду чи як депасиватора [3] досі дискусійне.

Метою роботи є дослідити корозійну стійкість гальванічних нікелевих осадів у концентрованій оцтовій кислоті та її випарах, а також електрохімічну активність сульфідних продуктів корозії блискучих нікелевих покриттів.

Методика експерименту

Для досліджень використовували зразки з електроосадженої матової нікелевої фольги завтовшки 50 мкм з електроліту, що містив (г/дм³): $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 220...250; $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 30...60; H_3BO_3 – 30; добавку змочувач-диспергатор “Nitech Netzmittel M” 0,3 (см³/дм³) [1], [2]. Щоб отримати блискуче нікелеве покриття завтовшки 6 мкм на зразках із титанової та матової нікелевої фольги й електроосадити блискучу нікелеву фольгу завтовшки 50 мкм, в електроліт додатково вводили сахарин (3...6 г/дм³). Саме він був джерелом сульфур, включеним у структуру нікелевих осадів. За результатами рентгенофлюоресцентного аналізу, вміст сульфур в блискучих нікелевих осадів становив близько 0,25 мас.%, у матових – 0,049 мас.%. Перед електроосадженням нікелеву фольгу знежирювали пастою карбонату калію та витравлювали в розчині хлоридної кислоти з концентрацією 100 г/дм³. Титанову фольгу марки “BT1” перед електроосадженням нікелевого покриття витравлювали в розчині, що містив 40 г/дм³ хлориду натрію

та 100 г/дм³ сульфатної кислоти, за температури 80 °С до активного виділення водню.

Корозійні випробування в закритих ексикаторах з об'ємом 2 дм³ проводили експонуванням зразків електроосадженої нікелевої фольги в безводній (17,5 М) оцтовій кислоті та її випарах (температура досліджень 18 °С). Зразки прямокутної форми з матової нікелевої та титанової фольги, на поверхню якої електроосадили блискуче нікелеве покриття завтовшки 6 мкм із підвищеним умістом сульфур, під час корозійних випробувань розміщували у випарах безводної оцтової кислоти або ж частково чи повністю занурювали в неї. При цьому висота стовпа кислоти над зразком становила 1 см. Після корозійних випробувань розчинні продукти корозії змивали дистильованою водою, а малорозчинні механічно видаляли за допомогою м'яких волосяних щіток. Площа зразків нікелевої фольги становила 9...11 см². Швидкість корозії розраховували на основі зміни маси зразків фольги, визначеної за допомогою аналітичних ваг “ВЛР-200” до та після експозиції.

Електрохімічну активність гальванічних нікелевих осадів досліджували на основі поляризаційних вимірювань. Для цього використовували зразки блискучої та матової нікелевої фольги, титану, а також зразки зі сформованими сульфідними продуктами корозії блискучих нікелевих покриттів. Плівки сульфідів нікелю утворювали на зразках експонуванням відповідних зразків з електроосадженим блискучим нікелевим покриттям у безводній оцтовій кислоті протягом 3...6 діб. Сканувальна електронна мікроскопія показала, що впродовж цього періоду на поверхні титанових зразків залишалася лише фаза NiS_x . Поляризаційні вимірювання проводили в розчинах ацетату натрію з концентрацією 30 г/дм³ без (рН 8,4) та з додаванням концентрованої оцтової кислоти (рН 3,7) у триелектродній комірці з використанням цифрового потенціостата “Versa-Stat 2000”. Температура досліджень становила 18 °С. Електродом порівняння був насичений хлорид-срібний електрод, а допоміжним – платиновий електрод. Значення потенціалів переводили у шкалу стандартного водневого електрода (СВЕ). Швидкість сканування під час отримання потенціодинамічних катодних поляризаційних кривих становила 1 мВ/с. За отримання циклічних вольт-амперних кривих (ЦВАК) швидкість сканування становила 10 мВ/с. Хроноамперограми знімали за потенціалу –0,2 В у шкалі СВЕ.

Хімічний склад нікелевих осадів визначали за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізу на експрес-аналізаторі “EXPERT 3L”. Сканувальну електронну мікроскопію поверхні зразків проводили за допомогою растрового електронного мікроскопа “РЭМ-106И” із системою енергодисперсійного мікроаналізу “INCA Energy 350”.

Результати та їх обговорення

Дослідження електрохімічної активності продуктів корозії блискучих нікелевих покриттів. Як показано у [2], корозія блискучих нікелевих осадів у випарах оцтової кислоти відбувається з кисневою деполаризацією. У цій же роботі висловлено припущення, що кисень буде електровідновлюватись саме на сульфідних продуктах корозії блискучих нікелевих покриттів. Щоб дослідити електрохімічну активність сульфідних продуктів корозії, проведено поляризаційні вимірювання в ацетатних буферних розчинах із рН 3,7 і рН 8,4. Відповідні значення рН розчинів, згідно з [3], визначають інтервал термодинамічної стабільності Ni_3S_2 . Зображення зразків і структуру сульфідних продуктів корозії показано на рис. 1.

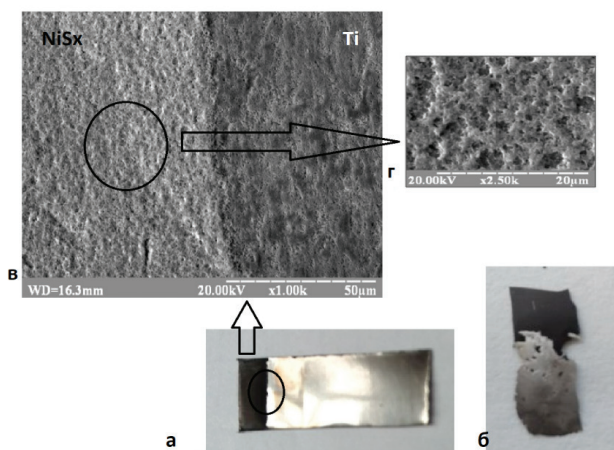
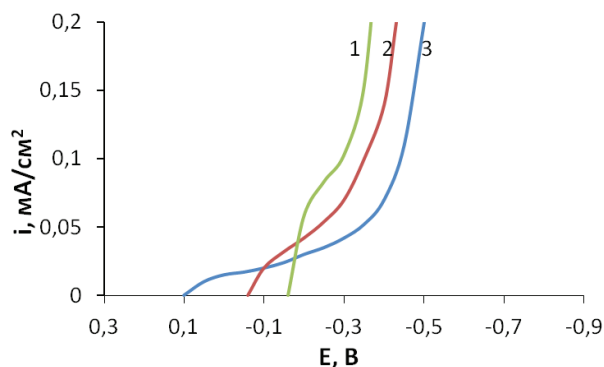


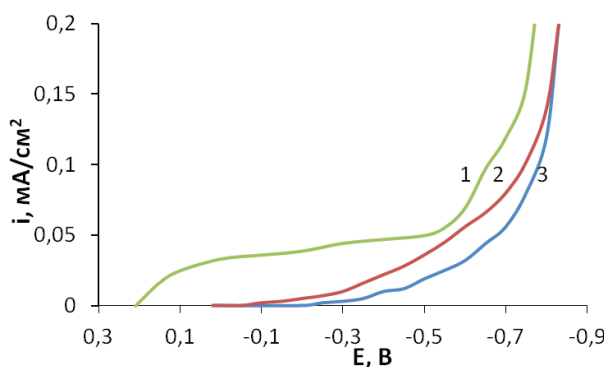
Рис. 1. Зразки титанової (а, в, г) і нікелевої (б) фольги з покриттям NiS_x (чорна плівка)

На потенціодинамічних катодних поляризаційних кривих в ацетатному буфері за рН 3,7 (рис. 2, а) у досліджуваних матеріалах є дві характерні ділянки. Перша – з окресленим граничним струмом, що, можливо, належить електровідновленню кисню. Друга – різкий підйом кривої із виділенням газу, що, очевидно, відповідає

виділенню водню ($E_{H_2} = -0,059pH = -0,218$ В). (дефіси треба замінити на мінуси) У разі переходу від матового нікелю до сульфідних продуктів корозії блискучих нікелевих покриттів стаціонарний потенціал зсувається в область більш негативних значень, а ширина першої ділянки поляризаційної кривої зменшується.



а



б

Рис. 2. Катодні поляризаційні криві в розчині ацетату натрію з концентрацією 30 г/дм³ із додаванням оцтової кислоти (рН 3,7) (а) та без неї (рН 8,4) (б): 1 – блискучий нікель із покриттям NiS_x ; 2 – блискучий нікель; 3 – матовий нікель

Після збільшення рН ацетатного буфера до 8,4 поверхні матового та блискучого нікелю вкриваються пасивним шаром, тому не відбувається катодний процес. Хвиля із граничним струмом близько 40 мкА/см² є лише на нікелевих зразках зі сформованим покриттям NiS_x . Для них, якщо порівняти з іншими досліджуваними матеріалами, також властива найменша поляризація електровідновлення водню в обох досліджуваних розчинах. За наявності в покритті NiS_x збільшення рН ацетатного розчину призводить до зміщення стаціонарного потенціалу

майже на 0,3 В в анодний бік. Якщо сульфідів у покритті немає, вплив рН на стаціонарні потенціали незначний.

На рис. 3, 4 показано ЦВАК, зняті зі швидкістю розгортання 10 мВ/с в ацетатному буфері на зразках нікелевої та титанової фольги з і без покриття NiS_x . Густина струму вказано з розрахунку на геометричну поверхню електродів. Катодну поляризацію обмежували з огляду на різке зростання струму, зумовлене виділенням водню.

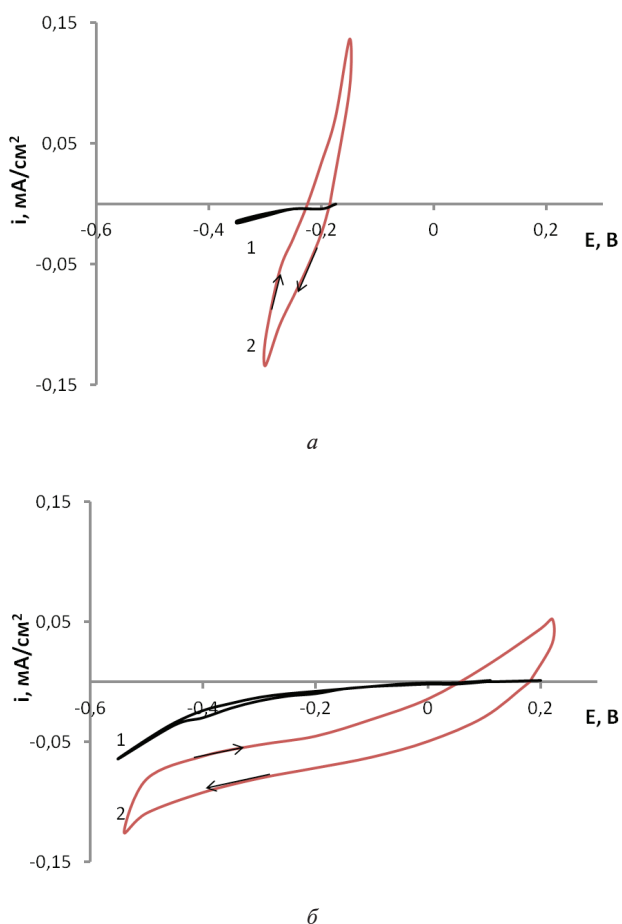


Рис. 3. Циклічні вольт-амперні криві, зняті зі швидкістю сканування 10 мВ/с в розчині ацетату натрію з концентрацією 30 г/дм³ із додаванням оцтової кислоти (рН 3,7) (а) та без неї (рН 8,4) (б): 1 – блискучий нікель; 2 – блискучий нікель із покриттям NiS_x

Для електродів із блискучого нікелю (рис. 3, криві 1) у досліджуваному інтервалі потенціалів характерні незначні катодні струми, пов'язані зі зміною заряду подвійного електричного шару (ПЕШ) і стехіометрії оксидних шарів, а також відновленням розчиненого кисню. За потенціалів, менших за рівноважний, струм зростає через реакцію електрохімічного виділення водню.

Незалежно від рН розчину цей процес відбувається зі значною перенапрягою.

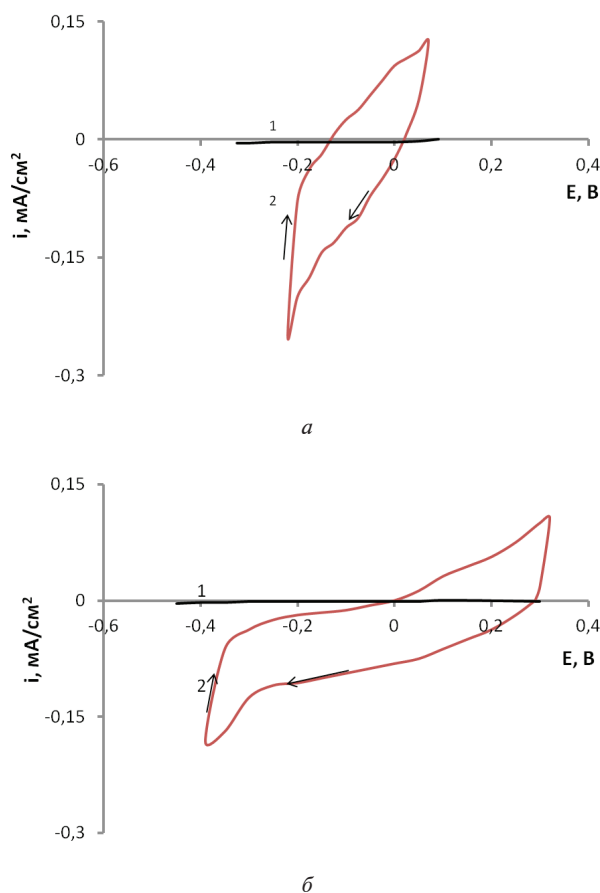


Рис. 4. Циклічні вольт-амперні криві, зняті зі швидкістю розгортання 10 мВ/с в розчині ацетату натрію з концентрацією 30 г/дм³ із додаванням оцтової кислоти (рН 3,7) (а) та без неї (рН 8,4) (б): 1 – титан; 2 – титан із покриттям NiS_x

Для титанових електродів (рис. 4, криві 1) за цих рН і потенціалів значення струмів не перевищує 10 мкА/см² й пов'язане зі зміною заряду ПЕШ і стехіометрії оксидних шарів. З огляду на високу перенапрягу водень не виділяється. Така поведінка титанового електрода в розчинах ацетатного буфера вказує на його високу інертність.

На електродах із покриттям NiS_x (рис. 3, 4, криві 2) величини поляризаційних струмів зростають у десятки разів, що пов'язано зі збільшенням фактичної електродної поверхні через поруватість NiS_x . Значний гістерезис між прямим і зворотним ходом кривої може бути викликаний перебігом псевдоємнісних процесів – нестехіометричної окисно-відновної реакції сполук нікелю (II) та (III) [7].

Із рис. 4 видно, що на електродах з покриттям NiS_x водень виділяється з низькою перенапругою. Для титанового електрода з покриттям NiS_x за рН 8,4 значне зростання катодного струму зміщене в анодний бік на 0,2 В від рівноважного потенціалу виділення водню (рис. 4, крива 2). Це, ймовірно, викликано утворенням гідридів титану за реакцією [9]:



Анодні струми ЦВАК викликані утворенням адсорбованого чи хемосорбованого оксигену, зміною стехіометрії NiS_x й окисненням гідридів металів або адсорбованого водню.

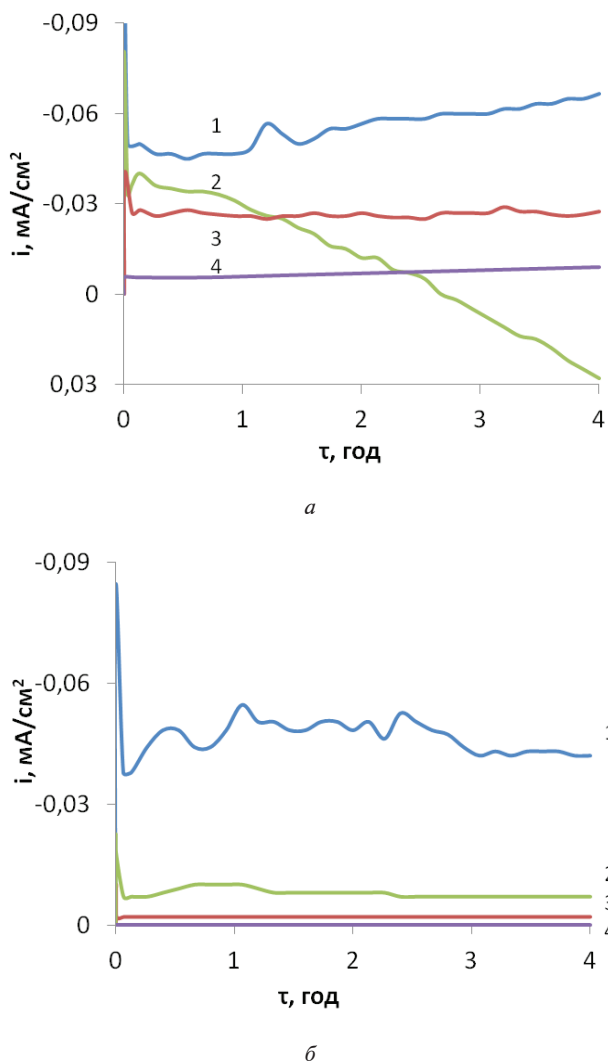


Рис. 5. Зміна сили струму в часі за потенціалу $-0,2$ В у розчині ацетату натрію з концентрацією 30 г/дм³ із додаванням оцтової кислоти (рН 3,7) (а) та без неї (рН 8,4) (б): 1 – титан із покриттям NiS_x ; 2 – блискучий нікель; 3 – матовий нікель; 4 – титан

Хроноамперометричні дослідження за стаціонарного потенціалу $-0,2$ В, що входить до області потенціалів, за яких катодний процес відбувається на граничному струмі до виділення водню (див. рис. 2), показали найбільші катодні струми на титанових електродах із покриттям NiS_x , сформованим із сульфурних продуктів корозії блискучого нікелю (рис. 5, криві 1). Для цього електрода густина катодного струму фактично не залежить від рН розчину та становить $40\text{...}50$ мкА/см², що згідно з [10] є близьким до значення граничного дифузійного струму відновлення кисню в розчинах оцтової кислоти на нікелі.

У слабкокислому середовищі на блискучому нікелі в початковий момент густина струму близька за значенням до характерної для титанового електрода з покриттям NiS_x (рис. 5, а, крива 2). Це може бути пов'язано з наявністю у структурі блискучих нікелевих покриттів сульфиду нікелю у формі Ni_3S_2 [11], який депасивує поверхню нікелю. Як видно з рис. 5, а, крива 2, за накладеного потенціалу ($-0,2$ В) у початковий момент відбувається переважно катодний процес, але згодом через депасивуючу дію сульфиду анодний процес пришвидшується. Нікель починає активно кородувати, що й веде до зміни полярності струму.

У слабколужному середовищі (рис. 5, б) струми катодного процесу на сульфідних покриттях корозії у п'ять-десять разів вищі, ніж на інших досліджуваних матеріалах, але вони не перевищують значення граничного струму відновлення кисню. Це вказує на те, що як матовий, так і блискучий нікель укріті щільним пасивним шаром.

Отже, ці дані показують підвищену електрохімічну активність сульфідних продуктів корозії блискучих нікелевих покриттів щодо зовнішньої поляризації. Однак середнє установлене значення струму на них збігається з наведеним у [10] значенням граничного струму відновлення кисню, що вказує на дифузійний контроль відповідного процесу.

Дослідження впливу сульфуру на корозію блискучих і матових нікелевих покриттів у концентрованій оцтовій кислоті та її випарах. Для визначення впливу сульфуру, що міститься в осадах (плівках) NiS_x , на корозійну поведінку нікелю в безводній оцтовій кислоті проведено серію дослідів, в яких моделювали умови доствалення кисню до поверхні зразків.

Покриття NiS_x на матовому нікелі отримували, використовуючи корозійне руйнування попередньо осадженого шару блискучого нікелю з підвищеним вмістом сульфуру [2]. Значення швидкості корозії матового нікелю, наведені далі на діаграмах, скореговано на втрати металу в покриттях блискучого нікелю.

Результати масометричного визначення швидкості корозії матового нікелю (рис. 6) вказують на значно більший вплив наявності на поверхні осадів NiS_x за полегшення транспортування кисню до поверхні зразка. Швидкість корозії матового нікелю незначно зростає у випарах, якщо порівняти зі значеннями в концентрованої оцтовій кислоті. Наявність на поверхні NiS_x призводить до зростання швидкості корозії майже вдвічі в обох випадках.

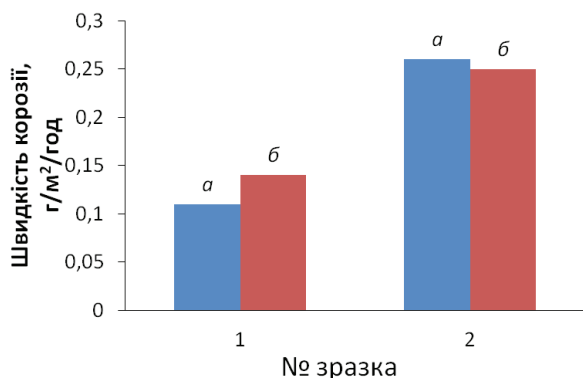


Рис. 6. Середня швидкість корозії нікелевих зразків протягом 14 діб експонування в концентрованій оцтовій кислоті (а) та її випарах (б): 1 – матовий нікель; 2 – матовий нікель, укритий блискучим нікелевим покриттям

Щоб сформувати оптимальні умови транспортування кисню, проведено серію випробувань із реалізацією “частково зануреного електрода”. Для цього дослідні зразки занурювали орієнтовно наполовину в безводну оцтову кислоту. Найактивніше зразок руйнувався під покриттям продуктів корозії блискучого нікелю в зоні “ватерлінії”. У цьому разі до такого результату призвели два фактори – зменшення товщини плівки розчину, що спричиняє полегшення доставлення кисню до поверхні матеріалу, та деполяризуючі властивості сполук NiS_x відносно реакції електрохімічного відновлення кисню (рис. 7).

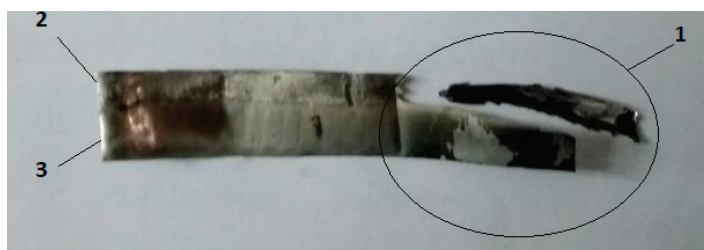


Рис. 7. Фото зразка фольги з матового нікелю, вкритого блискучим нікелем (36 % від загальної площі) після семи діб експонування за часткового занурення в концентровану оцтову кислоту: 1 – ділянка поверхні з продуктами корозії блискучого нікелевого покриття; 2 – ділянка поверхні зразка, що містилася над кислотою; 3 – ділянка поверхні зразка, що була в кислоті

Зміна умов доставлення кисню мало впливає на швидкість корозії матової фольги, що пов'язано з переважним впливом у цих умовах на швидкість корозії пасивних плівок на поверхні металу [3]. Однак на зразках матової фольги з осадами NiS_x за часткового занурення швидкість корозії зростає приблизно всемеро проти експонування в безводній оцтовій кислоті чи її випарах (рис. 6 (2); 8 (4)). Це вказує на полегшення процесу електровідновлення кисню, що є контролюваною стадією корозії в розчинах оцтової кислоти [2]. Визначальну роль кисню як основного деполяризатора корозійного процесу показує й характер корозійних руйнувань (рис. 7), подібний до тих, що відбуваються під час атмосферної корозії в зонах із диференціальною аерацією.

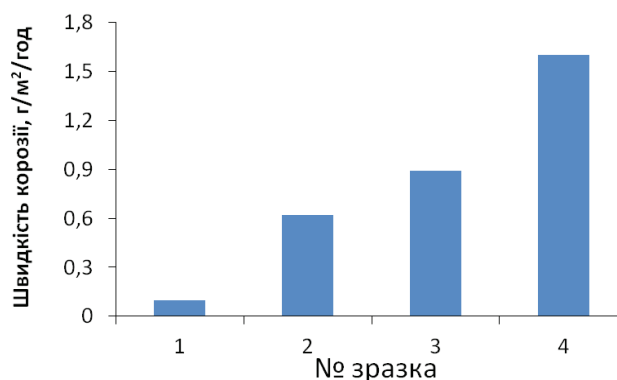


Рис. 8. Середня швидкість корозії протягом семи діб експонування за часткового занурення зразка в оцтову кислоту: 1 – матовий нікель; 2 – матовий нікель за сумісного експонування зі зразками блискучого нікелю; 3 – матовий нікель із частковим покриттям блискучим нікелем (36 % від загальної площі); 4 – матовий нікель, повністю вкритий блискучим нікелевим покриттям

Також виявлено, що експонування зразків блискучого та матового нікелю в одному розчині призводить до п'ятикратного збільшення швидкості корозії (рис. 9). За такої умови на поверхні матового нікелю утворювалася жовтувата плівка.

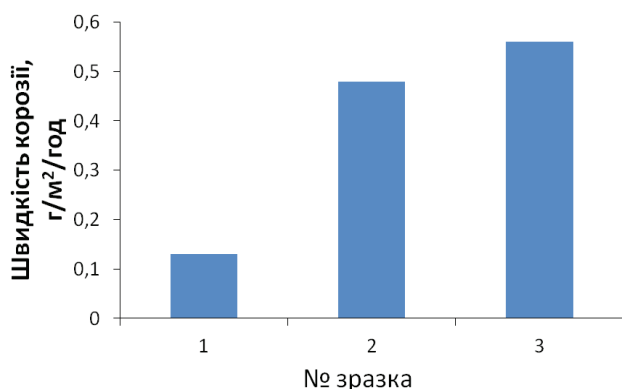
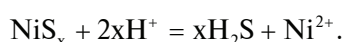
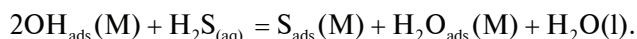
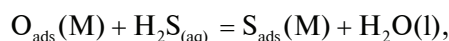


Рис. 9. Середня швидкість корозії нікелевих зразків протягом семи діб експонування в концентрованій оцтовій кислоті (1, 2) з додаванням Na_2S (0,1 моль/л) (3): 1, 3 – матовий нікель; 2 – матовий нікель за сумісного експонування зі зразками блискучого нікелю

Така поведінка матового нікелю, ймовірно, викликана перенесенням сульфурів зі зразка блискучого нікелю, що кородує, на поверхню матового. Згідно з діаграмою Пурбе для системи $\text{Ni} - \text{S} - \text{H}_2\text{O}$ [3] в безводній оцтовій кислоті за рН 1,76 сульфід нікелю термодинамічно нестійкий та мають вступати в реакцію з кислотою з утворенням винятково сірководню за реакцією



Утворений сірководень дифундує до поверхні сусідніх зразків матового нікелю, де взаємодіє з адсорбованим на поверхні киснем з утворенням атомів адсорбованого сульфурів за реакціями:



Це призводить до руйнування оксидного пасивного шару та зростання швидкості корозії матового нікелю.

Згідно з [3] повна депасивація нікелю відбувається, коли ступінь покриття адсорбованим сульфуром $\text{Ni} - \text{S} - \text{H}_2\text{O}$ (θ_s) становить 0,81, а поверхнева концентрація адсорбованого сульфурів за моношарового заповнення поверхні ($\theta_s = 1$) становить $40 \cdot 10^{-9}$ г/см².

Для підтвердження ймовірного впливу перенесення сульфурів (-2) між зразками пригото-

вано модельний розчин Na_2S в оцтовій кислоті, концентрація якого становила $8 \cdot 10^{-4}$ моль/л та відповідала максимально можливій концентрації H_2S , якої можна досягнути за переходу половини сульфурів з нікелевого покриття в попередньому досліді.

Довідкових даних щодо розчинності H_2S в оцтовій кислоті немає, однак обґрунтованим є припущення, що, як і в разі розчинності кисню, величина розчинності H_2S в оцтовій кислоті близька до розчинності його у воді, для якої за нормальних умов становить 0,13 М [12]. Розрахунки показують, що для замкненої системи, в якій проводили корозійні випробування, за встановлення рівноваги H_2S між газовою фазою та розчином кількість сульфурів в розчині перевищує в понад 100 разів кількість, необхідну для утворення моношару адсорбованого сульфурів на поверхні матового нікелю. Результати корозійних випробувань (рис. 9) показали, що за введення в оцтову кислоту сульфідів натрію швидкість корозії зростає майже так само, як і за одночасного експонування зразків із матового та блискучого нікелю. Отже, депасивуючий вплив сульфурів у сульфідній формі на поведінку матового нікелю в оцтовій кислоті є очевидним.

Висновки

Виявлено значний вплив сульфурів на інтенсифікацію корозії гальванічних нікелевих осадів у концентрованій оцтовій кислоті. Це відбувається як у разі включення сульфурів до складу осаду за електроосадження блискучого нікелю, так і в разі перенесення сульфурів, розподіленого в оцтовій кислоті на матові покриття. Залежно від форми наявності сірки швидкість корозії зростає удвоє – вп'ятеро. Зокрема, посилювальний вплив сульфурів, наявного у блискучому осаді, можна пояснити розкладанням сульфідів нікелю в оцтовій кислоті. Сульфур у ступені окислення (-2) взаємодіє з пасивуючими оксидними покриттями з утворенням адсорбованого моношару, що й призводить до активного стану нікелю.

На основі поляризаційних вимірювань показано підвищену електрохімічну активність сульфідних продуктів корозії блискучих нікелевих покриттів щодо катодної поляризації у слабкислому (рН 3,7) та слаболужному (рН 8,4) ацетатних буферних розчинах, оскільки сульфідів нікелю є перспективними електрокаталізаторами. Наступні дослідження слід спрямувати на глибше вивчення електрохімічних властивостей продуктів корозії блискучих нікелевих покриттів.

References

- [1] D.Y. Ushchapovskiy, S.V. Frolenkova, M.V. Byk, O.V. Linyucheva, T.I. Motronyuk, and V.V. Klus, "Effect of saccharin on corrosion resistance of bright Ni coatings under conditions simulating a wet tropical climate", *Materials Today: Proc.*, vol. 6, pp. 171–177, 2019. doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.091.
- [2] D. Yu. Ushchapovskiy, M.V. Byk, O.V. Linyucheva, S.V. Frolenkova, R.M. Red'ko, and V. V. Yakubenko, "Corrosion Resistance of Bright Nickel Coatings in the Vapor of Acetic Acid", *Mater. Sci.*, vol. 55, pp. 656–663, 2020. doi: 10.1007/s11003-020-00356-7.
- [3] Ph. Marcus, *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice*, 3thed., Boca Raton: "CRC Press", 2012, pp. 395–416. doi: 10.1201/b11020.
- [4] Ph. Marcus, A. Teissier, and J. Oudar, "The influence of sulphur on the dissolution and the passivation of a nickel-iron alloy. I. Electrochemical and radiotracer measurements", *Corrosion Science*, vol. 24, pp. 259–268, 1984.
- [5] B. Yan, D. Krishnamurthy, Ch. H. Hendon, S. Deshpande, Y. Surendranath, and V. Viswanathan, "Surface Restructuring of Nickel Sulfide Generates Optimally Coordinated Active Sites for Oxygen Reduction Catalysis", *Joule*, vol. 1, no. 3, pp. 600–612, 2017. doi: 10.1016/j.joule.2017.08.020.
- [6] J. M. Falkowski, N. M. Concannon, B. Yan, and Y. Surendranath, "Heazlewoodite, Ni₃S₂: A Potent Catalyst for Oxygen Reduction to Water under Benign Conditions", *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 137, no. 25, pp. 7978–7981, 2015. doi: 10.1021/jacs.5b03426.
- [7] Y.F. Yuan, X.H. Xia, J.B. Wu, J.L. Yang, Y.B. Chen, and S.Y. Guo, "Nickel foam-supported porous Ni(OH)₂/NiOOH composite film as advanced pseudocapacitor material", *Electrochimica Acta*, vol. 56, no. 6, pp. 2627–2632, 2011. doi:10.1016/j.electacta.2010.12.001.
- [8] T. Kurochenko, D. Ushchapovskiy, A. Kushmiruk, O. Linyucheva, and R. Redko, The investigation of corrosion activity of galvanic nickel deposits and their corrosion products, in *International Young Scientists Conference on Materials Science and Surface Engineering MSSE2021: Proceedings "Materials Science and Surface Engineering (MSSE2021)"*, pp. 201–204.
- [9] A. I. Kushmyruk, O. V. Kosohin, O. V. Linyucheva, V. A. Reveko, and Yu. S. Miroshnychenko, "Electrochemical Behavior of Porous Titanium Electrodes in Phosphoric Acid", *Mater. Sci.*, vol. 51, no. 3, pp. 429–435, 2015. doi: 10.1007/s11003-015-9859-z.
- [10] G.E. Badea, and T. Badea, "Electrochemical behavior of nickel in aqueous acetic acid solutions", *Revue Roumaine de Chimie*, vol. 53, no. 4, pp. 291–295, 2008.
- [11] I. Tabakovic, S. Riemer, K. Tabakovic, M. Sun, and M. Kief, "Mechanism of Saccharin Transformation to Metal Sulfides and Effect of Inclusions on Corrosion Susceptibility of Electroplated CoFe Magnetic Films", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 153, no. 8, pp. 586–593, 2006. doi: 10.1149/1.2207821.
- [12] J.J. Carroll, and A.E. Mather, "The solubility of hydrogen sulphide in water from 0 to 90 °C and pressures to 1 MPa", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 53, no. 6, pp. 1163–1170, 1989. doi:10.1016/0016-7037(89)90053-7.

D.Yu. Ushchapovskiy, A.I. Kushmyruk, G.S. Vasiliev, O.V. Linyucheva, R.M. Redko, O.G. Linyuchev, G.Yu. Pidvashetsky, T.A. Kurochenko

CORROSION RESISTANCE OF GALVANIC NICKEL DEPOSITS AND ELECTROCHEMICAL ACTIVITY OF THEIR CORROSION PRODUCTS

Background. Bright galvanic nickel coatings, with high sulphur content, are less corrosion resistant than matte. Bright nickel coatings are particularly susceptible to corrosion damage in conditions that simulate tropical humid climates and are characterized by the presence of acetic acid vapours.

Objective. The purpose of the paper is to investigate: corrosion resistance of galvanic nickel deposits in concentrated acetic acid and its vapours, electrochemical activity of sulphide-containing corrosion products of bright nickel coatings.

Methods. Potentiodynamic and cyclic volt-amprometry have been used to study the electrochemical activity of galvanic nickel deposits and their corrosion products. The corrosion rate of galvanic nickel deposits has been determined by gravimetric method. Investigation of surface morphology and composition of galvanic deposits were performed using scanning electron microscopy and X-ray fluorescence analysis.

Results. The increased electrochemical activity of sulphide corrosion products of bright nickel coatings is evidenced by an order of magnitude higher cathodic current densities of CVA curves obtained in acetate buffer solutions, in comparison with bright and matte nickel galvanic deposits. It has been shown that at the deposition of sulphide corrosion products of bright nickel coatings on matte nickel foil the corrosion rate of last one increase at the exposition in concentrated acetic acid and its vapours.

Conclusions. Significant intensifying effect of sulphur on the corrosion of galvanic nickel deposits in concentrated acetic acid and its vapours has been established. In particular, this can be explained by the decomposition of nickel sulphide (which incorporates in the coating) in acetic acid. Sulphur in the oxidation state (-2) interacts with passive oxide coatings to form an adsorbed monolayer, which leads to the transition of nickel to the active state. Further research will focus on a deeper study of the electrochemical properties of corrosion products of bright nickel coatings.

Key words: nickel coatings, corrosion products, nickel sulphides, corrosion activity, catalyst.

Рекомендована Радою
Хіміко-технологічного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
20 грудня 2021 року

Прийнята до публікації
27 червня 2022 року

АВТОРИ НОМЕРА

Алексеїк Ольга Сергіївна
ORCID: 0000-0002-9112-9621

Алексеїк Євгеній Сергійович
ORCID: 0000-0003-4889-8879

Бомба Андрій Ярославович
ORCID: 0000-0001-5528-4192

Бурчак Павло
ORCID: 0000-0002-5939-4484

Васильєв Георгій Степанович
ORCID: 0000-0003-4056-5551

Жук Іван Сергійович
ORCID: 0000-0001-8440-427X

Коваль Вікторія Михайлівна
ORCID: 0000-0002-3898-9163

Кондратюк Вадим Анатолійович
ORCID: 0000-0001-5035-311X

Копилов В'ячеслав Іванович
ORCID: 0000-0002-1789-3226

Кузін Микола Олегович
ORCID: 0000-0002-6032-4598

Кузін Олег Анатолійович
ORCID: 0000-0003-3669-0237

Куроченко Тарас Олексійович
ORCID: 0000-0002-9569-9998

Кушмирук Андрій Іванович
ORCID: 0000-0002-8167-6277

Лінючев Олександр Геннадійович
ORCID: 0000-0003-1683-5937

Лінючева Ольга Володимирівна
ORCID: 0000-0003-4181-5946

Мороз Ігор Петрович
ORCID: 0000-0001-6381-2266

Найдьонов Арсеній Олександрович
ORCID: 0000-0003-2410-1693

Олещенко Любов Михайлівна
ORCID: 0000-0001-9908-7422

Павлов Леонід Миколайович
ORCID: 0000-0001-8273-9607

Подольян Олександр Олександрович
ORCID: 0000-0003-0522-1403

Підвашецький Гліб Юрійович
ORCID: 0000-0002-9367-6688

Редько Раїса Макарівна
ORCID: 0000-0003-3462-4447

Сергієнко Катерина Сергіївна
ORCID: 0000-0002-7397-1137

Сокурєнко Вячеслав Михайлович
ORCID: 0000-0001-5057-182X

Сокурєнко Олег Михайлович
ORCID: 0000-0002-0335-6470

Тимчик Григорій Семенович
ORCID: 0000-0003-1079-998X

Ущановський Дмитро Юрійович
ORCID: 0000-0002-2809-2774

Чертов Олег Романович
ORCID: 0000-0003-0087-1028

Яганов Петро Олексійович
ORCID: 0000-0001-7358-9846