

ISSN 1813-5420

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№4–2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# ЕНЕРГЕТИКА

*економіка, технології, екологія*

Науковий журнал

№ 4 (66) - 2021

Виходить 4 рази на рік  
Заснований у березні 2000 року

Smart grid системи та технології  
Моніторинг, діагностика та керування енергетичними процесами та  
обладнанням  
Енергетичні системи та комплекси  
Технології та обладнання в енергетиці  
Екологічні проблеми

---

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2021

Головний редактор – Ю.І. Якименко

Заступники

головного редактора – С.П. Денисюк, О.С. Яндульський, Є.М. Письменний

Відповідальний секретар – О.О. Закладний

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ: А.О. Авраменко, Б.І. Басок, О.Ф. Буткевич, О.О. Вовк,  
(Україна) А.В. Волошко, Г.О. Воропаєв, В.І. Дешко, В.Я. Жуйков,  
С.О. Кудря, А.В. Носовський, М.Я. Островерхов,  
С.М. Пересада, В.А. Попов, К.К. Ткачук, В.О. Туз,  
О.Ю. Черноусенко, С.П. Шевчук, В.Ф. Шинкаренко

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ

РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ: Е. Хандшин (*Дортмундський технічний університет, інститут енергетичних систем та економіки енергетики, Німеччина*), Ричард Стржелецкі (*Інститут електротехніки, Варшава, Польща*), П.Я. Екель (*Папський католицький університет Мінас Жерайс, Бразилія*), А.В. Кузнецов (*Університет штату Північна Кароліна, США*), В.І. Олещук (*Інститут енергетики АН Молдови*), О.В. Кузнецов (*Університет прикладних наук, Німеччина*), Карлос Ф. Пфайфер (*Університетський коледж Південно-Східної Норвегії*), А. Башкіс (*Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва*), Опітс Йоахім (*Інститут енергетики м. Хамм, Німеччина*), В.М. Постолатій (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*), Рощан Шарма (*Університет Південно-Східної Норвегії*).

Технічний секретар Н.О. Кравчук.

Веб-сайт журналу <http://energy.kpi.ua>

Журнал зареєстровано Реєстраційний номер Свідоцтва про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ №22857-12775ПР від 14.06.2017 р.

Журнал внесено до Переліку фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук відповідно до наказу МОН України № 1188 від 24 вересня 2020 р. (категорія «Б»). Журнал включено до баз даних «Наукова періодика України» НБУВ, Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, Джерело, URAN, Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, електронного архіву наукових матеріалів ELAKPI. Підписано до друку за рекомендацією Вченої ради Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (протокол № 10 від 13 грудня 2021 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка М.О. Коломійчук

Відповідальний за випуск видання Н.О. Кравчук.

ISSN 1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).

Адреса редакції 03056, Україна, м.Київ, вул.Борщагівська, 115, к.315,  
тел. (38-044) 406-85-14, e-mail: [kravkpi@ukr.net](mailto:kravkpi@ukr.net)

Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського Видавництво «Політехніка»,  
м.Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15.

**Увага!** Передрукування матеріалів іншими виданнями можливе лише з дозволу редакційної колегії журналу **ЕНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія**

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE  
“IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE”

# POWER ENGINEERING

*economics, technique, ecology*

*ENERHETYKA:*

*ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya*

**The Scientific Journal**

**№ 4 (66) – 2021**

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Smart grid systems and technologies  
Monitoring, diagnosis and management of energy processes and equipment  
Energy systems and complexes  
Technologies and equipment in energy  
Ecological problems

---

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2021

*Editor-in-chief* Yu.I. Yakymenko

*Deputy editors-in-chief* S.P. Denysiuk, O.S. Yandulskyi, E.M. Pysmennyi

*Deputy* O.O. Zakladnyi

EDITORIAL BOARD: (Ukraine) A.O. Avramenko, B.I. Basok, O.F. Butkevych, O.O. Vovk, A.V. Voloshko, G. Voropaiev, V.I. Deshko, V.Ya. Zhuykov, S.O. Kudrya, A.V. Nosovsky, M.Ya. Ostroverkhov, S.M. Peresada, V.A. Popov, K.K. Tkachuk, V.O. Tuz, O. Yu. Chernousenko, S.P. Shevchuk, V.F. Shinkarenko

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD: E. Handschin (*Institute of Power Systems and Power Economics of Dortmund Technical University, Germany*), Richard Strzelecki (*Electro technical Institute, Warsaw, Poland*), P.Y. Ekel (*Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil*), A.V. Kuznetsov (*North Caroline State University, USA*), V. Oleschuk (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), O. Kuznetsov (*University of Applied sciences, Germany*), Carlos F. Pfeiffer (*University College of Southeast Norway*), A. Baskys (*Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania*), Opitz H. Joachim (*EIH Energy Institute Hamm, Germany*), V. Postolati (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), Roshan Sharma (*University of South-Eastern Norway*).

Technical secretary N.O. Kravchuk

Website of the journal <http://energy.kpi.ua>

Journal was registered Certificate of State Registration Printed Media series KB №22857-12775IIP dated 14 June 2017

The Journal was registered approved by order of MES of Ukraine № 1188 of September 24, 2020 as an occupational edition. The Journal is included in databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar, Index Copernicus WorldCat, BASE, OpenAIRE, Djerelo, URAN, Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, electronic archive of research materials ELAKPI. Passed for printing under recommendation of Academic Council of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (protocol № 10 on December 13, 2021).

Proofreading V.G. Smoliar. Desktop publishing M.Kolomiichuk  
Responsible for the publication N.O. Kravchuk

ISSN 1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).

Address of editorial office 03056, Ukraine, Kyiv, 115 Borschagivska str., office 315  
tel. (38-044) 406-85-14, e-mail: [kravkpi@ukr.net](mailto:kravkpi@ukr.net)

The publisher Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Publ.hous  
"Politehnika",  
Kyiv, 14 Polytechnique str., b. 15.

**Attention!** Reprint material in other publications only with the permission of editorial board of the journal **POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology.**

© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2021

## ЗМІСТ

### SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

**С.П. Денисюк, Г.В. Мельничук, І.С. Чернечук, В.В. Лисий.** Техніко-економічні механізми розвитку локальних систем енергозабезпечення (Microgrid) .....7

### МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

**В.О. Коровушкін, В.Г. Дубовик, А.В. Босак.** Оцінювання параметрів системи одноосьової орієнтації фотоелектричного модуля.....23

**А.В. Топоров, Л.В. Топорова.** Дослідження динамічних характеристик системи «Пристрій плавного пуску – асинхронний двигун» в режимі роботи зі зниженою швидкістю.....30

**В.В.Чумак, М.А. Коваленко, Є.О. Троценко, Є.С. Ігнатюк, А.С. Стулішенко.** Дослідження фізичних процесів в шихтованих магнітопроводах електричних машин .....37

### ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

**В.В. Філонов, Є.М. Письменний, В.Г. Разумовський.** Адаптація температурної пристінкової функції для розрахунку теплообміну при надкритичних параметрах теплоносія.....44

**В.П. Калінчик, В.А. Побігайло, В.В. Калінчик, О.В. Мейта, В.Г. Скосирев.** Комбінований метод управління електроспоживанням виробничих об'єктів.....54

### ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

**Є.В. Новаківський, А.В. Неділько.** Застосування конденсаційних економайзерів на газових електричних та водогрійних котлах.....62

**В.О. Туз, Н.Л. Лебедь, М.П. Литвиненко.** Теплообмін у витих теплообмінниках при зміні геометричних характеристик.....71

**І.І. Пуховий, А.Л. Петречук.** Опріснення води з використанням заморожування льоду в бурульках.....79

### ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ

**О.М. Терентьєв, А.Й. Клещов, А.І. Варфоломєєв, М.І. Сергієнко.** Очищення рідини електромагнітним фокусуванням домішок .....86

**А.Є. Черель, О.В. Кофанова, А.В. Підгорний.** Погіршення стану здоров'я дітей шкільного та дошкільного віку через зміну техногенного навантаження на території шкіл і дитячих садків.....95

**ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ** .....102

## CONTENTS

### SMART GRID SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

**S. Denysiuk, H. Melnychuk, I. Cherneshchuk, V. Lysi.** Technical and economic development mechanisms of local energy supply systems (Microgrid).....7

### MONITORING, DIAGNOSIS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

**V. Korovushkin, V. Dubovyk, A. Bosak.** Estimated parameters in the systems of a single-axis orientacis of a photoelectric module.....23

**A. Toporov, L. Toporova.** Dynamic characteristics investigation of the system "Softstarter-induction motor" in the mode of operation with redused speed.....30

**V. Chumak, M. Kovalenko, Y. Trotsenko, Y. Ihnatiuk, A.S. Stulishenko.** Research of physical processes in laminated magnetic cores of electric machines.....37

### ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

**V. Filonov, E. Pis`mennyi, V. Razumovskiy.** Adaptation of the temperature wall function for the calculation the heat transfer at supercritical coolant parameters.....44

**V. Kalinchyk, V. Pobigaylo, V. Kalinchyk, O. Meita, V. Skosyrev.** Combined method of electric energy consumption management of production facilities.....54

### TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

**E. Novakivskiy, A.Nedilko.** Application of condensation economizers on gas energy and water heating boilers.....62

**V. Tuz, N. Lebed, M. Lytvynenko.** Heat transfer in coil heat exchangers with varying geometric characteristics.....71

**I. Puhoviy, A. Petrechuk.** Water desalination using ice freezing in icicles.....79

### ECOLOGICAL PROBLEMS

**O. Terentyev, A. Kleshchov, A. Varfolomeev, M. Sergienko.** Purification of liquid by electromagnetic focusing of impurities.....86

**A. Chepel, O. Kofanova, A.B. Pidgorny.** Deterioration of the health of school and preschool children by changing the technogenic load on the territory of schools and kindergartens .....95

**REQUIREMENTS FOR THE DESIGN OF ARTICLES**.....102

# SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

УДК 621.316

DOI 10.20535/1813-5420.4.2021.257242

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6299-3680

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Г.В. Мельничук, к.т.н., ORCID 0000-0002-8173-0472

Міністерство розвитку громад та територій України

І.С. Чернечук, аспірант, ORCID 0000-0001-6895-7843

В.В. Лисий, аспірант, ORCID 0000-0003-3714-7623

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ МЕХАНІЗМИ РОЗВИТКУ ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ (MICROGRID)

Як напрямок розвитку концепції 3D (*Decarbonization, Decentralization, Digitalization*) та концептуальної моделі Інтернету енергії розглянуто бізнес-модель енергія як послуга (*Energy-as-a-service, EaaS*). При цьому EaaS формується у вигляді «пакетної» моделі обслуговування, в рамках якої клієнту надається апаратне і програмне забезпечення та енергетичні послуги. Рішення категорії EaaS повинні включати в себе послуги з керування споживанням і підвищення енергоефективності, сприяти впровадженню відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та інших децентралізованих джерел енергопостачання, а також оптимізувати баланс між попитом і пропозицією на ринку електроенергії. Показано, що EaaS постає широким терміном для бізнес-моделей, які керуються послугами, з інноваційним потенціалом для трансформації енергетичної галузі

Для оцінки особливостей застосування EaaS до Microgrid детально розглянуто особливості побудови та функціонування Microgrid як локальної енергосистема або система електропостачання, що є технологічним комплексом у складі об'єктів генерації (джерел енергії), джерел енергетичної гнучкості та споживачів електроенергії, які зібрані під єдиним керуванням з метою забезпечення якомога більш ефективного та зручного для споживача енергопостачання. Визначено, що технологічного запорукою ефективності сучасних Microgrid виступають можливість комплексування та оптимального поєднання різних джерел енергії та гнучкості, а також наявність єдиного контуру керування, який дозволяє якнайкраще використовувати ці джерела.

Представлено Smart Grid as a Service (SGaaS) на основі Сервісно-орієнтованої архітектури. Для ієрархічної архітектури SGaaS наведено перспективну трирівневу архітектуру, яка включає рівень інтелектуальної мережі щодо здійснення глобальної оптимізації, наприклад мінімізацію глобального захисту або глобальних витрат, рівень координації контролю для підтримки надійності та безпеки в Smart Grid та рівня Microgrid для моніторингу стану пристроїв кінцевого користувача.

Реалізація механізмів EaaS та SGaaS стимулювало розвиток Microgrid as a Service (Maas) – як послуги, яка пропонує розгортання Microgrid, зменшуючи початкову вартість інвестицій і складність. Визначено, що Maas – це новий провідний механізм фінансування, який дозволяє організаціям розгорнути Microgrid без будь-яких попередніх інвестицій, як рішення, яке не вимагає авансового капіталу для споживача енергії та яке зосереджене на результатах, таких як «енергія на місці». Механізми Maas пропонують клієнтам більше контролю над їхніми енергетичними потребами, що дозволяє їм підвищити стійкість і надійність енергозабезпечення, збалансувати використання енергії, досягти цілей «чистої» енергії та досліджувати інші інноваційні продукти та послуги.

**Ключові слова:** Microgrid, ефективність функціонування, бізнес-модель енергія як послуга, Smart Grid як послуга, сервісно-орієнтована архітектура, Microgrid як послуга.

### Вступ

Масштабний перехід до екологічно чистої «безвуглецевої» енергетики призводить до зниження її системної ефективності, генератори зі стохастичним виробленням, що використовують енергію сонця та вітру, вимагають створення резервних генеруючих та/або накопичувальних потужностей. Як базове вирішення проблеми зростаючої неефективності енергетики бачиться перехід до децентралізованої організації потужностей, керування та енергетичних ринків, що забезпечує ефективне поєднання великої



та малої розосередженої енергетики, найкраще задоволення диференційованих та динамічно змінних вимог споживачів.

Найбільш цілісне уявлення про трансформацію енергетики дається в концепції 3D (Decarbonization, Decentralization, Digitalization) [1–3]. Decarbonization («декарбонізація») – перехід до екологічно чистої «безвуглецевої» економіки та енергетики, що виявляється у зростанні частки ВДЕ в енергетичному балансі, збільшенні частки електричного транспорту та відмови від викопних палив. Decentralization («децентралізація») – перехід до територіально розосередженої електроенергетики з великою кількістю різнорівневих генераторів і споживачів, що виражається в зростанні частки, приєднаної до розподільних мереж, щодо малопотужної та різноманітної за своїм характером генерації; появі активних споживачів (prosumer) – нового типу суб'єктів електроенергетики, які є одночасно і виробниками та споживачами електроенергії, мають можливість гнучко змінювати профіль свого споживання з мережі. Digitalization («дигіталізація») – перехід до повсюдного застосування в електроенергетиці цифрових керованих пристроїв, підключених до інформаційних мереж Інтернету, на всіх рівнях енергосистеми від пристроїв генераторів та електричних мереж до кінцевих пристроїв, у тому числі побутових, споживачів електроенергії, що забезпечує можливість реалізації інтелекту керування енергосистемами, заснованого на міжмашинній взаємодії (Machine to Machine, M2M) та інтернет речей (Internet of Things, IoT).

У цій концепції «3D», складова Decarbonization вказує на причину системних трансформацій в енергетиці; Decentralization – на принцип зміни архітектури енергетичних систем; Digitalization є ключовим інструментом для ефективної трансформації. Енергосистема, побудована за новою архітектурою, має стати [4, 5]:

– трансакційною: економічна взаємодія між користувачами відбуватиметься на основі р2р-трансакцій, які дозволяють реалізувати різноманіття ролей користувачів та сервісів, що надають їм відповідні систематизовані цінності (адаптація та налаштування під окремі вимоги) [2];

– інтелектуальною: керування системою за рахунок міжмашинної взаємодії між її елементами, при якому кожен елемент може самостійно приймати рішення про реалізацію того чи іншого режиму своєї роботи та вплив на систему, забезпечить легкість інтеграції (plug&play) енергетичних пристроїв користувачів у контури керування різних сервісів;

– стійкою та гнучкою: буде забезпечена легкість технічного з'єднання пристроїв з мережею за умови гарантованої підтримки статичної та динамічної стійкості системи.

Користувач такої системи через інтерфейси інтегрується до неї та стає повноцінним учасником нових сервісів та бізнес-моделей.

Концептуальна модель Інтернету енергії (Internet of Energy, IoE) спирається на уявлення про «енергетичну хмару», введену аналітиками компанії Navigant Research [6]. Власне IoE є екосистемою технічно та економічно взаємопов'язаних користувачів. Користувачами IoE можуть бути власники будь-якого електроенергетичного обладнання (промислового, комерційного, побутового), яке може генерувати, накопичувати та споживати електроенергію, а також суб'єкти, які надають власникам електроенергетичного обладнання різноманітні послуги. Групи обладнання, що мають спільну точку приєднання до електричних мереж та інформаційних каналів, які забезпечують зв'язок з IoE, утворюють його структурну одиницю – енергетичну комірку, яка незалежно від складу та складності своєї внутрішньої структури взаємодіє з іншими енергетичними комірками, як єдине ціле. Користувачі IoE за допомогою своїх енергетичних комірок можуть відігравати різні динамічно змінні ролі в електроенергетичній системі, надаючи один одному послуги, зокрема, з постачання електричної енергії, участі у режимному керуванні, у тому числі й участі у підтримці частоти та рівня напруги, надання енергетичного обладнання у «віртуальну» оренду, забезпечення резерву потужності тощо.

У найближчому майбутньому концепція IoE сформує ринок таким чином, що електроенергетична інфраструктура стане більш розподіленою та доступною, як стільниковий зв'язок та інтернет [7]. Очікується, що розосереджена генерація, у тому числі на базі ВДЕ, найближчим часом стане домінуючим напрямком у світових інвестиціях в енергетичному комплексі.

#### **Енергія як послуга (Energy-as-a-service, EaaS)**

EaaS – це «пакетна» модель обслуговування, в рамках якої клієнту надається апаратне і програмне забезпечення та енергетичні послуги. Рішення категорії EaaS повинні включати в себе послуги з керування споживанням і підвищення енергоефективності, сприяти впровадженню відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та інших децентралізованих джерел енергопостачання, а також оптимізувати баланс між попитом і пропозицією на ринку електроенергії. Головна перевага для споживача полягає в спрощенні пакета послуг, незважаючи на їх зростаюче різноманіття.

Еволюція електроенергетичної системи у бік моделі EaaS [8]:

1. *Базовий рівень* (цифровізація основних процесів) – оптимізація наявних продуктів для існуючих клієнтів.

2. *Розширений рівень* (розширення асортименту продуктів та послуг) – договори на постачання

електроенергії; договори на підвищення енергоефективності; розподілене постачання та доставка енергії; керування та оптимізація енергоспоживання

3. *Наступний рівень* (енергія як послуга) – інтегрований енергоменеджер; координатор енергомережі.

Послуги, які можуть бути запропоновані в рамках концепції EaaS наведено в табл. 1.

На сьогодні EaaS постає широким терміном для бізнес-моделей, які керуються послугами, з інноваційним потенціалом для трансформації енергетичної галузі [8–10]. Але перш ніж досліджувати, що зараз означає EaaS для сектора, давайте коротко подивимося, з чого він почався. У традиційній моделі енергопостачання енергія, як правило, продається як одиниці кВт·год, товар, а не послуга, і, безумовно, потреби кінцевого споживача міцно розміщені в нижній частині ієрархії. Безсумнівно, що одна з найперших ітерацій EaaS виникла через потребу комерційної галузі спростити свої потреби в енергії, зосередившись на тому, щоб бути більш раціональним і економічно ефективним з варіантами стійкості. Ці організації хотіли мати можливість краще керувати накладними витратами на електроенергію на тлі різного попиту в час доби, нових цілей стійкості та коливань витрат.

*Таблиця 1 – Послуги, які можуть бути запропоновані в рамках концепції EaaS*

Заявка	Послуга	Технології	Приклади
Постачання енергії	Додаткові послуги	Платформа	Портал для керування розосередженими енергоресурсами, транзактивна енергія
	Накопичення та зберігання енергії	Акумулятори Електроенергія для всього (P2X)	Мікромережа, побутові та комерційні енергосховища
Передача енергії	Розосереджена генерація	ВДЕ	Сонячні електростанції, вітряні електростанції, паливні елементи, тепло-електроцентралі і т.д.
	Балансування навантаження на енергомережу	Інтерфейсний алгоритм	Послуги з моніторингу та керування навантаженням
Оптимізація енергоспоживання (попиту на електроенергію)	Енергозбереження	Інтелектуальний облік	Керування попитом, керування енергоспоживанням в будівлях, використання інтелектуальних засобів обліку, підвищення енергоефективності
	Оптимізація зовнішнього енергопостачання	Програмні додатки	P2P-торговля, ціноутворення в режимі реального часу

На ранньому етапі концепція EaaS була направлена на обмеження витрат, значній еволюції традиційних контрактів на постачання з фіксованою ціною [9, 10]. Проте протягом останніх трьох років, оскільки технології розвивалися і цінність даних вийшла на перший план, спостерігається розвиток EaaS через появу нових моделей підписки, орієнтованих на попит, які монетизують гнучкість. Для комерційних організацій вони забезпечують цінність, інтегруючи постачання енергії на основі попиту за передбачуваною фіксованою вартістю з аутсорсингом операцій, таких як контракти на технічне обслуговування та мінімальні початкові капітальні витрати. Підприємства можна стимулювати, щоб вони адаптували своє споживання енергії відповідно до пікового попиту, дозволяючи постачальникам оптимізувати використання та передавати свої власні заощадження своїм клієнтам. Модель, орієнтована на користувача, є привабливою як для клієнта, так і для постачальника, створюючи економічну синергію з обох сторін.

Бізнес-моделі «як послуга» на Заході сьогодні є звичним явищем. Вони являють собою зсув до технологічних моделей на основі підписки, перетворюючи традиційні галузі, що базуються на продуктах, у пропозиції, орієнтовані на послуги, де споживач знаходиться в самому центрі комерційної стратегії. Хоча необхідно зазначити, що передплатні послуги самі по собі не є новими [8–10]. З прискоренням хмарних обчислень і глобальним доступом до Інтернету моделі «як послуга» почали швидко розвиватися.

Починаючи спочатку з Software-as-a-Service (SaaS) – Salesforce стверджує, що це була перша в 1999 році – нові моделі регулярно з'являються майже в кожній галузі (від широкого банківського обслуговування як послуги до системи Data as a Service і навіть 3D-друк як послуга. І коли вони з'являються, вони швидко виходять за рамки простої моделі підписки, стаючи складними інноваційними платформами, які пропонують широкий спектр послуг; хоча їх основи залишаються незмінними: орієнтація на клієнта, керування технологіями та даними.

У 2019 році компанія Deloitte визначила EaaS як «наскрізне керування енергетичними активами та послугами клієнта», уявляючи його як зв'язок між технологіями (IoT, Blockchain тощо) та енергією, включаючи електронну мобільність та зрілість ВДЕ [8]. EaaS сьогодні, безумовно, виходить далеко за межі ранніх моделей, які пропонували лише економічну ефективність та керування портфелем. Наприклад, при переході в інші сектори, зокрема, комунальних послуг чи електронної мобільності кінцевому користувачеві надається набір індивідуальних інтелектуальних енергетичних послуг, щоб додати цінність і створити більш гнучку та чутливу енергетичну систему, орієнтовану на споживача. Подібно до інших моделей «як послуга», EaaS спирається на дані та розширену аналітику [8].

В основі будь-якої послуги EaaS лежать оперативні потреби клієнта, будь то житлові чи комерційні. Завдяки даним цифровізації ці компанії-піонери, які пропонують додатки EaaS, зможуть задовольнити зазначені потреби, краще розуміючи попит своїх клієнтів і використовуючи ці знання для оптимізації системи. EaaS переходить від базової моделі, коли енергетична галузь задовольняє потреби клієнтів, надаючи комплексні послуги, але яка все ще вимагає встановлення більшої кількості технологій, більшого підключення до мережі або навіть стимулювання самих споживачів змінити свою власну поведінку. Майбутнє EaaS – це фундаментальний перехід до детального розуміння того, як клієнт взаємодіє із загальною системою та світом, де алгоритми використовуються для інтеграції та маніпулювання моделями попиту, щоб уникнути піку в першу чергу без будь-якого впливу на клієнта.

Наведемо окремі приклади застосування EaaS [8].

**Житловий комфорт як послуга.** У житловому секторі, наприклад, ми бачимо чіткі паралелі з EaaS, коли мова йде про можливості, керовані даними, і підхід до підключеної платформи, який EaaS зараз пропонує новітні утиліти. Потік даних про використання з Smart лічильників дозволяє комунальним підприємствам не тільки покращувати свої власні операційні процеси, але й надавати своїм клієнтам інноваційні персоналізовані послуги, що ґрунтуються на попиті, такі як нові тарифи або цифрові рахунки, для своїх клієнтів на одній платформі. Відходячи від стягнення плати з користувачів лише за те, скільки енергії вони споживають, комунальні підприємства натомість зосереджуються на тому, як клієнти використовують цю енергію, і надають індивідуальні рішення для обслуговування.

У 2019 році британські енергетичні компанії Baxi Heating і Bristol Energy випробували Heat-as-a-Service, продавши так званий Heat Plan, в якому споживачі купували години тепла, а не кВт·год. За фінансової підтримки Департаменту бізнесу, енергетики та промислової стратегії Великої Британії, випробування запропонували домогосподарствам фіксовану ціну на основі даних про теплову ефективність їхнього будинку та основного попиту – кількість годин тепла, необхідних клієнту щотижня, у кімнатах, які вони хотіли, у потрібний час.

Основні переваги EaaS та потенціал майбутнього застосування в житлових приміщеннях передовими комунальними підприємствами: він пропонує індивідуальну та надзвичайно просту послугу, повністю засновану на потребах клієнта без будь-якої вимоги до активної участі клієнта – постійна зміна термостата, перехід на більш дешевого постачальника енергії тощо. Для комунального підприємства, що надає послугу, це дає можливість оптимізувати свою систему, забезпечуючи рівень комфорту, необхідний їхнім клієнтам, але використовуючи якомога менше енергії та вуглецю.

**Енергія як послуга та зарядка електромобілів.** EaaS має величезний потенціал, коли справа доходить до інтелектуальної зарядки електромобілів (EV) та її інтеграції в системи керування енергією будинку (HEMS). Інтеграція даних електромобілів із тарифами за час використання та даними Smart лічильників створює можливість розумної зарядки, від якої виграють як компанія та оператор електромережі, так і власник транспортного засобу. Контролюючи час і швидкість заряджання електромобіля на основі місцевого попиту та цін на ринку електроенергії (при цьому дотримуючись мінімальних рівнів заряду, встановлених власником), компанія, що займається інтелектуальною зарядкою, може відкрити нові потоки доходу, такі як надання послуг з балансування оператору мережі, а також оптових арбітражних можливостей на основі масової закупівлі електроенергії. Оператор мережі може збалансувати локальну мережу з більшою гнучкістю, у той час як власник транспортного засобу отримує недорого зарядку без будь-яких витрат.

**Роль енергетики як послуги в децентралізації.** EaaS безсумнівно надає успішні технологічні рішення для збалансування попиту та споживання і забезпечення більшого проникнення ВДЕ як у житловому, так і в комерційному секторах, де вже склалися сприятливі умови для інвестицій. Ці локальні енергетичні системи EaaS, надані з нульовими капітальними витратами, забезпечують більшу

ефективність із інтелектуальним керуванням, особливо в районах, де існуючі застарілі електромережі мають проблеми. Насправді, EaaS має відігравати важливу роль у знятті тиску з централізованих активів. Узгодження балансу електромережі на місцевому рівні за допомогою технологічних рішень для реагування на попит пропонує набагато більшу гнучкість для вирівнювання кривої навантаження та інтеграції нестабільних джерел.

#### **Розвиток Microgrid**

Створення Microgrid у всьому світі стає все більш ефективним і затребуваним рішенням з енергопостачання споживачів та все більш вагомою альтернативою традиційному підходу до розвитку енергосистем, що базується на будівництві великої централізованої генерації та електричних мереж [11–14]. Будівництво Microgrid передбачає розміщення джерел енергії та енергетичної гнучкості якомога ближче до кінцевого споживача, а також використання ресурсів гнучкості на стороні самих споживачів для досягнення оптимального вартості, автономності, екологічності або інших цільових параметрів енергопостачання. Microgrid може розглядатися як локальна енергосистема або система електропостачання, що є технологічним комплексом у складі об'єктів генерації (джерел енергії), джерел енергетичної гнучкості та споживачів електроенергії, які зібрані під єдиним управлінням з метою забезпечення якомога більш ефективного та зручного для споживача енергопостачання [11].

У загальному випадку до складу Microgrid можуть входити такі типи електроустановок [12, 14]: маневрена генерація, що диспетчеризується; генерація, що не диспетчеризується, на базі ВДЕ; системи накопичення електроенергії (СНЕ); керовані навантаження споживачів; елементи зарядної інфраструктури електричного транспорту; елементи електрифікованих систем теплопостачання, включаючи накопичувачі теплової енергії; обладнання локальних електричних мереж Microgrid.

Реалізація концепції ІоЕ передбачає створення локальної енергетичної інфраструктури (Microgrid), в яку інтегруються виробники та споживачі енергії та в рамках якої вони можуть вільно обмінюватись енергією [15]. Концепція побудована на абсолютно іншій архітектурі, яка, на відміну від традиційної, є децентралізованою електроенергетичною системою. Тут реалізовано інтелектуальне керування потоками електроенергії, яке здійснюється за рахунок однорангових енергетичних трансакцій між її користувачами. Енергетична трансакція – акт взаємодії двох і більше суб'єктів Microgrid, що складається з трьох шарів енергоінформаційного обміну: фінансово-договірної, інформаційно-керуючої та фізичного (електричного).

Для функціонування такої Microgrid необхідні програмно-апаратні комплекси з розподіленою архітектурою та системами керування, побудовані із застосуванням різних методів штучного інтелекту, які забезпечать: синтез договірних умов (смарт контракти); видачу керуючих впливів на силове обладнання, що відповідають договірним умовам та забезпечують виконання технологічних обмежень; реалізацію енергообміну в темпі реального процесу.

Ієрархічна схема керування Microgrid складається з трьох рівнів керування [11, 12]:

- перший рівень керування: забезпечення стабільності напруги, збереження стабільності частоти, розподіл потужності, пристрої захисту (період дії сигналів керування – секунди та мікросекунди);
- другий рівень керування: компенсація відхилення частоти, спричиненого первинним управлінням, синхронізація мережі, компенсація відхилення напруги, спричиненого первинним управлінням, місцевий рівень керування (період дії сигналів керування – години та секунди);
- третій рівень керування: оптимальна робота в обох режимах роботи, глобальний рівень керування (одночасно з централізованою мережею), контроль потоку потужності у вузлі мережі (період дії сигналів керування – дні та години).

Ключові досягнення технології Microgrid включають в себе «включи і працюй» системи «Microgrid в коробці», масштабовані модульні системи та програмне забезпечення для віддаленого моніторингу та керування на основі хмари [14]. Ці інновації представляють рішення "чистої енергії" під ключ, яке є технологічно здійсненним, стійким, еластичним, надійним, тиражованим (на масовій основі) та економічно ефективним. Для впровадження на ринку гнучких та масштабованих рішень Microgrid необхідна значна кількість попередніх розробок та структурування.

Особливо привабливим рішенням є створення Microgrid для енергопостачання комерційних та промислових споживачів [11, 14]. Комерційні та промислові (індустріальні) Microgrid (Commercial and Industrial Microgrid, C&I Microgrid), доповнюючи електропостачання від централізованої електромережі, дозволяють забезпечити своїм споживачам зниження витрат на електроенергію та виконання вимог щодо «безвуглецевості» («net-zero») споживаної енергії, до якості електропостачання та якості показників електроенергії. Вони в окремих випадках можуть бути більш жорсткішими у порівнянні з тими, які може забезпечити централізоване енергопостачання.

Ринок Microgrid для комерційних та промислових споживачів до 2028 року становитиме 6,3 млрд. дол. на рік, або 3,2 ГВт, а загальний обсяг ринку приєднаних до мережі Microgrid, побудованих на користь юридичних осіб, – 21,7 млрд. дол. на рік, або 11 ГВт [16].

В Україні саме сектор комерційних та промислових споживачів може стати локомотивом ринку Microgrid, оскільки, з одного боку, проблема зростання витрат на електропостачання найбільш гостро стоїть саме перед такими споживачами, і вони мають безпосередню зацікавленість у використанні можливостей розосередженої генерації. Саме ці споживачі здатні сформувати платоспроможний попит та інвестувати свої ресурси у створення Microgrid та розвиток необхідних технологій.

Економічний ефект, який Microgrid приносять споживачам, що входять до них, формується такими факторами [12, 14, 17, 18]: зниження витрат на купівлю електроенергії та потужності на роздрібному ринку; зниження витрат на оплату послуги електричних мереж з транспорту електроенергії; зниження витрат на оплату технологічного приєднання чи збільшення приєднаної потужності; підвищення надійності електропостачання та зниження втрат від знеструмлення; підвищення якості електроенергії та зниження втрат від впливу просядок та стрибків напруги на чутливе обладнання.

У зростанні економічної ефективності Microgrid ключову роль відіграв технічний прогрес у сфері малої генерації, силової електроніки та накопичувачів електроенергії. Він призвів до того, що останнім часом вартість електроенергії, отриманої за рахунок власної генерації, виявляється у багатьох випадках нижчою, ніж ціна електроенергії, купленої на роздрібному ринку та отриманої електричними мережами.

Вартість капітального будівництва Microgrid у цілому, що включає вартість як електроустановок, так і систем управління та всього інжинірингу, в даний час становить 1000–3000 дол. за кВт встановленої потужності залежно від географії проекту, складу обладнання, необхідного ступеня «вуглецевої нейтральності», інтегратора та набору вендорів (будь-яка юридична організація, підприємство, установа або фізична особа, що поставляють товари або послуги замовникам) [19, 20].

Розвиток локальних енергосистем Microgrid отримує все більшу підтримку на державному рівні. Так, у 2014 році у США на замовлення Міністерства енергетики було розроблено документ «The Advanced Microgrid. Integration and Interoperability», яким було визначено найвищий пріоритет розвитку досліджень у сфері Microgrid. Міністерство встановило, що комерційні проекти у цій галузі мають забезпечувати зниження шкідливих викидів не менше ніж на 20% та збільшувати енергоефективність не менше ніж на 20% [21]. Водночас цим документом було визначено дорожню карту подальших досліджень та установи і організації, що мають бути залучені до процесу впровадження вдосконалених Microgrid. Зокрема, дорожньою картою передбачається вже у 2025-х роках перейти до застосування динамічних Microgrid, а процес розвитку досліджень у галузі вдосконалених Microgrid має поєднувати питання впровадження Smart Grid, стандартів та протоколів, зниження витрат, безпеки та інших завдань (див. рис. 1).

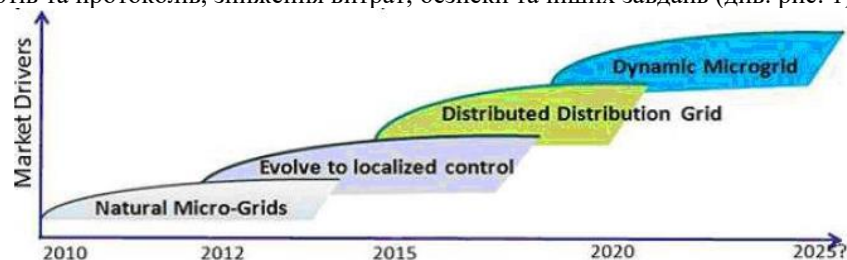


Рисунок 1 – Розвиток досліджень згідно документу «The Advanced Microgrid. Integration and Interoperability»

Причини доцільності проведення нових досліджень Microgrid [11, 12]:

- розвиток інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ);
- поширення джерел розосередженої генерації (ДРГ), у тому числі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), формування різних за типом та потужністю локальних систем енергозабезпечення;
- розвиток енергетичних кооперативів, агрегаторів навантажень та генераторів електроенергії при широкому застосуванні активних споживачів (prosumer);
- урізноманітнення навантажень при швидкому розвитку технологій перетворення та накопичення електроенергії;
- формування нових ринкових механізмів та нових бізнес-процесів з врахуванням положень клієнтоорієнтованого підходу концепції Smart Grid.

На сьогодні визначальними характеристиками вдосконалених Microgrid стали [14]: визначена певними межами локальна територія; приєднання до централізованої електромережі в одній точці та живлення від однієї центральної підстанції; здатність автоматично переходити на роботу в автономному режимі, при підключенні до мережі – забезпечувати синхронізацію, сумісність з системами керування та безпеки; наявність системи керування споживанням, включаючи системи керування виробництвом, передачею енергії, акумулюванням, розосередженими джерелами енергії, навантаженням; наявність системи двостороннього обміну енергією та інформацією в реальному часі відносно точки приєднання.

П'ять найбільших проектів, де задіяні найбільш просунуті системи Microgrid, наведено в табл. 2 [22].

Острівні енергетичні Microgrid представляють зараз 36% від усіх обсягів зберігання енергії Tesla, згідно з результатами аналізу Bloomberg New Energy Finance. Крім перерахованих п'яти проектів, з листопада 2016 р. компанія встановила свої акумулятори Powerpack першого або другого покоління на п'яти островах, чотирьох – в Тихому океані: Тау на Американському Самоа, моноліт на Фіджі і Кауаї і Гонолулу на Гаваях. П'ятий проект – на одному з островів в Північній Кароліні, в Атлантичному океані.

Функції Microgrid, які враховуються при дослідженнях, розробках, створенні прототипів і стандартизації, зведені в табл. 3 [23].

Таблиця 2 – П'ять найбільших проектів, де задіяні найбільш просунуті системи Microgrid

Об'єкт проекту	Технологія	Переваги
1. Gorona Del Viento, Канарські острови	Інтеграція вітрових установок $5 \times 2,3$ МВт з ГАЕС потужністю 11,32 МВт і дизель-генераторами на 11 МВт	Перша у світі інтеграція ГАЕС з відновлюваними джерелами, ефективне керування системою
2. Ross Island, Антарктика	Інтеграція вітрових установок $3 \times 330$ кВт з дизель-генераторами $9 \times 125$ кВт, установка стабілізатора PowerStore на 500 кВт	Мінімізація експлуатації дизель-генераторів, економія в паливі 463 тис. л / рік, зниження викидів CO <sub>2</sub> на 2800 т / рік
3. Марбл-Бар, Австралія	Інтеграція фотоелектричної установки $1 \times 300$ кВт з дизель-генераторами $4 \times 320$ кВт, установка стабілізатора PowerStore на 500 кВт	Мінімізація експлуатації дизель-генераторів, економія в паливі 405 тис. л / рік, зниження викидів CO <sub>2</sub> на 1100 т / рік
4. Мідний рудник ДеГросса, Австралія	Інтегроване рішення із застосуванням фотовольтаїчної установки 10,6 МВт з системою накопичення з дизель-генераторної установкою, установка стабілізатора PowerStore	Мінімізація експлуатації дизель-генераторів, економія в паливі 5 млн. л / рік
5. Острів Кадьяк, Аляска, США	Стабілізація острівної мережі	Стабілізація мережі з коливаннями 9 МВт, продовження терміну життя акумуляторних батарей

Світовий досвід свідчить, що Microgrid у певних ситуаціях можуть забезпечити зниження витрат комерційних та промислових споживачів на електропостачання до 25% і навіть більше порівняно із споживанням енергії лише з централізованої енергосистеми. Величина ефекту істотно залежить як від особливостей конкретних споживачів, і від того, які вимоги неекономічного характеру – за надійністю та екологічністю – висуваються цими споживачами. Ефект виявляється тим більшим, чим більш витратними є заходи з реконструкції та будівництва мережевої інфраструктури, необхідні для ліквідації дефіциту потужності в єдиній енергосистемі, яку споживачі відчувають або відчуватимуть у найближчому майбутньому.

Технологічною запорукою ефективності Microgrid виступають можливість комплексування та оптимального поєднання різних джерел енергії та гнучкості, а також наявність єдиного контуру керування, який дозволяє якнайкраще використовувати ці джерела.

Реалізація концепції Smart Grid показала, що основними драйверами попиту на ринку комерційних та промислових Microgrid виступають економічні причини:

- зростання ціни на електроенергію для промислових та комерційних споживачів (у тому числі багато в чому через практику перехресного субсидування);
- зростання вартості технологічного приєднання до мереж та складність виконання технічних умов на таке приєднання для промислових та комерційних споживачів.

Потенціал ринку комерційних та промислових Microgrid в основному визначатиметься перспективним попитом на потужність з боку нових промислових та комерційних споживачів та відповідним зростанням рівнів електроспоживання. Приріст електроспоживання та попиту на потужність залежать від макроекономічних умов та загальних темпів зростання економіки, але нові проекти у сфері промислового виробництва продовжать з'являтися за будь-яких загальних економічних умов.

Іншим важливим фактором для електроенергетичних систем, де ще широко не реалізуються положення концепції Smart Grid, виступає неможливість одночасно надійного та порівняно дешевого електропостачання комерційних та промислових споживачів у межах повністю ізольованих Microgrid. Цей фактор робить затребуваними Microgrid, приєднаних до електричних мереж, а отже, робить надзвичайно затребуваними розробки правових та технічних умов такого приєднання, а також взаємодії між Microgrid та систем передачі та розподілу електроенергії.

*Таблиця 3 – Функції Microgrid, які враховуються при дослідженнях, розробках, створенні прототипів і стандартизації*

№ з/п	Функція	Характеристика функції
1	Незалежність	Малі енергосистеми включають генерацію, накопичення і навантаження, і можуть працювати автономно у режимі підключеної енергосистеми та ізольованому. У першому випадку, мала енергосистема може самостійно оптимізувати своє виробництво і споживання електроенергії за врахування системної економічної оцінки, такої як рішення купівлі чи продажу. В обох режимах, система може звести до мінімуму викиди CO <sub>2</sub> за рахунок максимізації споживання поновлюваної енергії та мінімізації генерації на основі вичерпного палива. У ізольованому режимі система здатна до узгодження джерел і навантаження і може тримати напругу системи і частоту в певних межах з відповідним контролем.
2	Стабільність	Незалежне місцеве керування джерелами, акумуляторами, і навантаженнями малих енергосистем засноване на статизмі і рівнях напруги у точці підключення кожного пристрою. Це означає, що мала енергосистема може працювати стабільним чином протягом номінальних умов експлуатації та під час подій з перехідним процесом, незалежно від того, чи більша енергомережа працює чи вийшла зі строю. (Додаткові дослідження необхідні, однак, щоб досягти високого рівня стабільності, наприклад, щоб усунути непотрібну передачу реактивної потужності між обертовими або генераторами на основі інвертора.
3	Сумісність	Малі енергосистеми повністю сумісні з існуючою місцевою електроенергетичною мережею. Вони можуть розглядатися як функціональні одиниці, які підтримують розвиток існуючої системи у економічно і екологічно чистий спосіб.
4	Гнучкість	Розширення і інтенсивність розширення малої енергосистеми не повинні дотримуватися будь-яких точних прогнозів. Підготовчо-налагоджувальний час відповідних компонентів (працюючих на вичерпному паливі та ВДЕ, накопичувальних систем та ін.) є короткими, і мала енергосистема може зростати поступово. Малі енергосистеми також є технологічно нейтральними і в змозі впоратися з різноманітною сумішшю поновлюваних і генераторів, що працюють на вичерпному паливі.
5	Розширюваність	Малі енергосистеми можуть просто зростати за рахунок встановлення додаткових генераторів, накопичувачів і навантажень. Таке розширення як правило, вимагає додаткового нового проектування малої енергосистеми і може бути виконане на паралельній і модульній основі з метою розширення до більших рівнів виробництва та споживання електроенергії.
6	Ефективність	Централізована, а також структури контрольного контролера розподільчої малої енергосистеми може оптимізувати використання генераторів, керувати зарядкою і розрядкою накопичувачів енергії, а також керувати споживанням. Таким чином, цілі управління енергоспоживанням можуть бути глибоко оптимізовані, наприклад, в економічних, а також екологічних аспектах.
7	Економічність	За даними дослідження ринку, економічна оцінка рекуперації тепла і його застосування в системах ТЕЦ (когенерації) є дуже важливим для оцінки малих енергосистем. Крім того, використання поновлюваних джерел енергії дозволить знизити витрати на паливо і викиди CO <sub>2</sub> .
8	Модель з'єднання рівноправних вузлів	Малі енергосистеми можуть підтримувати справжню модель з'єднання рівноправних вузлів функціонування, керування та торгівлі енергією. Крім того, узгоджені енергетичні операції з централізованою енергосистемою також можливі з цією моделлю. Пропонована концепція не диктує розмір, розширюваність і кількість вузлів і темпи зростання малої енергосистеми.

З точки зору суб'єктів, які відповідають за надійність функціонування системного оператора та мережеских компаній такі умови не повинні погіршувати умови функціонування інших суб'єктів цих систем, у тому числі негативно впливати на та якість електропостачання та якість параметрів електроенергії.

Розвиток ринку комерційних і промислових Microgrid в Україні може забезпечити додатковий економічний ефект, обумовлений економії електроенергії на системному рівні. Ці ефекти багато в чому зумовлені тим, що локальні системи енергозабезпечення, у тому числі з використанням Microgrid, створюють конкуренцію рішенням централізованих електроенергетичних системи, зокрема, будівництву мережевої інфраструктури чи нових джерел електроенергії як складових цих систем.

Зниження витрат споживачів Microgrid на електропостачання виникає за рахунок того, що вартість електроенергії, яка виробляється в Microgrid, для споживачів виявляється нижчою, ніж вартість електроенергії, що отримується з мережі. Зниження вартості електроенергії формується переважно за рахунок зниженням плати за передачу. Зниження потреби в інвестиціях на стороні централізованої енергосистеми формується зі зниження потреби в інвестиціях мережеских компаній у технологічне приєднання та зростання приєднаної потужності абонентів, що використовують Microgrid, а також зниження потреби в інвестиціях у будівництво нових та модернізацію існуючих генеруючих потужностей при задоволенні частини перспективного попиту на потужність за рахунок Microgrid.

Крім перерахованих економічних ефектів застосування Microgrid може стати місцевими джерелами енергетичної гнучкості для електроенергетичної системи, наприклад, надаючи різним суб'єктам електроенергетики послуги гнучкості. До таких послуг, які мають пропонуватися на конкурентних підставах, відносяться: керування попитом на електроенергію; регулювання частоти в енергосистемі; забезпечення третинних резервів потужності; регулювання рівня напруги та компенсація реактивної потужності; регулювання навантаження на обладнання центрів живлення; забезпечення аварійного резерву для споживачів.

#### **Smart Grid як послуга**

Інтелектуальна мережа (Smart Grid) дозволяє інтегрувати розосереджені ВДЕ в звичайну мережу розподілу електроенергії таким чином, що цілі щодо витрат електроенергії та забруднення середовища можуть бути досягнуті за допомогою інтелектуального та ефективного узгодження між генераторами електроенергії та енергетичними навантаженнями. Smart Grid as a Service (SGaaS) не тільки дозволяє складати Smart Grid з основних сервісів, але й також дозволяє досвідченим користувачам вибирати між власними послугами на основі потреб [24].

Традиційна мережа статична, оскільки вона не знає, скільки і коли електроенергії потрібно користувачам. Smart Grid спрямована на забезпечення більш інтелектуального та ефективного узгодження між виробництвом електроенергії та потребами в електроенергії від навантаження. Таким чином, підприємства, які виробляють електроенергію, не потребують підтримки, потреби в електроенергії, які перевищують нормальну середню величину. Ці потреби можуть бути задоволені за допомогою розосереджених енергетичних ресурсів (DER) та системи зберігання енергії (ESS).

Статус-кво проектування Smart Grid ще далекий від зрілості через поточну базу інфраструктуру для комунікації та адаптації. У цій роботі ми намагаємося використовувати популярну сервісно-орієнтовану архітектуру (SOA) для заповнення цієї прогалини інфраструктури інтелектуальних мереж. SOA забезпечує більшу гнучкість у проектуванні та розробці систем, що забезпечує надійну конструкцію системи завдяки відновленню функцій шляхом повторної підписки на нові послуги або відновлення служб, які не додалися.

Сервісно-орієнтована архітектура SOA стає тенденцією в системному проектуванні завдяки численним перевагам. Наочним доказом цього є інфраструктура хмарних обчислень, заснована на трьох рівнях IaaS (інфраструктура як послуги), PaaS (платформа як послуги) та SaaS (програмне забезпечення як послуги). Подальші хмарні обчислення стають основною програмою, завдяки якій вони стають все більш мобільними. Наприклад, інформація про потужність із Smart лічильників зараз через веб-сервер завантажується на хмарі, до яких потім можна отримати доступ через відповідні сервіси.

Що стосується сервісно-орієнтованої архітектури Smart Grid, то роботи в цій сфері тільки розпочалися. У роботі [25] запропоновано архітектуру для інтелектуальних пристроїв кінцевих пристроїв, які є підключеними до розподілених систем керування енергією. Запропонована архітектура зосереджена на інтеграції пристроїв кінцевого користувача та сервісу, однак цей підхід не вирішує проблеми невідповідності інтерфейсу. Автори [26] запропонували інфраструктуру для сервісно-орієнтованого попереднього вимірювання в Smart Grid, прийняли механізм контролю доступу на основі ролей, щоб гарантувати безпечний доступ до Smart Grid. Також у [27] наведено гнучку сервісно-орієнтовану архітектуру для керування активами енергосистем. У цьому процесі використовувався алгоритм прийняття рішень про декомпозицію Бендера, щоб розкласти дуже складні процеси прийняття рішень на процеси меншої складності. Уніфікована система керування Smart Grid представлена в [28]. Вказано, що



уніфікована система керування є важливою частиною побудови середовища Smart Grid, однак в цій роботі не розглядаються питання конгломерації інформації.

Для ієрархічної архітектури SGaaS в роботі [24] запропоновано трирівневу архітектуру, включаючи рівень інтелектуальної мережі (SGL) для глобальної оптимізації, наприклад мінімізацію глобального захисту або глобальних витрат, рівень координації контролю (CCL) для підтримки надійності та безпеки в Smart Grid та рівня Microgrid (MGL) для моніторингу стану пристроїв кінцевого користувача.

Процес торгівлі є питаннями при розробці SOA Smart Grid. У SaaS підтримується три механізми торгівлі одного аукціону, відповідність та оптимізація, вибір яких можна зробити під час переговорів про угоду про рівень обслуговування на рівні Smart Grid. SaaS забезпечує гнучку структуру, яка може адаптувати метод оптимізації для різних цілей на кожному рівні.

З наведеного вище щодо дизайну Smart Grid ми бачимо, що основна архітектура потребує гнучкості та масштабованості. У роботі [24] запропоновано Smart Grid як послуги, яка використовує сервісно-орієнтовану архітектуру системи і робить її більшою гнучкою та масштабною.

Основні переваги Smart Grid включають зниження загальної вартості електроенергії (завдяки поінформованості про використання електроенергії в режимі реального часу за допомогою передової вимірювальної інфраструктури (AMI)), зменшення глобального забруднення (через зелені відновлювані енергетичні ресурси), вищу надійність електричної енергії, розподіл або менша ймовірність відключень (через інтелектуальну розширену систему автоматизації розподілу (ADAS)), більш висока ефективність розподілу енергії (через коротші шляхи розподілу та локалізовані Microgrid) та зменшення втрати електроенергії (через пікове вирівнювання виробництва електроенергії комунальними підприємствами). про розподіл вимог DER).

Хоча Smart Grid мають низку переваг як для комунального підприємства, так і для досвідчених користувачів, все ще існує низка проблем, які потребують подальшого дослідження та розробки. Деякі типові проблеми включають реструктуризацію мережі розподілу електроенергії з метою врахування зростання частки ВДЕ, проблему попиту та відповіді на Microgrid, рівні інтелектуалізації мережі, гарантію якості обслуговування (QoS) для всіх видів функціональних вимог, таких як зниження навантаження і планування навантаження, а також гнучкість і масштабованість підключення користувачів до мережі.

**Рівень Microgrid.** Рівень Microgrid є найнижчим рівнем в ієрархії SOA розумної мережі, і кінцеві користувачі в основному підписуються на послуги на цьому рівні. Кінцевими споживачами є енергетичні навантаження, накопичувачі енергії та генератори електроенергії. На цьому рівні є чотири типи послуг, а саме обслуговування навантаження, обслуговування зберігання, обслуговування генератора та обслуговування Microgrid: обслуговування навантаження, служба зберігання, обслуговування генератора, служба Microgrid.

**Рівень контролю координації.** Це середній рівень, який відповідає за підтримку обмежень на рівні мережі, таких як обмеження напруги та вимоги до підстанції. На цьому рівні існує лише одна служба, а саме координаційна служба. В основному існує дві функціональні можливості цієї служби:

- перевірка доцільності кожної торгової дії, визначеної службами верхнього рівня інтелектуальної мережі, до того, як дії будуть реалізовані сервісами рівня Microgrid;
- відповідальність за ізоляцію Microgrid (спрямовування Microgrid в острівний режим, або допомагати Microgrid відновитися з острівного режиму).

**Рівень Smart Grid.** Це найвищий рівень і відповідає за торгівлю між Microgrid на рівні Smart Grid. Існує дві послуги, а саме: комунальні послуги та послуги торгівлі:

- комунальні служби: ця послуга представляє комунальне підприємство, яке може безперервно постачати електроенергію, але за набагато вищою ціною в порівнянні з електроенергією від Microgrid;
- торгова служба: ця служба відповідає за узгодження потреб в електроенергії з джерелами живлення в Microgrid. Служба Microgrid може підписатися на послугу торгівлі в інтелектуальній мережі; однак, необхідно, щоб служба Microgrid також підписалася на службу координації, пов'язану з цією торговою послугою (гарантування, що всі послуги Microgrid, які підписані на торговий сервіс, дотримуються правил координації, встановлених зазначеною Smart Grid).

Метод торгівлі може бути одним із трьох, які зазвичай зустрічаються в сучасній системі: узгодження, торги чи оптимізація.

Запропонована SGaaS була розроблена як SOA та реалізована за допомогою мультиагентної системи (MAS) [24].

Архітектура SGaaS на основі MAS складається з трьох рівнів, і кожен рівень містить одну або кілька служб, які складаються з кількох агентів. Агенти мають справу з різними подіями, такими як планування використання електроенергії в житлових приміщеннях і моніторинг стану заряду (SOC) пристроїв зберігання даних. На рівні Microgrid існує чотири види послуг, а саме: обслуговування навантаження, обслуговування зберігання, обслуговування генератора та обслуговування Microgrid. На рівні координаційного контролю діє єдина координаційна служба. На рівні Smart Grid існують два типи послуг,

а саме: комунальні послуги та послуги торгівлі.

### **1. Рівень Microgrid (MGL)**

**1) Обслуговування навантаження.** Силові навантаження обслуговуються через служби навантаження. Кожне енергетичне навантаження, як-от промислове підприємство, частина Smart будинку або комерційне підприємство, має підписатися на послугу навантаження, щоб задовольнити свої вимоги до електроенергії. Служба навантаження складається з чотирьох агентів, включаючи прогнозування навантаження, збір навантаження, планування навантаження та агенти керування навантаженням.

**2) Служба зберігання.** Ця служба відповідає за моніторинг, планування, контроль та прогнозування потужності систем зберігання енергії. Служба складається з чотирьох агентів: агент моніторингу стану зберігання/розряду; агент планування зберігання (відповідає за планування використання батареї); агент керування сховищем (відповідає за контроль та керування батареями); агент прогнозування ємності зберігання (агент відповідає за прогнозування ємності батареї).

**3) Обслуговування генератора.** Генератори електроенергії, такі як PV, WT, FC та MT, обслуговуються службою генератора, яка включає збір інформації про виробництво електроенергії, прогнозування кількості електроенергії, яка буде вироблена в майбутніх часових інтервалах, а також планування та керування генераторами електроенергії.

Для реалізації послуги використовуються чотири агенти:

- агент збирання електроенергії (відповідає за збір і запис інформації про виробництво електроенергії);
- агент прогнозування потужності (відповідає за прогнозування майбутнього виробництва електроенергії);
- агент планування електроенергії (відповідає за коригування та планування обсягу виробництва електроенергії);
- агент контролю потужності (відповідає за контроль над джерелами живлення, якщо вони піддаються контролю).

**4) Сервіс Microgrid.** Служба Microgrid відповідає за торгівлю всередині Microgrid після отримання запитів на купівлю електроенергії від служб навантаження/зберігання та запитів на продаж електроенергії від служб генерування/акумуляції. Служба Microgrid складається з трьох агентів:

- агент по збору даних всередині Microgrid (агент відповідає за збір всієї інформації про навантаження, вироблення електроенергії та зберігання в Microgrid);
- агент з торгівлі всередині Microgrid (агент відповідає за здійснення торгівлі електроенергією в Microgrid між навантаженнями, генераторами та накопичувачами);
- агент конгломерації всередині Microgrid (відповідає за конгломерат даних двох або більше інших служб).

### **2. Рівень контролю координації (CCL)**

На середньому рівні керування координацією нашої запропонованої архітектури єдина служба координації відповідає за підтримку обмежень на рівні мережі, таких як обмеження напруги та вимоги до підстанції, такі як обмеження розташування. Послуга включає двох агентів: координаційний агент з техніко-економічного обґрунтування та агент з режиму островкування Microgrid.

### **3. Рівень Smart Grid (SGL)**

На найвищому рівні Smart Grid є дві послуги, а саме: комунальні послуги та послуги торгівлі. Комунальна служба складається з двох агентів, а торгова служба складається з п'яти агентів. Комунальна служба: агент динамічних цін на енергію; агент за контрактом (відповідає за укладання договору між розумною мережею та комунальним підприємством). Торгова служба: агент повідомлень про торгівлю між Microgrid; агент торговельного процесу між м Microgrid; агент міжмікромережевого аукціону; агент узгодження між Microgrid; агент оптимізації між Microgrid.

Таким чином, SGaaS, використовуючи сервісно-орієнтовану архітектуру (SOA) систем, забезпечує більшу гнучкість у проектуванні та розробці системи. Це також робить конструкцію системи більш надійною завдяки простоті відновлення функцій за допомогою повторної підписки на нові послуги або відновлення служб, які не вдалися. SGaaS можна реалізувати за допомогою найсучаснішої мультиагентної технології.

### **Microgrid як послуга**

Microgrid as a Service (MaaS) – це послуга, яка пропонує розгортання Microgrid, зменшуючи початкову вартість інвестицій і складність [29]. Це хмарна платформа, яка включає в себе програмне забезпечення, дизайн та повний набір інструментів для фінансування. Ці послуги сприяють модернізації інфраструктури за рахунок виробництва енергії за доступних операцій та витрат на управління. Він широко знайшов своє застосування в моніторингу та контролі експлуатації, інженерії та проектуванні.

Ринок послуг Microgrid as a Service оцінювався в 1,87 млрд. дол. США в 2020 році і, за прогнозами, досягне 4,78 млрд. дол. до 2028 року, зростаючи на рівні 14,64% з 2021 по 2028 рік [30].

Донедавна формування бізнес-моделей для Microgrid була значною проблемою для багатьох організацій. Будівництво та розгортання вимагали дорогих капітальних витрат, які були передані платнику податків або податків, у випадку застосування комунальних послуг чи розгортання в державному секторі, або удару в прибуток для багатьох приватних установок. Однак поява нових механізмів фінансування зменшила бар'єри для широкого застосування Microgrid. Microgrid-as-a-Service (MaaS) – це новий провідний механізм фінансування, який дозволяє організаціям розгорнути Microgrid без будь-яких попередніх інвестицій [31, 32]. Ця модель фінансування дозволяє муніципальним, районним, інституційним, комерційним об'єктам і великим будівлям стабілізувати довгострокові витрати на енергію та модернізувати критичну енергетичну інфраструктуру без капітальних витрат. Для багатьох районів це означає, що електроенергія в Microgrid може бути менш витратною, ніж електроенергія місцевих енергопостачальних підприємств.

MaaS – це новий провідний механізм фінансування, який дозволяє організаціям розгорнути Microgrid без будь-яких попередніх інвестицій. Модель MaaS усуває фінансові ризики та складність функціонування та обслуговування. На додаток до надання апаратним і програмним забезпеченням, постачальники MaaS організують фінансування та укладання угоди про експлуатацію та обслуговування, щоб зробити розгортання Microgrid доступним рішенням «під ключ». MaaS допомагає вирішити проблеми, з якими стикаються багато систем енергозабезпечення, таких як: витрати на модернізацію інфраструктури; цілодобова стійка потужність для забезпечення цілісності експлуатації, особливо для критичних об'єктів громадської безпеки; передбачувані та хеджовані витрати на електроенергію протягом тривалого періоду часу; зменшення вартості енергії за рахунок монетизації пільг із податку на акціонерний капітал для державних та інших неприбуткових організацій.

Модель фінансування MaaS впроваджує інновації щодо розгортання Microgrid, що дозволяє комунальним підприємствам і кінцевим користувачам зосередитися на вирішенні важливих проблем, викликаних новим енергетичним ландшафтом: енергетична стійкість, модернізація інфраструктури, інтеграція ВДЕ та довгострокова стабільна вартість енергії. Завдяки інноваційним фінансовим моделям та доступу до доступної відновлюваної енергії споживачі енергії мають більше можливостей використовувати Microgrid для виробництва енергії та керування її споживанням шляхом активної участі на ринку. Механізми MaaS пропонують клієнтам більше контролю над їхніми енергетичними потребами, що дозволяє їм підвищити стійкість і надійність, збалансувати використання енергії, досягти цілей чистої енергії та досліджувати інші інноваційні продукти та послуги [33]. Коли вони впроваджуються електричними компаніями або в поєднанні з ними, вони можуть допомогти електричним компаніям підвищити стійкість усієї енергетичної мережі, забезпечуючи при цьому численні суспільні переваги, які виходять за межі користувачів Microgrid, до мережі та всіх клієнтів.

Завдяки різноманітним державним ініціативам у цьому сегменті очікується подальше зростання ринку. Наприклад, у січні 2020 року в рамках програми, що фінансується Міністерством економіки США, у поєднанні з одночасним проектуванням, Pacan Street розробила житлову Microgrid під назвою The Energy Switch. Програма була однорічним планом розвитку, який включав двомісячну демонстрацію, і вона закінчилася тим, що NREL провела перевірку продуктивності третьою стороною.

У квітні 2019 року Carlyle Group і Schneider Electric оголосили про розширення свого партнерства в першу чергу для розробки нових та інноваційних інфраструктурних проектів. Результатом співпраці Schneider Electric стане використання своїх можливостей удосконаленого підключення та аналізу в режимі реального часу до поточної та майбутньої інфраструктури Carlyle та інвестицій у Microgrid. Метою цього партнерства є розробка системи, здатної виконувати великі проекти, такі як проект модернізації аеропорту JFK, який передусім використовуватиме Microgrid для перетворення аеропорту на 100% відновлювану енергію, а також модульну рішення «Енергія як послуга» з підтримкою Microgrid для комерційних та промислових клієнтів.

Сьогодні клієнти Microgrid не хочуть купувати Microgrid, вони хочуть купувати енергетичні рішення [34]. Розробка Microgrid – це не стільки створення проектів, скільки вирішення проблем клієнтів і допомога їм зрозуміти, яке рішення необхідно. Розвиток Microgrid зводиться до того, щоб мати привабливий проект та оптимізувати капітальні витрати, маючи гнучкі, але стандартизовані моделі фінансування. Ми повинні забезпечити стандартизовані та масштабовані рішення, мати гнучкість, вбудовану в цю стандартизацію, оскільки потреби кожного клієнта різні, і важливо адаптувати об'єкт стандартизованим способом. Клієнти можуть навіть не знати, яка комбінація технологій підходить для їхніх цілей.

MaaS визначається перш за все як рішення, яке не вимагає авансового капіталу для споживача енергії, і яке зосереджено на результатах, таких як енергія на місці [32–34]. Щоб розробити нову платформу для вивчення моделі енергія як послуга, групи Siemens Smart Infrastructure and Financial Services створили нову компанію під назвою Calibrant Energy. Calibrant створюватиме енергетичні рішення на місці, які забезпечать швидку економію, впевненість витрат, стійкість і недороге розширення мережі.

Технології будуть включати сонячні, інтегровані рішення для сонячних батарей, гібридні системи, автономні батареї, Microgrid, комбіноване тепло та електроенергію, а також оновлення інфраструктури централізованого опалення та охолодження. Така платформа необхідна для того, щоб пропонувати масштабовані та повторювані рішення для кількох технологій, які є впорядкованими та послідовними для клієнтів та інвесторів.

МaaS за принципом вертикалі сегментується на державні та освітні, житлові та комерційні, промислові, військові та комунальні [35]. Серед цих сегментів очікується, що ринок промислової вертикалі зросте з найвищим CAGR протягом прогнозованого періоду. Нижчі витрати на енергію, більш надійне та якісне електропостачання, стійкість мережі, доступ до електроенергії, незалежність від палива – це деякі з переваг, які сприяли поширенню технології Microgrid у промисловій вертикалі. МaaS за типом послуги сегментується на інженерні та проектні послуги, програмне забезпечення як послугу, службу моніторингу та контролю та обслуговування та обслуговування. Очікується, що програмне забезпечення як послуга зростатиме найвищими темпами протягом прогнозованого періоду, а потім – обслуговування та обслуговування. Завдяки програмному забезпеченню як послуги власники Microgrid мають єдину точку відповідальності та зменшують ризик затримок і збоїв проекту. Це призводить до безпечнішої, надійнішої та більш економічної системи Microgrid. МaaS за типом мережі розділяються на типи: підключений до мережі, віддалений або острівний.

Важливою рушійною силою зростання глобального ринку МaaS є такі фактори, як краща якість надійного електропостачання, розумні витрати енергії та незалежність від палива [33–36]. Зростання конверсії МaaS у кількох галузях, таких як оборона, медицина та віддалені райони, є основним фактором, що стимулює зростання ринку. Крім того, величезні державні інвестиції у створення інфраструктури Microgrid є ще однією особливістю, що сприяє росту ринку.

Основними гравцями на ринку МaaS є ABB Ltd (Швеція), General Electric (США), Siemens AG (Німеччина), Eaton Corp. PLC (Ірландія), Schneider Electric SE (Франція), Duke Energy Corporation (США), Northern Power system Corp. (США), Exelon Corp. (США), NRG Energy, Inc. (США), Spirae, Inc. (США).

**Ключові розробки.** У березні 2021 року компанія HOMER Energy вдосконалила своє програмне забезпечення HOMER Pro, щоб працювати над потужністю та гнучкістю джерела сили та підштовхувати до ідеальної зміни енергії. Нова модифікація HOMER Pro допомогла інженерам-енергетикам у плануванні та вдосконаленні незручностей стійких перехресних енергетичних систем, включаючи системи накопичення енергії, орієнтовані на сонце, вітер та акумулятори (BESS). У січні 2020 року в рамках програми, що фінансується Міністерством економіки США, пов'язаної з одночасними планами, Ресан Street створила приватну Microgrid під назвою The Energy Switch. Програма була швидкоплинним, однорічним планом просування, який включав двомісячну виставку, і вона завершилася тим, що NREL очолив схвалення виконання стороннім.

У квітні 2019 року Rolls-Royce Power Systems оголосила, що буде співпрацювати з технологічною компанією ABB для вдосконалення технологій Microgrid і передової автоматизації. Обидві компанії мають на меті створити енергоефективне рішення для Microgrid для комерційних і промислових компаній. У квітні 2019 року Carlyle Group і Schneider Electric повідомили про вдосконалення своєї організації, в основному, для стимулювання нових та креативних рамкових проектів. Скоординовані зусилля дозволять Schneider Electric застосувати свої можливості в передовій доступності та безперервних знаннях для потоку та майбутніх підприємств Carlyle Foundation та Microgrid. У листопаді 2019 року Siemens і екологічно чистий енергетичний дизайнер juwi уклали стратегічне технологічне партнерство, щоб зосередитися на Microgrid у видобувному бізнесі. Обидві організації очікують впроваджувати та послідовно створювати прогресивні системи керування Microgrid, які забезпечать послідовну координацію сил від стабільного електропостачання до аварійних джерел живлення шахти. У вересні 2019 року Honeywell і NRStor C&I оголосили про запуск першого в своєму роді найбільшого в Північній Америці відправлення запасів енергії поза лічильником. Організації планують запропонувати клієнтам у США та Канаді недорогі, підтримувані та універсальні джерела живлення.

#### **Висновки**

1. Наведена характеристика EaaS як «пакетної» моделі обслуговування, в рамках якої клієнту надається апаратне і програмне забезпечення та енергетичні послуги, а рішення категорії EaaS включає в себе послуги з керування споживанням і підвищення енергоефективності, впровадження ВДЕ та інших децентралізованих джерел енергопостачання, а також оптимізувати баланс між попитом і пропозицією на ринку електроенергії.

2. Для оцінки особливостей застосування EaaS до Microgrid детально розглянуто особливості побудови та функціонування Microgrid, а також представлено Smart Grid as a Service (SGaaS) на основі Сервісно-орієнтованої архітектури, де для ієрархічної архітектури SGaaS наведено перспективну тривірневу архітектуру, яка включає рівень інтелектуальної мережі для глобальної оптимізації, наприклад мінімізацію глобального захисту або глобальних витрат, рівень координації контролю для підтримки

надійності та безпеки в Smart Grid та рівня Microgrid для моніторингу стану пристроїв кінцевого користувача.

3. Детально проаналізовано бізнес-модель Microgrid as a Service (MaaS), як послуги, яка пропонує розгортання Microgrid, зменшуючи початкову вартість інвестицій і складність, та показано, що MaaS – це новий провідний механізм фінансування, який дозволяє організаціям розгорнути Microgrid без будь-яких попередніх інвестицій, як рішення, яке не вимагає авансового капіталу для споживача енергії, і яке зосереджено на результатах, таких як енергія на місці. При цьому механізми MaaS пропонують клієнтам більший рівень контролю над їхніми енергетичними потребами, що дозволяє їм підвищити стійкість і надійність, збалансувати використання енергії, досягти цілей «чистої» енергії.

#### Список використаної літератури

1. Денисюк С.П. Енергетичний перехід – вимоги до якісних змін у розвитку енергетики // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2019. – № 1. – С.7–28.
2. Денисюк С. П., Соколовський П. В. Аналіз функціонування гнучкої генерації на етапі переходу до інтелектуальних мереж Smart Grid // Електрифікація транспорту. – 2018. – № 15. – С. 31–42.
3. Холкин Д.В., Чаусов И.С. Цифровой переход в энергетике России: в поисках смысла // Энергетическая политика. – Вып. 5, 2018. – С. 7–16.
4. Transactive Energy Models. – Business and regulatory models working group, NIST, 2016.
5. Navigant research «Transactive Energy Markets», Navigant, 2018
6. Navigant research «Energy Cloud 4.0: Capturing Value through Disruptive Energy Platforms», Navigant, 2018.
7. [https://tadviser.com/index.php/Article:The\\_Internet\\_of\\_energy\\_\(MicroGrid\)\\_the\\_Small-scale\\_distributed\\_power\\_generation](https://tadviser.com/index.php/Article:The_Internet_of_energy_(MicroGrid)_the_Small-scale_distributed_power_generation)
8. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/uk/Documents/energy-resources/deloitte-uk-energy-as-a-service-report-2019.pdf>
9. <http://zserials.org/zarubezhnye/johan-falk.php>
10. <https://realto.io/energy-as-a-service-hub/the-evolution-of-energy-as-a-service/>
11. Milind J. Pati, Shalaka N. Chaphekar. Control of Microgrid: Literature Review // International Journal of Engineering Innovation & Research Volume 7, Issue 2. – P.145–151.
12. Mahamad Nabab Alam, Saikat Chakrabarti, Arindam Ghosh. Networked Microgrids: State-of-the-Art and Future Perspectives // IEEE Transactions on Industrial Informatics (Volume: 15, Issue: 3, March 2019). – P. 1238 – 1250.
13. Денисюк С.П., Дерев'янюк Д.Г., Белоха Г.С. Підвищення якості електропостачання у Energy Smart Community з джерелами розосередженої генерації // Вісник ВПІ. – 2021. – Вип. 5. – С. 64–70.
14. Martin F., Sanchez-Mirallas A., Rivier M. A Literature Review of Microgrids: A functional layer based classification // Renewable and Sustainable Energy Reviews, September 2016.
15. [https://tadviser.com/index.php/Article:The\\_Internet\\_of\\_energy\\_\(MicroGrid\)\\_the\\_Small-scale\\_distributed\\_power\\_generation](https://tadviser.com/index.php/Article:The_Internet_of_energy_(MicroGrid)_the_Small-scale_distributed_power_generation)
16. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/microgrid-market>
17. Денисюк С.П., Бойко І.Ю. Підвищення енергоефективності microgrid з дизель-генераторами // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2021. – № 2. – С. 15–28.
18. Денисюк С.П., Коломійчук М.О. Оцінка фінансових та технічних показників ефективності роботи Microgrid в динамічних режимах // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2021. – № 3(65). – С.18–39.
19. Microgrid Analysis and Case Studies Report. – California Energy Commission, 2018
20. Phase I. Microgrid Cost Study: Data Collection and Analysis of Microgrid Costs in the United States. – National Renewable Energy Laboratory, 2018
21. The Advanced Microgrid. Integration and Interoperability. – SANDIA REPORT SAND, 2014–1535, March 2014.
22. <http://smartenergysummit.ru/novosti/microgrid>
23. EU – More Microgrids. Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids. – European Research Project.
24. <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/535308/>
25. Verschuere T., Haerick W., Mets K., Develder C., De Turck F., Pollet T. Architectures for smart end-user services in the power grid // Proceedings of the IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS '10), pp. 316–322, Osaka, Japan, April 2010.
26. Chen S., Lukkien J., L. Zhang L. Service-oriented advanced metering infrastructure for smart grids // Proceedings of the Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC '10), pp. 1–4, March 2010.

27. Pham H.Q., Santhanam G.R., McCalley J.D., Honavar V.G. BenSOA: a flexible service-oriented architecture for power system asset management // Proceedings of the 41st North American Power Symposium (NAPS '09), Starkville, Mass, USA, October 2009.

28. Enose N. A Unified management system for Smart Grid // Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies—India (ISGT India), pp. 328–333, December 2011.

29. <https://www.verifiedmarketresearch.com/download-sample/?rid=41394>

30. <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/microgrid-as-a-service-market/>

31. <https://microgridknowledge.com/microgrids-as-a-service/>

32. Microgrids-as-a-Service: Making Resilient, Efficient and Sustainable Energy a Reality August 23, 2017  
By Schneider Electric

33. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/microgrid-as-a-service-market>

34. <https://www.veckta.com/2020/12/03/microgrid-financing-with-energy-as-a-service/>

35. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/microgrid-as-a-service-market-30653958.html>

36. <https://www.verifiedmarketresearch.com/ask-for-discount/?rid=41394>

**S. Denysiuk, Dr. Sc. Sciences, Prof., ORCID 0000-0002-6299-3680  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

**H. Melnychuk, Ph.D., ORCID 0000-0002-8173-0472**

**Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine**

**I. Cherneshchuk, postgraduate, ORCID 0000-0001-6895-7843**

**V. Lysyi, postgraduate, ORCID 0000-0003-3714-7623**

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
TECHNICAL AND ECONOMIC DEVELOPMENT MECHANISMS  
OF LOCAL ENERGY SUPPLY SYSTEMS (MICROGRID)**

*The business model of energy as a service (Energy-as-a-service, EaaS) is considered as a direction of development of the concept of 3D (Decarbonization, Decentralization, Digitalization) and the conceptual model of the Internet of energy. At the same time, EaaS is formed in the form of a "package" service model, in which the customer is provided with hardware and software and energy services. EaaS solutions should include consumption management and energy efficiency services, promote the introduction of renewable energy sources (RES) and other decentralized energy sources, and optimize the balance between supply and demand in the electricity market. EaaS is shown to be a broad term for service-driven business models with innovative potential to transform the energy industry*

*To assess the specifics of EaaS application to Microgrid, the construction and operation of Microgrid as a local power system or power supply system, which is a technological complex consisting of generation facilities (energy sources), energy flexibility sources and electricity consumers, which are collected under a single management ensuring the most efficient and consumer-friendly energy supply. It is determined that the technological guarantee of the efficiency of modern Microgrid is the ability to integrate and optimally combine different energy sources and flexibility, as well as the presence of a single control loop that allows the best use of these sources.*

*Smart Grid as a Service (SGaaS) based on Service-Oriented Architecture is presented. The SGaaS hierarchical architecture provides a promising three-tier architecture that includes an intelligent network level for global optimization, such as minimizing global protection or global costs, a level of coordination to maintain reliability and security in the Smart Grid, and a Microgrid level to monitor end-user device status.*

*The implementation of the EaaS and SGaaS mechanisms has stimulated the development of Microgrid as a Service (MaaS) - as a service that offers the deployment of Microgrid, reducing the initial cost of investment and complexity. MaaS has been identified as a new flagship funding mechanism that allows organizations to deploy Microgrid without any prior investment, as a solution that does not require advance capital for energy consumers and focuses on results such as on-site energy. MaaS mechanisms offer customers more control over their energy needs, enabling them to increase the sustainability and reliability of their energy supply, balance energy use, achieve clean energy goals and explore other innovative products and services.*

**Keywords:** Microgrid, efficiency, business model energy as a service, Smart Grid as a service, service-oriented architecture, Microgrid as a service.

#### **References**

1. Denysiuk S. Energy transition – requirements for qualitative changes in energy development // Energy: Economics, Technology, Ecology. – 2019. – № 1. – P. 7–28.

2. Denysiuk S., Sokolovskiy P. Analysis of the functioning of flexible generation at the stage of transition to Smart Grid // Electrification of transport. – 2018. – № 15. – P. 31–42.

3. Kholkin D., Chausov I. Digital transition in Russia's energy sector: in search of meaning // Energy policy. – Issue. 5, 2018. – P. 7–16.
4. Transactive Energy Models. – Business and regulatory models working group, NIST, 2016.
5. Navigant research «Transactive Energy Markets», Navigant, 2018
6. Navigant research «Energy Cloud 4.0: Capturing Value through Disruptive Energy Platforms», Navigant, 2018.
7. [https://tadviser.com/index.php/Article:The\\_Internet\\_of\\_energy\\_\(MicroGrid\)\\_the\\_Small-scale\\_distributed\\_power\\_generation](https://tadviser.com/index.php/Article:The_Internet_of_energy_(MicroGrid)_the_Small-scale_distributed_power_generation)
8. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/uk/Documents/energy-resources/deloitte-uk-energy-as-a-service-report-2019.pdf>
9. <http://zserials.org/zarubezhnye/johan-falk.php>
10. <https://realto.io/energy-as-a-service-hub/the-evolution-of-energy-as-a-service/>
11. Milind J. Pati, Shalaka N. Chaphekar. Control of Microgrid: Literature Review // International Journal of Engineering Innovation & Research Volume 7, Issue 2. – P.145–151.
12. Mahamad Nabab Alam, Saikat Chakrabarti, Arindam Ghosh. Networked Microgrids: State-of-the-Art and Future Perspectives // IEEE Transactions on Industrial Informatics (Volume: 15, Issue: 3, March 2019). – P. 1238 – 1250.
13. Denysiuk S., Dereviyanko D., Beloha G. Improving the quality of electricity supply in the Energy Smart Community with sources of dispersed generation // Bulletin of VPI. – 2021. – Issue 5. – P. 64–70.
14. Martin F., Sanchez-Mirallas A., Rivier M. A Literature Review of Microgrids: A functional layer based classification // Renewable and Sustainable Energy Reviews, September 2016.
15. [https://tadviser.com/index.php/Article:The\\_Internet\\_of\\_energy\\_\(MicroGrid\)\\_the\\_Small-scale\\_distributed\\_power\\_generation](https://tadviser.com/index.php/Article:The_Internet_of_energy_(MicroGrid)_the_Small-scale_distributed_power_generation)
16. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/microgrid-market>
17. Denysiuk S., Boiko I. Increasing Microgrid energy efficiency with diesel generators // Energy: Economics, Technology, Ecology. – 2021. – № 2. – P. 15–28.
18. Denysiuk S., Kolomiichuk M. Evaluation of financial and technical performance of Microgrid in dynamic modes // Energy: Economics, Technology, Ecology. – 2021. – № 3(65). – P.18–39.
19. Microgrid Analysis and Case Studies Report. – California Energy Commission, 2018
20. Phase I. Microgrid Cost Study: Data Collection and Analysis of Microgrid Costs in the United States. – National Renewable Energy Laboratory, 2018
21. The Advanced Microgrid. Integration and Interoperability. – SANDIA REPORT SAND, 2014–1535, March 2014.
22. <http://smartenergysummit.ru/novosti/microgrid>
23. EU – More Microgrids. Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids. – European Research Project.
24. <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/535308/>
25. Verschueren T., Haerick W., Mets K., Develder C., De Turck F., Pollet T. Architectures for smart end-user services in the power grid // Proceedings of the IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS '10), pp. 316–322, Osaka, Japan, April 2010.
26. Chen S., Lukkien J., L. Zhang L. Service-oriented advanced metering infrastructure for smart grids // Proceedings of the Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC '10), pp. 1–4, March 2010.
27. Pham H.Q., Santhanam G.R., McCalley J.D., Honavar V.G. BenSOA: a flexible service-oriented architecture for power system asset management // Proceedings of the 41st North American Power Symposium (NAPS '09), Starkville, Mass, USA, October 2009.
28. Enose N. A Unified management system for Smart Grid // Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies—India (ISGT India), pp. 328–333, December 2011.
29. <https://www.verifiedmarketresearch.com/download-sample/?rid=41394>
30. <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/microgrid-as-a-service-market/>
31. <https://microgridknowledge.com/microgrids-as-a-service/>
32. Microgrids-as-a-Service: Making Resilient, Efficient and Sustainable Energy a Reality August 23, 2017 By Schneider Electric
33. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/microgrid-as-a-service-market>
34. <https://www.veckta.com/2020/12/03/microgrid-financing-with-energy-as-a-service/>
35. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/microgrid-as-a-service-market-30653958.html>
36. <https://www.verifiedmarketresearch.com/ask-for-discount/?rid=41394>

Надійшла 01.12.2021

Received 01.12.2021

# МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSIS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

---

УДК 681.5

DOI 10.20535/1813-5420.4.2021.257249

В.О. Коровушкін, студент, ORCID 0000-0002-7571-7124

В.Г. Дубовик, ст. викл., ORCID 0000-0001-8884-8222

А.В. Босак, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-0545-9980

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ОДНООСЬОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

*Розвиток «зеленої» енергетики України передбачає збільшення кількості електроенергії, згенерованої за допомогою фотоелектричних модулів (ФЕМ). При цьому ФЕМ мають недоліки, пов'язані з непостійністю видобутку електроенергії внаслідок добового та річного руху Сонця та затемнення модулів. Задля підтримання рівномірної генерації протягом дня та року, замість встановлення надлишкової потужності, ФЕМ можливе застосування системи їх орієнтування перпендикулярно сонячним променям.*

*В статті було наведено та проаналізовано залежності потрапляння сонячної енергії на довільно зорієнтовану площину та побудовано графіки зміни її надходження протягом доби та року. Розглянуто три випадки монтажу сонячних панелей: на двохосьовій системі стеження за Сонцем, на системі стеження за Сонцем за висотою та на системі стеження за Сонцем за азимутом. Наведено алгоритми методу розрахунку параметрів системи одноосьової та двохосьової орієнтації фотоелектричного модуля під час встановлення в м. Києві. Зроблено оцінку рівнів енергоефективності використання сонячної енергії для розглянутих систем фотоелектричних перетворювачів.*

**Ключові слова:** сонячна енергія, сонячні батареї, трекер, система стеження за сонцем, енергоефективність.

**Вступ.** На сьогодні існує світова тенденція до зниження частки вуглецевої генерації електроенергії із збільшенням низьковуглецевого видобутку, зокрема з застосуванням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Так, у 2019 році на низьковуглецеві джерела енергії припадало 37% від загальної кількості світової генерації, з них на фотоелектричні системи (ФЕС) – 27% [1].

При використанні ФЕС мають свої переваги: відносна легкість проектування та монтажу, відсутність рухомих елементів, а отже і висока механічна міцність. Окрім того, ФЕС є екологічно чистою технологією, адже 90% конструктивних матеріалів фотоелектричних модулів можуть бути перероблені та використані повторно [2]. В середньому, щорічно на територію України надходить близько 750 млрд ГВт•год сонячної енергії, що значно перевищує сучасні потреби країни. Виходячи з цього, потенціал ФЕС є достатньо високим для широкого його використання. Це підтверджується і прогнозованим балансом електроенергії об'єднаної електроенергетичної системи України на 2021 рік, згідно з яким на ВДЕ припадає 8,69% згенерованої електроенергії, з яких 51,5% – на ФЕС [3].

У ФЕС є свої недоліки, зокрема, низький, відносно інших джерел енергії ККД: для найбільш поширених, кремнієвих ФЕМ він складає 21 – 27%; для багатошарових – до 47% при стандартних тестових умовах (STC) [4]. Варто зазначити, що багатошарові ФЕМ майже ніколи не використовуються в наземних ФЕС через їх високу вартість та невелику питому вагу в світовому виробництві ФЕМ.

**Мета та завдання:** підвищення рівнів енергоефективності використання сонячних батарей шляхом оцінки значень надходження сонячної енергії на похилу площину плоских фотоелектричних модулів в



залежності від системи позиціонування; оцінка параметрів одноосової системи наведення сонячних панелей та порівняння її ефективності зі двохосовою.

**Аналіз досліджень і публікацій** [5-9] показав, що особливістю систем з застосуванням ФЕС є непостійність згенерованої електроенергії в часі, спричинена частковим чи повним затемненням сонячної батареї (СБ), що викликане скупченням в атмосфері водяної пари з мілкими твердими частинками і добовим ходом Сонця по небесній сфері. Для забезпечення необхідної потужності джерел енергії з застосуванням сонячних технологій встановлюють надлишкову потужність СБ, збільшуючи площу сприймання енергії Сонця, при цьому монтують їх під таким кутом, щоб середньодобова кількість сонячної енергії, яка надходить на поверхню ФЕМ була максимальною. Замість цього, можуть застосовуватись системи наведення СБ, за допомогою яких кут падіння сонячних променів відносно поверхні СБ залишається перпендикулярним.

#### **Матеріал і результати досліджень**

Потужність, що виробляє ФЕМ прямо пропорційна до кількості світла, що потрапляє на його поверхню:

$$W_{\text{уст}} = W_{\text{инс}} \cdot k \cdot \cos(\theta), \quad (1)$$

де  $W_{\text{инс}}$  – потужність сонячних променів, що падають на панель;  $k$  – коефіцієнт перетворення світлової енергії в електричну, залежить від конструктивних матеріалів та внутрішньої структури модуля;  $\theta$  – кут між напрямом випромінювання до довільно зорієнтованої поверхні та нормаллю до цієї поверхні.

Ескіз надходження сонячної енергії на ФЕМ подано на рис. 1:

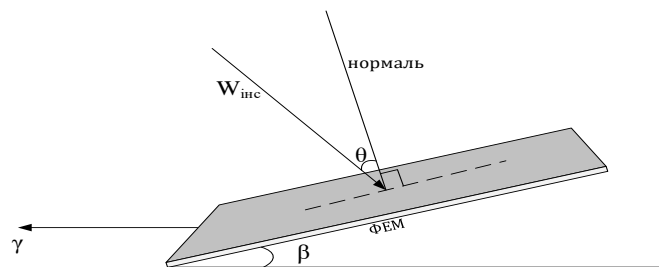


Рисунок 1 – Схема параметрів для оцінки значення надходження сонячної енергії на довільно зорієнтований ФЕМ

Розглянемо три випадки встановлення ФЕМ:

- а) ФЕМ, встановлені на двохосовій системі стеження за Сонцем;
- б) ФЕМ, встановлені на системі стеження за Сонцем за висотою;
- в) ФЕМ, встановлені на системі стеження за Сонцем за азимутом,

та порівняємо кількість сонячної енергії, що надходить при кожному типі монтажу ФЕМ.

За рис.1 кут падіння сонячних променів  $\cos(\theta)$  на довільно зорієнтовану поверхню можна зйти з формули (2) [10]:

$$\cos(\theta) = \sin(\delta)\sin(\varphi)\cos(\beta) - \sin(\delta)\cos(\varphi)\sin(\beta)\sin(\gamma) + \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\beta)\cos(\tau) + \cos(\delta)\sin(\varphi)\sin(\beta)\cos(\gamma)\cos(\tau) + \cos(\delta)\sin(\beta)\sin(\gamma)\sin(\tau), \quad (2)$$

де  $\beta$  – кут нахилу поверхні ФЕМ до горизонтальної площини, град;  $\delta$  – схилення Сонця, град;  $\varphi$  – географічна широта місцевості, де встановлений ФЕМ;  $\tau$  – годинний кут Сонця;  $\gamma$  – азимутальний кут площини відносно півдня, град.

Для розрахунку кутів  $\beta$ ,  $\delta$  та  $\tau$  задаємося наступними вхідними величинами:

- 1) *координати розташування сонячної батареї*: місто Київ із широтою  $\varphi = 50.45^\circ$ ;
- 2) *день року*: розрахунок проводиться для 21.06, 21.12, 21.03 та 23.09 – днів літнього та зимового сонцестояння і весняного та осіннього рівнодення 2021 року відповідно;
- 3) *година дня*: дані обчислюються на кожну годину дня;

Для зазначених днів схилення Сонця  $\delta$  визначимо за допомогою спрощеної формули Купера (3). Занесемо отримані дані в табл. 1.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right)^\circ, \quad (3)$$

де  $n$  – порядковий номер дня року ( $n=1$  відповідає 1-му січня).

Таблиця 1 – Значення схилення Сонця для обраних днів року

	21.06	23.09	21.12	21.03
<i>n</i>	172	266	355	80
<i>δ</i>	23,45	0	-23,45	0

Оскільки середній час *t* на даному меридіані в будь-який момент чисельно дорівнює годинному куту  $\tau$  вираженого в часовій мірі плюс 12<sup>h</sup> [11], тобто (4)

$$\tau = t + 12h, \quad (4)$$

при цьому годинний кут виражається в годинній мірі з урахуванням 24 год = 360°, відповідно 1 год = 15°. Його розрахунок виконаємо за формулою (5) з кроком в 1 годину:

$$\tau = 15^\circ(12 - t). \quad (5)$$

Варто зазначити, що, оскільки будь-який ФЕМ покривається шаром захисного скла, слід враховувати пропускну та поглинальну здатність цього шару. Візьмо для розрахунків усереднені значення: один шар скла; коефіцієнт заломлення  $n_3 = 1,5$ ; товщина  $L = 3,2 \text{ мм} = 0,32 \text{ см}$ ; показник поглинання  $k = 0,04 \text{ см}^{-1}$  – скло чисте.

Відбивальна здатність прозорих матеріалів у випадку перпендикулярного падіння сонячних променів визначається за формулою (6):

$$\rho = [(n_3 - 1)/(n_3 + 1)]^2. \quad (6)$$

Визначивши кут падіння  $\theta$  (рис. 3) визначимо кут заломлення  $\theta_3$  за формулою (7):

$$n/n_3 = \sin(\theta_3)/\sin(\theta). \quad (7)$$

Враховуючи коефіцієнт заломлення повітря  $n = 1$ , отримаємо:

$$\theta_3 = \arcsin\left(\frac{\sin(\theta)}{1,5}\right).$$

Зрозуміло, що коли кут  $\theta$  перевищує значення 90°, сонячні промені не падають на поверхню ФЕМ.

У випадку, коли промені падають під кутом  $\theta$ , маючи значення кута заломлення  $\theta_3$ , відбивальну здатність можна обчислити за формулою (8):

$$\rho = \left(\frac{1}{2}\right) \left[ \frac{\sin^2(\theta_3 - \theta)}{\sin^2(\theta_3 + \theta)} + \frac{\text{tg}^2(\theta_3 - \theta)}{\text{tg}^2(\theta_3 + \theta)} \right]. \quad (8)$$

Пропускна здатність одношарового захисного скла  $\tau_{\text{пр}}$  знаходимо з формули (9):

$$\tau_{\text{пр}} = (1 - \rho)/(1 + \rho). \quad (9)$$

Поглиняльну здатність шару захисного скла визначимо з закону Бугера-Ламберта-Бера (10):

$$\tau_{\text{пог}} = e^{-\frac{kL}{\cos(\theta_3)}}. \quad (10)$$

Розглянемо ФЕМ, встановлені на двохосовій системі стеження за Сонцем. Оскільки точність наведення складає у більшості випадків 2°, для розрахунків приймаємо найгірший випадок позиціонування,  $\theta_{\text{поз}} = 2^\circ$ . За формулою (7) визначимо  $\theta_{\text{поз}}$ .

$$\theta_{\text{поз}} = \arcsin\left(\frac{\sin(\theta)}{1,5}\right) = \arcsin\left(\frac{0,035}{1,5}\right) = 1,32^\circ$$

Підставивши отримане значення в формулу (8), отримаємо:

$$\rho = \left(\frac{1}{2}\right) \left[ \frac{\sin^2(\theta_{\text{п.з.}} - \theta_{\text{поз.}})}{\sin^2(\theta_{\text{п.з.}} + \theta_{\text{поз.}})} + \frac{\text{tg}^2(\theta_{\text{п.з.}} - \theta_{\text{поз.}})}{\text{tg}^2(\theta_{\text{п.з.}} + \theta_{\text{поз.}})} \right] = \left(\frac{1}{2}\right) \left[ \frac{\sin^2(-0,68^\circ)}{\sin^2(3,32^\circ)} + \frac{\text{tg}^2(-0,68^\circ)}{\text{tg}^2(3,32^\circ)} \right] = 0,043$$

Наступним кроком знаходимо пропускну та поглиняльну здатності захисного скла:  $\tau_{\text{пр}} = 0,918$ ;  $\tau_{\text{пог}} = 0,987$ .

Питому потужність повної сонячної радіації визначимо як суму потужностей прямої та розсіяної радіації, нехтуючи, для зручності, значеннями альbedo атмосфери та земної поверхні, оскільки їх вплив в умовах даного дослідження не суттєвий.

Для визначення сонячного випромінювання (СВ), що падає на поверхню перпендикулярну випромінюванню скористаймося формулами (11,12) [12]:

- для прямого СВ:

$$S_{\text{орт}} = 1085 - 194,1 \cdot \sin^{-1}(h) + 11,36 \cdot \sin^{-2}(h); \quad (11)$$

- для дифузного СВ:

$$D_{\text{орт}} = 137,1 - 28,82 \cdot \sin^{-1}(h) + 2,27 \cdot \sin^{-2}(h); \quad (12)$$

де  $\sin^{-1}(h)$  – оптична маса атмосфери без урахування кривизни Землі,  $h$  – висота Сонця.

$$\sin(h) = \sin(\delta)\sin(\varphi) + \cos(\varphi)\sin(\delta)\cos(\tau), \quad (13)$$

де від'ємному куту  $h$  відповідає випадок, коли сонячні промені не падають на обрану поверхню.

Визначивши значення прямої та розсіяної радіації, враховуючи пропускну та поглинальну здатність захисного скла  $\tau_{np} = 0,918$  та  $\tau_{noz} = 0,987$  відповідно; кут падіння сонячних променів  $\theta_{noz} = 2^\circ$ ; питому потужність сонячної енергії, що потрапляє безпосередньо на поверхню фотоперетворювача, встановленого на систему наведення, визначимо за формулою (14):

$$Q_{op} = (S_{орт} \cdot \cos(\theta) + D_{орт}) \cdot \tau_{пр} \cdot \tau_{пог}; \quad (14)$$

Результати розрахунку кількості енергії, що поступає безпосередньо на поверхню фотоперетворювача, встановленого на пристрій наведення на сонце, для обраних днів представлені на рис. 2.

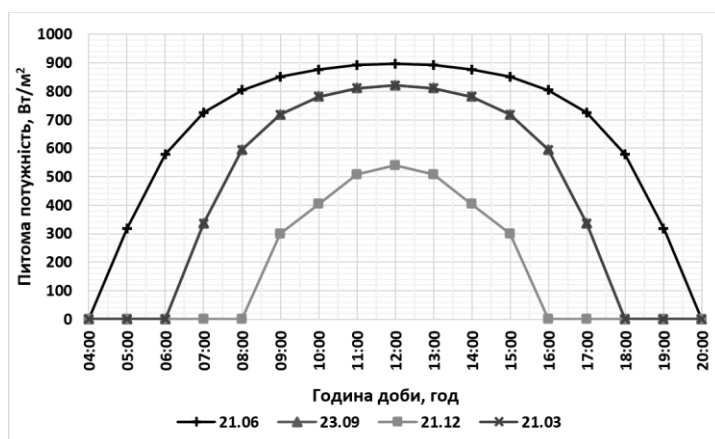


Рисунок 2 – Графіки зміни питомої потужності енергії на поверхні фотоперетворювача, який встановлено на двохосьовий пристрій наведення на Сонце

Розглянемо другий випадок, ФЕМ, встановлені на системі стеження за Сонцем за висотою. Кут  $\gamma$  знаходимо за допомогою аналем, що були змодельовані за допомогою програмного забезпечення "Гелиограф 3.6. Дані одержані для 2021 року, м. Києва з координатами  $57^\circ 27'$  п.ш.  $30^\circ 31'$  с.д. з інтервалом в один день. Отримані аналеми зображені на рис.3.

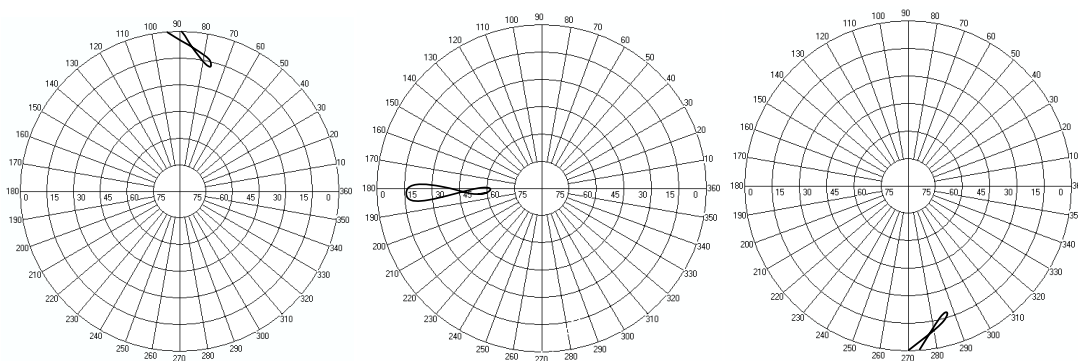


Рисунок 3:

- а – Аналеми положення Сонця для м. Києва, отримані для 6:00 год. (азимуті підписані по колу, висоти – по горизонталі);
- б – Аналеми положення Сонця для м. Києва, отримані для 12:00 год. (азимуті підписані по колу, висоти – по горизонталі);
- в – Аналеми положення Сонця для м. Києва, отримані для 18:00 год. (азимуті підписані по колу, висоти – по горизонталі).

З рис. 3 видно, що найбільш доцільним буде встановлення ФЕМ під кутом  $\gamma = 0^\circ$ , відповідно  $\sin(\gamma) = 0$ ,  $\cos(\gamma) = 1$ . Будемо враховувати, що система наведення працюватиме з похибкою у  $2^\circ$ , тоді  $\cos(\beta) \approx 1$ ;  $\sin(\beta) \approx 0,03$ .

Далі проводимо розрахунки відповідно  $\theta_{поз}^{вис}$  – кута  $\theta$  після заломлення, поглинальну та пропускну  $\tau_{пог}^{вис}$  та  $\tau_{пр}^{вис}$  здатність захисного шару скла. Підставивши відповідні значення у формулу (14) знайдемо

кількість енергії, що поступає безпосередньо на поверхню фотоперетворювача, встановленого на одноосьовий пристрій наведення на Сонце за висотою. Графічне відображення отриманих результатів наведено на рис. 4.

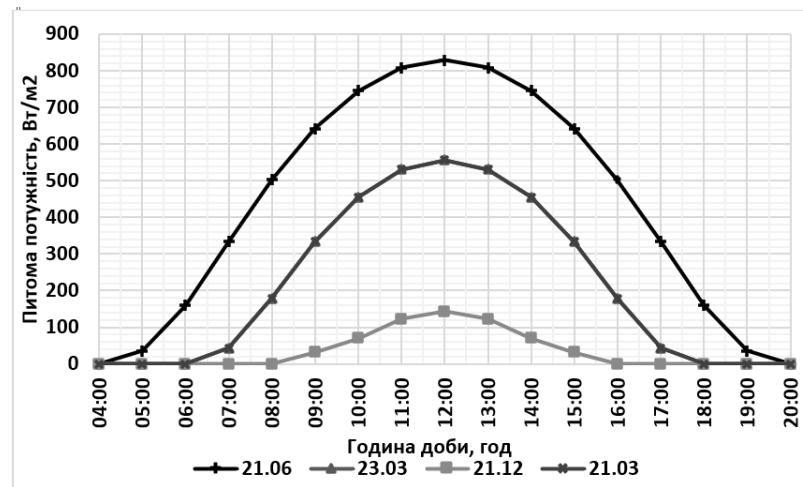


Рисунок 4 – Графіки зміни питомої потужності енергії на поверхні фотоперетворювача, який встановлено на одноосьовий пристрій наведення на Сонце за висотою

Розглянемо ФЕМ, встановлені на системі стеження за Сонцем за азимутом. Для цього задаємося кутом  $\beta = 30^\circ$ , тоді  $\cos(\beta) \approx 0,87$ ;  $\sin(\beta) = 0,5$ . Будемо враховувати, що система наведення працюватиме з похибкою у  $2^\circ$ , відповідно  $\sin(\gamma) = 0,03$ ;  $\cos(\gamma) \approx 1$ .

Подібно до попереднього випадку розрахуємо кількість енергії, що поступає безпосередньо на поверхню фотоперетворювача, встановленого на одноосьовий пристрій наведення на Сонце за азимутом. Графічне відображення отриманих результатів наведено на рис. 5.

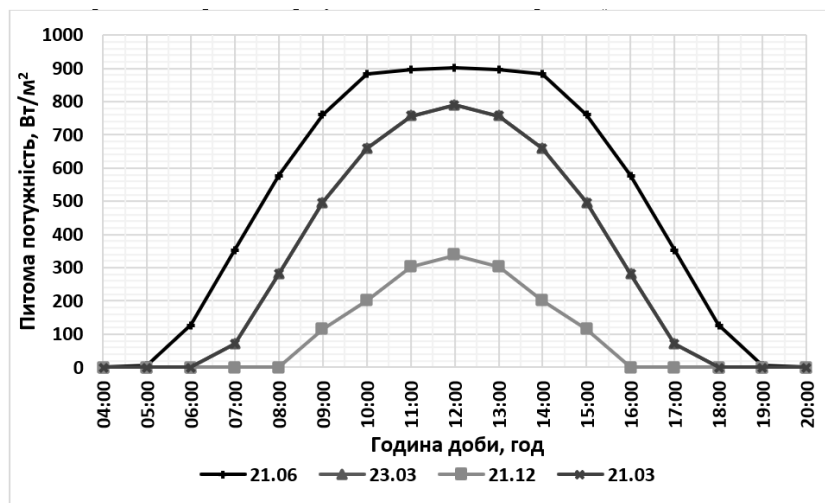


Рисунок 5 – Графік зміни питомої потужності енергії, на поверхні фотоперетворювача, який встановлено на одноосьовий пристрій наведення на Сонце за азимутом, для обраних днів

Як видно з рис. 2, 4, 5 - значення сонячної енергії, що надходить 21.03 і 23.09 – у дні весняного та осіннього рівнодення відповідно – однакова.

#### Результати досліджень

ККД кожної з розглянутих одноосьових систем відносно двохосьової визначимо за формулою (15):

$$\eta = \frac{Q_{одн\Sigma}}{Q_{дв\Sigma}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

де  $Q_{одн\Sigma}$  – сумарна кількість добової енергії, що потрапляє на зорієнтовану за однією з координат поверхню,  $Q_{дв\Sigma}$  – сумарна кількість добової енергії, що потрапляє на зорієнтовану за двома координатами поверхню.

$Q_{однΣ}$  та  $Q_{двΣ}$  знайдемо за допомогою методу трапецій, де кількість  $i$  вузлів відповідатиме кількості точок, взятих для побудови кожного з графіків, тобто  $i = 16$ . Результати обчислень наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення ККД систем наведення на Сонце за азимутом та висотою відносно двохосової системи

Тип системи	21.06.21	23.09.21	21.12.21	21.03.21
за азимутом	73,85%	72,85%	53,08%	72,85%
за висотою	66,26%	49,87%	19,93%	49,87%

Як видно з табл. 2, на фотоелектричну панель, встановлену на систему наведення за азимутом потрапляє приблизно на 8-33% сонячної енергії більше, ніж на таку, що встановлено на систему наведення за висотою; при цьому енергетичні втрати відносно двохосової системи стеження складають приблизно 26-80% в залежності від пори року.

В рамках даної роботи визначити економічну доцільність встановлення кожної із систем відносно інших неможливо, адже значення власного споживання енергії системою є непостійним і, як і загальна вартість установки, залежить від конфігурації самої системи. Це питання потребує окремого дослідження.

**Висновки.** У роботі проаналізовано залежності для значень сонячної енергії, яка потрапляє на довільно зорієнтовану площину протягом року під час встановлення в м. Києві. З'ясовано, що у порівнянні з двохосовою системою наведення на фотоелектричну панель, встановлену на систему наведення за азимутом потрапляє приблизно 53-74 відсотків сонячної енергії, а на таку, що встановлено на систему наведення за висотою – 20-66. Тобто система наведення сонячних панелей на Сонце за азимутом є на 8-33 відсотків ефективнішою. Це визначено за рахунок використання алгоритму методу розрахунку та вибору бажаної системи одноосової орієнтації фотоелектричного модуля.

#### Список використаної літератури

1. IEA (2020), "Global Energy Review 2019", IEA, Paris URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019> (дата звернення 22.08.2021).
2. Weckend S. End-Of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels / S. Weckend, A. Wade, G. Heath., 2016. – 100 с.
3. Прогнозний баланс електроенергії об'єднаної електроенергетичної системи України на 2021 року станом на 04.11.2020 [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art\\_id=245487361&cat\\_id=245183250](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245487361&cat_id=245183250)
4. Best Research-Cell Efficiency Chart [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
5. Singh G. K. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review / Girish Kumar Singh. // Energy. – 2013. – №53. – С. 1–13.
6. Comparison of efficiencies of solar tracker systems with static panels single-axis tracking system and dual-axis tracking system with fixed mount / R. Dhanabal, V. Bharathi, R. Ranjitha, A. Ponni. // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT). – 2013. – №2. – С. 425–430.
7. Tansu F. Efficiency Analysis Of The Solar Tracking PV Systems In Eskişehir Region / F. Tansu, B. F. Ümmühan. // Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering. – 2017. – №18. – С. 209 – 217.
8. Lee J. F. Performance of Dual-Axis Solar Tracker versus Static Solar System by Segmented Clearness Index in Malaysia / J. F. Lee, N. A. Rahim, Y. A. Al-Turki. // International Journal of Photoenergy. – 2013. – №2013. – С. 1–13.
9. Siva B. R. An Intellectual Dual Axis Efficient Solar Tracking System by Using IoT Integrated Control / B. R. Siva, B. Rajkiran, P. Sharma. // SSRN Electronic Journal. – 2020.
10. Староконь И. В. Методика оценки воздействия солнечного излучения на температурное состояние морских стационарных платформ / И. В. Староконь. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №2.
11. Курс общей астрономии / П. И. Бакулин, Э. В. Кононович, В. И. Мороз. — М.: Наука, 1976.
12. Дудюк Д. Л. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навч. посіб / Д. Л. Дудюк, С. С. Мазепа, Я. М. Гнатишин. – Львів: "Магнолія 2006", 2008. – 188 с.

V. Korovushkin, student, ORCID 0000-0002-7571-7124  
V. Dubovyk, Senior Lecturer, ORCID 0000-0001-8884-8222  
A. Bosak, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-0545-9980  
National Technical University of Ukraine  
"Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"

#### ESTIMATED PARAMETERS IN THE SYSTEMS OF A SINGLE-AXIS ORIENTACIS OF A PHOTOELECTRIC MODULE

*The development of "green" energy in Ukraine involves an increasing of the amount of electricity generated by photovoltaic modules (PMs). However, PMs have disadvantages associated with the inconsistency of electric generation in time due to the diurnal and annual motion of the Sun and to the shading of the modules. In order to maintain steady generation during the day and the year, there are two ways to minimize the impact of these factors. First one is to install an excess capacity which means higher cost of the solar plant and using an additional area. Second one is to apply a system of orientation PMs perpendicular to the sun's rays.*

*In the article three cases of solar panels installation are considered: using a two-axis tracking system, using a height tracking system and an azimuth tracking system. There was given the method and algorithms of calculation and analysis the parameters of the uniaxial and biaxial tracking system when installed in Kyiv. The algorithm involves calculation the coordinates of Sun in any moment of time for the considered location, pass-through and absorptive capacity of the protective glass, estimation the amount of the direct and diffuse solar radiation and their impact on the total radiation on the surface of the photoconverter. There was made an estimation of energy usage efficiency levels for the considered systems using the proposed algorithm.*

**Keywords:** solar energy, solar panels, tracker, solar tracking system, energy efficiency.

#### References

1. IEA (2020), "Global Energy Review 2019", IEA, Paris URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019> (Accessed 22.08.2021).
2. Weckend S. End-Of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels / S. Weckend, A. Wade, G. Heath., 2016. – 100 p.
3. Forecast balance of electric power of the United electric power system of Ukraine for 2021 URL: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art\\_id=245487361&cat\\_id=245183250](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245487361&cat_id=245183250) (Accessed 22.08.2021).
4. Best Research-Cell Efficiency Chart URL: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (Accessed 22.08.2021).
5. Singh G. K. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. Energy. 2013. Vol. 53. Pp. 1–13.
6. Dhanabal R., Bharathi V., Ranjitha R., Ponni A. Comparison of efficiencies of solar tracker systems with static panel single-axis tracking system and dual-axis tracking system with fixed mount. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT). 2013. Vol. 2. Pp. 425–430.
7. Tansu F., Ümmühan B. F. Efficiency Analysis Of The Solar Tracking PV Systems In Eskisehir. Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering. 2017. Vol. 18. Pp. 209 – 217.
8. Lee J. F., Rahim N. A., Al-Turki Y. A. Performance of Dual-Axis Solar Tracker versus Static Solar System by Segmented Clearness Index in Malaysia. International Journal of Photoenergy. 2013. Vol. 2013. Pp. 1–13.
9. Siva B. R., Rajkiran B., Sharma P. An Intellectual Dual Axis Efficient Solar Tracking System by Using IoT Integrated Control. SSRN Electronic Journal. 2020.
10. Starokon I. V. Methodology for assessing the effects of solar radiation on the temperature of sea-based stationary platforms. Modern issues of science and education. 2014. Vol. 2. (Rus)
11. Bakulin P. I., Kononovich E. V., Moroz V. I. General astronomy course. Science. 1976. (Rus)
12. Duduk D. L., Mazepa S. S., Gnatishin J. M. Non-traditional Energy: The Basics of Theory and Exercises. Magnolia 2006. 2008. (Ukr)

Надійшла 21.11.2021  
Received 21.11.2021

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ «ПРИСТРІЙ ПЛАВНОГО ПУСКУ – АСИНХРОННИЙ ДВИГУН» В РЕЖИМІ РОБОТИ ІЗ ЗНИЖЕНОЮ ШВИДКІСТЮ

*В статті проведено дослідження роботи системи «пристрій плавного пуску – асинхронний двигун» із зниженою швидкістю. Відносна дешевизна тиристорних пристроїв пуску асинхронних двигунів у порівнянні з перетворювачами частоти приводить їх все частішого встановлення на виробництві. Проте реалізація деяких режимів роботи, таких як обертання із пониженою тестовою швидкістю, не завжди може бути здійснена для певної технологічної установки. Особливо це стосується збільшення амплітуди коливань швидкості при збільшенні крутного моменту двигуна. В роботі приведені налаштування серійного пристрою плавного пуску SSW900 від компанії WEG, що впливають на роботу асинхронного двигуна із зниженою швидкістю. Для дослідження впливу в роботі складена модель у програмному середовищі MATLAB із використанням додатку Simulink. При цьому визначена відповідність параметрів функціональних моделей налаштуванням існуючого пристрою плавного пуску. Зниження швидкості обертання двигуна забезпечується за рахунок зменшення частоти і, відповідно, амплітуди напруги, що прикладається. Для зменшення несучої частоти відносно частоти живлення використовується режим пропуску певних напівхвиль напруги. В MATLAB це реалізується завдяки використанню блоків Pulse\_generator, які пропускають імпульси керування лише в дозволені проміжки часу. Шляхом зміни кута відпирання тиристорів були отримані графіки перехідних процесів за швидкістю та визначені амплітуди коливань при вентиляторному характері навантаження. Крім того, були отримані результати дослідження системи на фізичній моделі та здійснений порівняльний аналіз результатів. Так, формування зниженої частоти, запропоноване при розробці математичної моделі в MATLAB забезпечує зниження швидкості роботи двигуна до 1/7 від номінальної. Амплітуда коливань швидкості при завданні максимального крутного моменту сягає значень, що значно обмежують можливість використання даного режиму для тривалої роботи обладнання, що підтверджується також експериментальними дослідженнями.*

**Ключові слова:** пристрій плавного пуску, асинхронний двигун, швидкість тестування, кут відпирання, математичне моделювання

**Вступ.** В сучасному виробництві для регулювання швидкості асинхронних двигунів найчастіше використовуються перетворювачі частоти. Вони забезпечують досить широкий діапазон регулювання, практично незмінний крутний момент двигуна, високу жорсткість статичних характеристик. В той же час, коли швидкість регулювати не потрібно, а лише здійснювати плавний розгін та сповільнення двигуна, на виробництві досить успішно використовуються пристрої плавного пуску. Фактично, вони є тиристорними регуляторами напруги, що зазвичай мають два сталі значення напруги на виході – напруга повна або відсутня. Зміна напруги від одного сталого значення до іншого може здійснюватись за різними законами, відповідно до характеру механізму та мережі живлення [1,2]. Так, наприклад, при обмеженні потужності джерела живлення використовується функція обмеження струму статора і тиристори відкриваються в залежності від сигналів замкненої системи керування [3].

Крім спеціалізованих функцій пуску та зупинки багатфункціональні пристрої плавного пуску можуть реалізувати, так звані «сервісні» функції. До них відносяться прогрів обмоток двигуна, реалізація реверсу, гальмування постійним та пульсуючим струмом, а також робота із зниженою швидкістю (JOG - режим) [4]. В останньому режимі роботи двигун обертається із суттєво нижчою швидкістю та розвиває до 75% крутного моменту. Він використовується для тестування працездатності обладнання та двигуна після ремонту, переміщення механізму у потрібне положення тощо.

Недоліком роботи двигуна в цьому режимі є суттєвий перегрів обмоток внаслідок погіршення обдування його поверхні та суттєві коливання крутного моменту і, відповідно, швидкості двигуна. Якщо перегрів обмоток двигуна можна уникнути шляхом встановлення часового обмеження на роботу в цьому режимі, то коливання швидкості можуть привести до поломки виконавчого механізму та обладнання в цілому. Цей факт необхідно враховувати інженерам при наладці обладнання для роботи із пониженою швидкістю.

В пристроях плавного пуску одного із відомих виробників двигунів та пристроїв плавного пуску WEG для налаштування режиму виведено лише один параметр C7.3.2 JOG і значення задається в діапазоні 10..100%, як можна побачити на рис.1. Допустимий час роботи при цьому розраховується відповідно до заданих параметрів двигуна і не може коригуватися напряму [5].

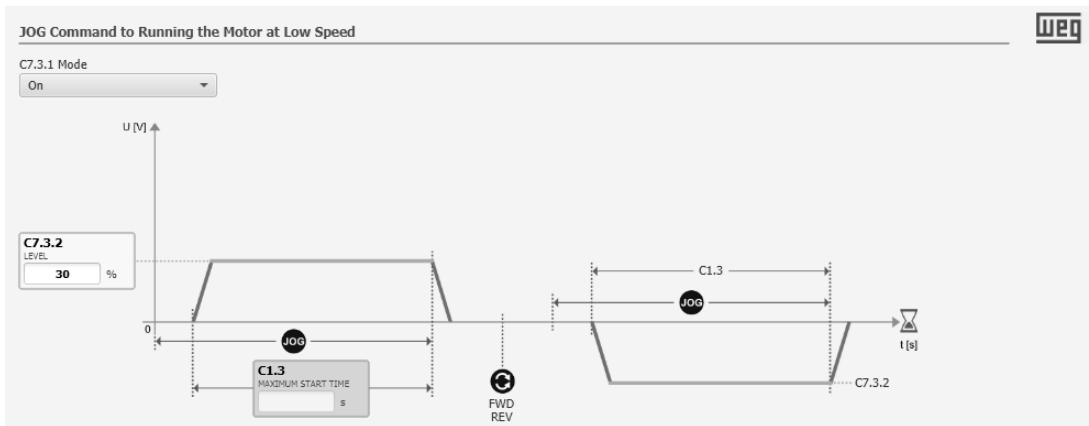


Рисунок 1 - Параметри налаштування режиму JOG в програмному забезпеченні WPS для пристрою плавного пуску SSW900 WEG.

Рекомендацій щодо встановлення значення JOG, а також якихось пояснень що відповідає 100% значення виробник не дає, що суттєво ускладнює налаштування системи інженерно – технічним персоналом. Одним із способів врахування можливих коливань та їх впливу на механічну частину обладнання є дослідження роботи асинхронного двигуна методом цифрового моделювання. Амплітуда коливань, що отримані в результаті моделювання двигуна можуть бути в подальшому використані для аналізу можливості реалізації цього режиму для певного технологічного обладнання взагалі. Тому отримання моделі, за допомогою якої інженери зможуть враховувати можливі коливання двигуна є актуальною проблемою.

**Мета та завдання.** Метою даної статті є розробка математичної моделі системи «асинхронний двигун – пристрій плавного пуску» з реалізацією функції роботи на пониженой швидкості.

**Матеріал і результати досліджень** Внаслідок широкого розповсюдження та впізнаваності доцільно для математичного моделювання використовувати програмне забезпечення MATLAB та його додатку Simulink [6]. Наповненість готових рішень та моделей дозволяє не розробляти модель «з нуля», а застосовувати базу з реалізацією необхідних окремих функцій. Аналіз пуску асинхронних двигунів від пристрою плавного пуску із лінійною зміною напруги саме із цим програмним забезпеченням в літературі досить популярний і дає можливість досліджувати одночасно декілька параметрів двигуна [7-9]. Ми використаємо модель електромеханічної системи, представлену [10], в якій забезпечується розімкнене та замкнене керування напругою при вентиляторному характері навантаження. Зовнішній вигляд моделі представлений на рис.2.

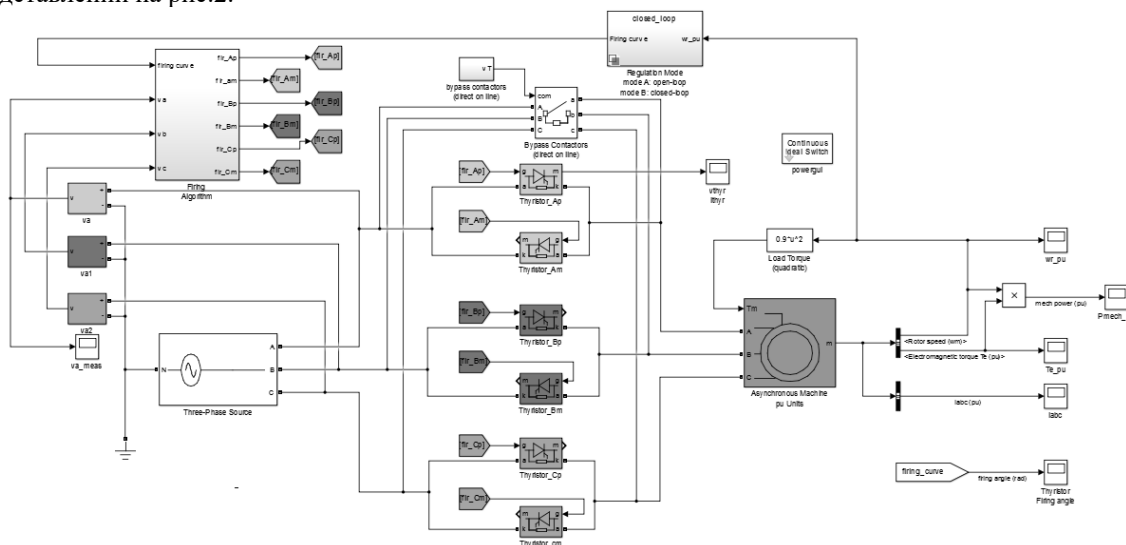


Рисунок 2. Вихідна схема системи «асинхронний двигун – пристрій плавного пуску»



Вибір способу керування, а також спосіб зміни кута відпирання тиристорів реалізується в блоці Regulation\_mode. Відповідне значення кута відпирання подається на блок Firing\_algorithm, де він перетворюється на імпульси для керування окремими тиристорами. Оскільки в режимі JOG плавний розгін або сповільнення двигуна не використовуються, на вхід firing\_curve будемо подавати фіксоване значення кута відпирання. Також потребує зміни і блок Firing\_algorithm для реалізації пониженої швидкості.

Оскільки тиристорний регулятор напруги не вміє змінювати частоту живлення двигуна шляхом зміни кута відпирання, то єдиним способом зниження частоти є пропуск декількох напівхвиль напруги мережі. При цьому послідовність фаз на обмотках двигуна повинна бути незмінною. Розглянемо роботу такої системи відповідно до графіків, представлених на рис.3. Для рівномірного обертання двигуна в додатному напрямку повинна виконуватись послідовність подачі напруг AB+, CA-, BC+,AB-,CA+,BC-. При цьому швидкість обертання відповідатиме частоті живлення 50Гц.

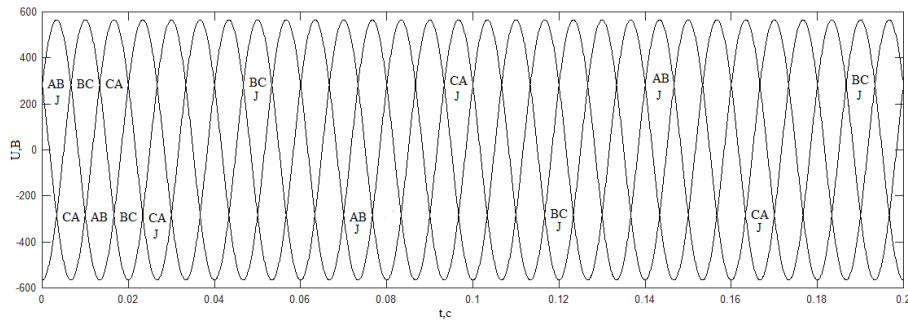


Рисунок 3. Графік послідовності подачі напруги на обмотки двигуна.

При необхідності зниження швидкості перша напівхвиля CA пропускається системою керування і проходить лише наступна від'ємна CA(J) починаючи з 0,02с. Далі блокуються перші дві додатні напівхвилі BC і проходить лише третя BC(J) починаючи з 0,04с. Алгоритм повторюється аналогічним чином, причому додатня напівхвиля AB пропускається системою керування на 0,14с, що свідчить про зменшення реальної частоти напруги в 7 разів.

Оскільки процес «вирізання» зайвих імпульсів має періодичний характер найпростіше його реалізувати за допомогою блоку Pulse\_generator. При цьому схема розподілення імпульсів з урахуванням впливу блокування генераторів імпульсів має вигляд, представлений на рис.3.

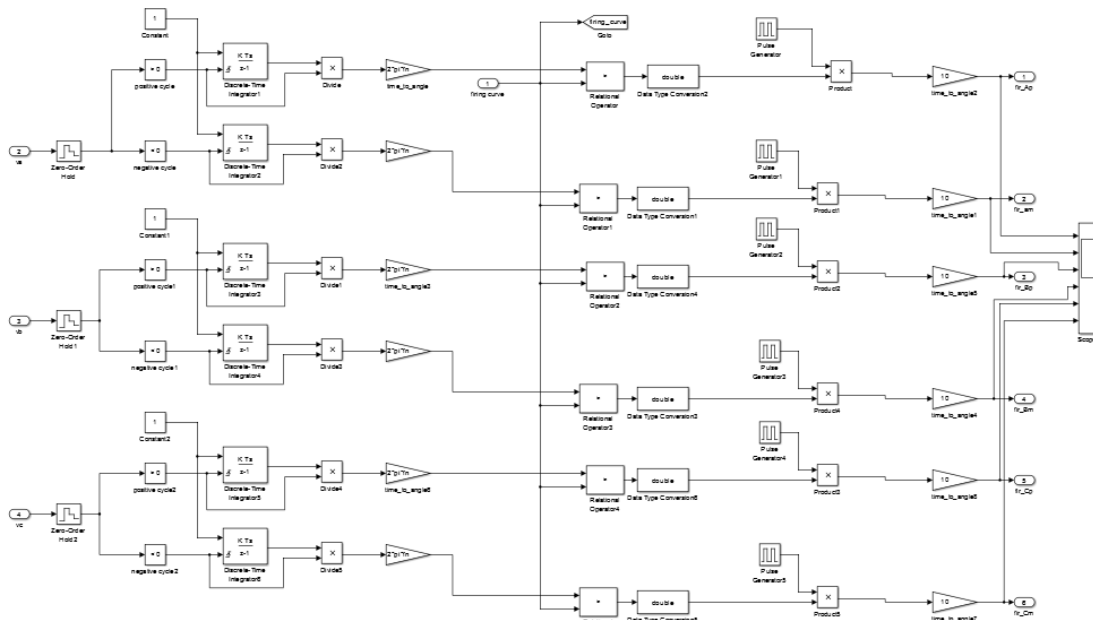


Рисунок 3. – Блок реалізації розподілення імпульсів Firing\_algorithm з «вирізанням» зайвих імпульсів керування

При зниженні частоти живлення двигуна для уникнення перегріву обмоток та для збереження крутного моменту необхідно відповідно керувати напругою. За умовою збереження постійного

співвідношення амплітуди і частоти напруги за законом Костенко крутний момент двигуна залишатиметься постійним. В той же час відповідно до [підручник] рівнодіюча амплітуда напруги повзучої швидкості не може перевищувати 22% від амплітуди напруги мережі при куті відпирання  $\alpha > \pi/3$ .

Вікно налаштування блоків Pulse\_generator представлено на рис.4. Період спрацьовування сигналу на передачу імпульсу встановлюємо відповідно новій несучій частоті, при цьому дозвіл діє лише 10% від цього періоду, тобто 0,014с. Для кожного з каналів керування тиристорів налаштуємо своє значення phase\_delay (для додатної напівхвилі фази А це значення складатиме 0.000).

Після налаштування блоків Pulse\_generator здійснювалось математичне моделювання системи «асинхронний двигун – пристрій плавного пуску» із зміною кута відпирання тиристорів  $\alpha$  від  $\pi/3$  до  $\pi$ . При цьому для різних значень  $\alpha$  були отримані графіки перехідних процесів за швидкістю, представлені на рис.5-7.

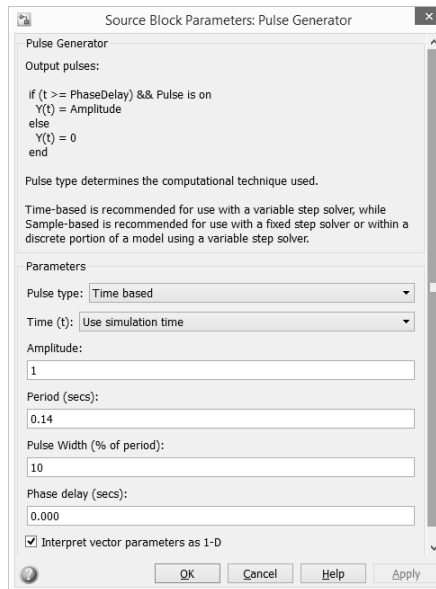


Рисунок 4 – Вікно налаштування параметрів спрацьовування каналу передачі імпульсів

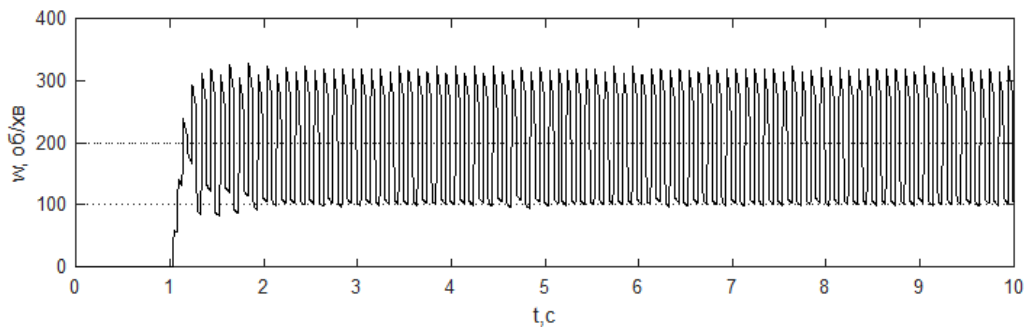


Рисунок 5 – Графік перехідного процесу за швидкістю при куті відпирання  $\alpha=1,2$ рад

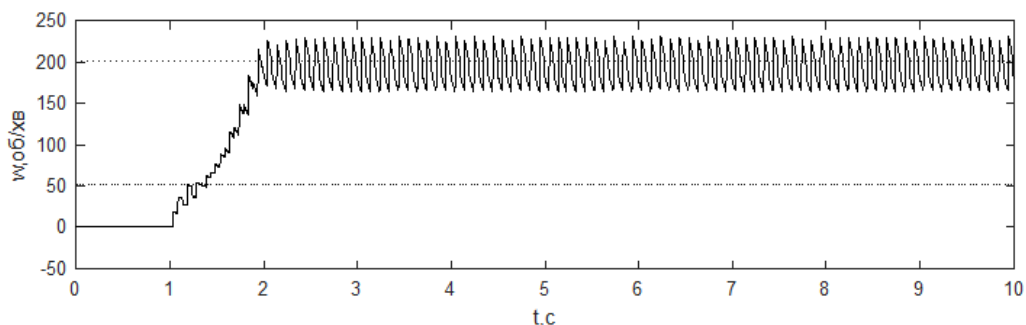


Рисунок 6 – Графік перехідного процесу за швидкістю при куті відпирання  $\alpha=1,5$ рад

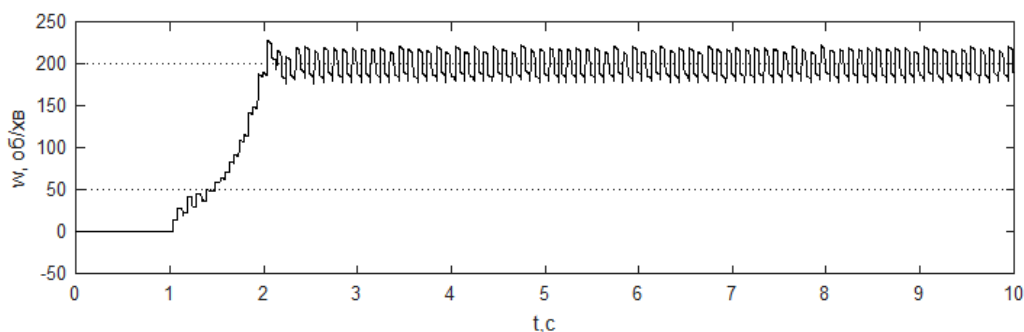


Рисунок 7 – Графік перехідного процесу за швидкістю при куті відпирання  $\alpha=1,7$  рад

Для перевірки результатів моделювання використовувалось також дослідження системи на фізичній моделі з використанням пристрою плавного пуску SSW900A0010T5E2 WEG та асинхронного двигуна MDEMAIG063-42C1C Lenze із встановленим інкрементальним енкодером на 2048 імп/оберт. Вихід енкодера був під'єднаний до частотного входу пристрою з функцією осцилографа і часом опитування сигналу з швидкістю 5мс. В якості навантаження використовувався вентилятор, встановлений безпосередньо на валу двигуна.

Змінюючи значення параметру C7.3.2 пристрою плавного пуску у відсотках були отримані графіки перехідного процесу за швидкістю. При встановленні потужності JOG=100% мають місце суттєві коливання швидкості, проте середнє значення складає близько 200 Об/хв., що становить 1/7 номінальної швидкості підключеного двигуна. Графік перехідного процесу за швидкістю представлений на рис.8.

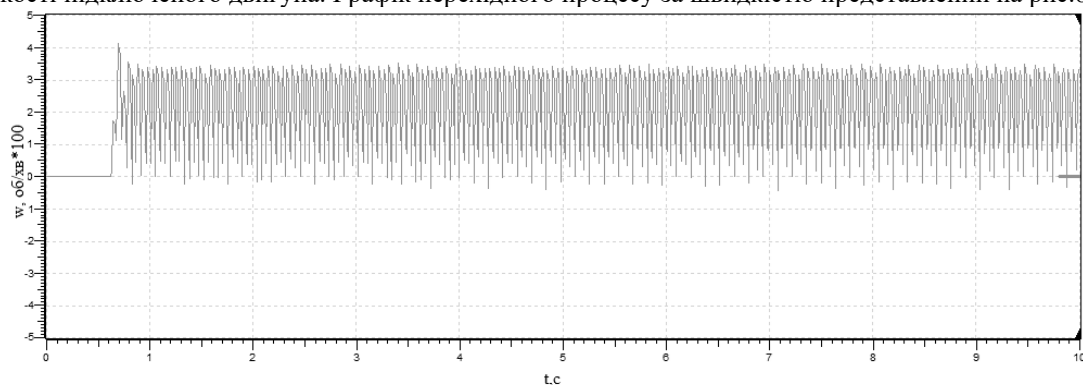


Рисунок 8 - Графік перехідного процесу за швидкістю при JOG=100%

При зменшенні значення JOG до 30% та 10% відповідно відбулося зниження пульсацій швидкості, проте швидкість руху залишилася незмінною, що можна побачити з графіків на рис.9 та рис.10 відповідно.

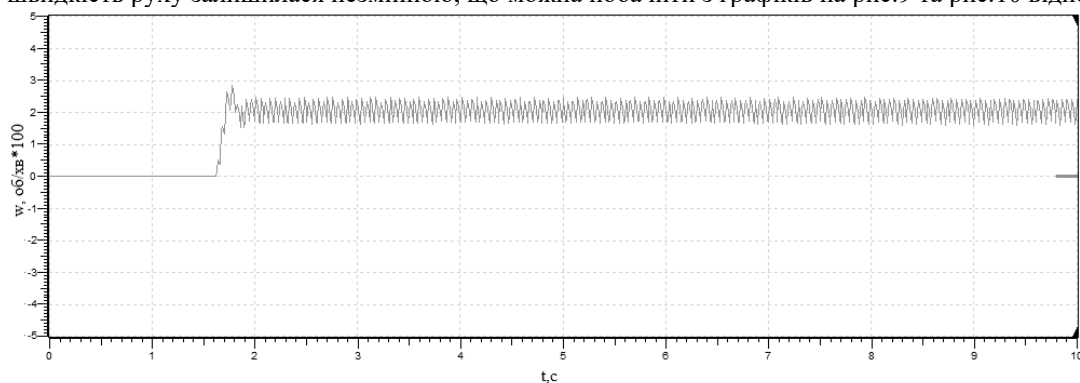


Рисунок 9 - Графік перехідного процесу за швидкістю при JOG=30%

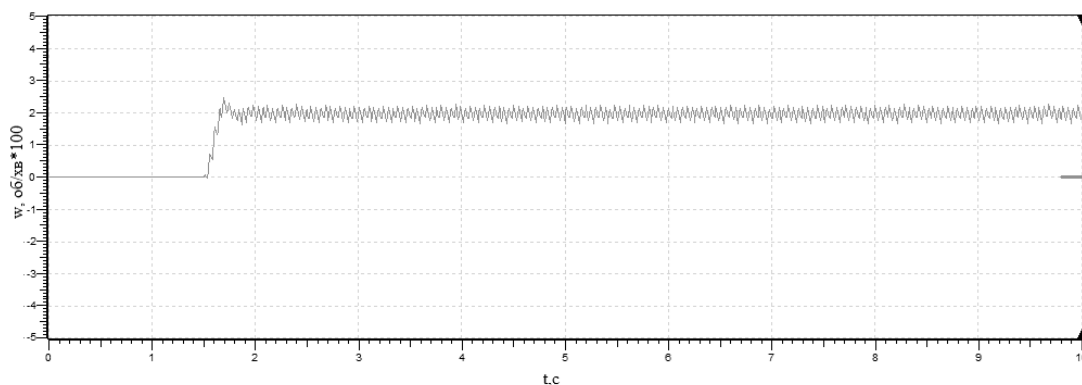


Рисунок 10 - Графік переходного процесу за швидкістю при JOG=10%

### Висновки

1. При зміні кута відпирання швидкість обертання двигуна не змінювалась, проте значно збільшувалась амплітуда її амплітуда коливань і складала до 50% від заданої швидкості.
2. Встановлення значення JOG=100% або відповідному ньому кута відпирання в моделі коливання сягають до 10% від номінального значення швидкості двигуна, що значно ускладнює використання цього режиму для електромеханічних систем із суттєвою пружністю, наприклад при послабленні передаточного ременю. В той же час при вентиляторному характері навантаження таке значення не є доцільним, оскільки стійкий рух вентилятора на зниженій швидкості відбувався вже при JOG=10%.
3. Подальший аналіз можливості реалізації досліджуваного режиму можливий з урахуванням не тільки статичних, а й динамічних властивостей виконавчого механізму або всієї установки.

### Список використаної літератури

1. Мясовский В.А. Сравнение режимов задания напряжения при пуске асинхронного двигателя с устройством плавного пуска и прямого пуска / В. А. Мясовский// Молодой ученый. — 2020. — № 21 (311). — С. 520-527.
2. Петрушин В.С. Исследование плавного пуска асинхронного двигателя/ В.С. Петрушин, А.М. Якимец, Ю.Р. Плоткин, Р.Н. Еноктаев// Технічна електродинаміка - №1 – 2018 – с. 56 – 61 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.056>
3. Голодный И.М. Исследование пуска электропривода насоса дождевальной установки с функцией ограничения потребляемой мощности/И.М. Голодный, А.В.Торопов //Вісник Національного університету біоресурсів та природокористування. Серія: Техніка та енергетика АПК. - №268.-2018. - с.180-188 <https://doi.org/10.20535/2707-2096.5.2021.226676>
4. І.М. Голодний та ін. «Регульований електропривод», К. Україна: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. - 509с.
5. Soft Starter Induction Motor Model. – Режим доступу: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hb9/h36/WEG-programing-manual-10003989140-SSW900-en.pdf>
6. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
7. Акопян К.А. Исследование режима работы асинхронного двигателя с устройством плавного пуска в среде MATLAB/ К.А. Акопян , А.Е. Власов, Б.Н. Кантлоков.// Тенденции развития науки и образования. Серия: VII Технические науки. -№.1. с.9-11 doi:10.18411/lj-07-2018-28
8. Назаренко В.Н. Моделирование устройств плавного пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в среде MATLAB SIMULINK/ В.Н.Назаренко, К.В. Назаренко//Збірник наукових праць ШУУЯЕтаП. Розділ «Інформаційні системи і технології», 2018 - с.207–217.
9. Ещин Е.К. Работа асинхронного электродвигателя с устройством плавного пуска /Е.К. Ещин, И.А. Соколов// Известия вузов. Электромеханика. - №5 (547)- 2016. - с.53-58 DOI: 10.17213/0136-3360-2016-5-53-58
10. Soft-Starter SSW900 Programming Manual – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/49605-soft-starter-inductionmotor-model>

A. Toropov, Ph.D. (Eng), associate professor, ORCID 0000-0001-8505-0266  
L. Toropova, assistant, ORCID 0000-0001-6882-2295  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

### DYNAMIC CHARACTERISTICS INVESTIGATION OF THE SYSTEM "SOFTSTARTER - INDUCTION MOTOR" IN THE MODE OF OPERATION WITH REDUCED SPEED

*In the article operation of the system "softstarter - induction motor" with reduced speed is carried out. The relative cheapness of thyristor starting devices for induction motors in comparison with frequency inverters leads to their increasing of industry installation. However, the implementation of some modes of operation, such as rotation at a reduced test speed, may not always be possible for particular processes. This is especially true of increasing the amplitude of speed fluctuations with increasing motor torque. The paper presents the settings of the serial starter SSW900 from WEG, which affect the operation of the induction motor at low speed. To study the impact in the work, a model was compiled in the MATLAB software environment using the Simulink application. The correspondence of the parameters of the functional models to the settings of the existing soft-start device is determined. The reduction of the motor speed is provided by reducing the frequency and, accordingly, the amplitude of the voltage applied to the motor windings. To reduce the carrier frequency relative to the supply frequency, the mode of passing certain voltage half-waves is used. In MATLAB, this is achieved through the use of Pulse\_generator blocks, which pass control pulses only at permitted intervals. By changing the opening angle of the thyristors, graphs of transients in velocity were obtained and the amplitudes of oscillations at the fan nature of the load were determined. In addition, the results of the study of the system on a physical model were obtained and a comparative analysis of the results was performed. Thus, the formation of reduced frequency, proposed in the development of a mathematical model in MATLAB provides a reduction in engine speed to 1/7 of the nominal. The amplitude of speed fluctuations when setting the maximum torque reaches values that significantly limit the possibility of using this mode for long-term operation of the equipment, which is also confirmed by experimental studies.*

**Keywords:** softstarter, induction motor, test speed, firing angle, mathematical modeling.

#### References

1. Myasovsky V.A. Comparison of voltage setting modes when starting an induction motor with a device for smooth start and direct start / V.A. Myasovsky // *Young Scientist*. - 2020. - № 21 (311). – p.520-527.
2. Petrushin V.S. Research of smooth start of the asynchronous engine / V.S. Петрушин, А.М. Yakimets, Yu.R. Plotkin, R.N. Enoktaev // *Technical electrodynamics* - №1 - 2018 - p. 56 - 61 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.056>
3. Golodny I.M. Investigation of the start of the electric drive of the sprinkler pump with the function of limiting the power consumption / I.M. Golodny, A.V. Toropov // *Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences. Series: Engineering and energy of agro-industrial complex*. - №268.-2018. - p.180-188 <https://doi.org/10.20535/2707-2096.5.2021.226676>
4. I.M. Golodny and others. "Adjustable electric drive", K. Ukraine: LLC "CP" Comprint ", 2015. - 509p.
5. Soft Starter Induction Motor Model – Access mode: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hb9/h36/WEG-programing-manual-10003989140-SSW900-en.pdf>
6. Herman-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Design of mechatronic systems on a PC / S.G. German-Galkin. - SpB. : CORONA-Vek, 2008. - 368 c.
7. Hakobyan K.A. Investigation of the mode of operation of an induction motor with a soft-start device in a MATLAB environment / K.A. Hakobyan, A.E. Vlasov, BN Kantlokov.// *Trends in the development of science and education. Series: VII Technical sciences*. -№.1. pp.9-11 doi: 10.18411 / lj-07-2018-28
8. Nazarenko V.N. Modeling of devices of smooth start-up of asynchronous motors with a short-circuited rotor in the MATLAB SIMULINK environment / V.N. Nazarenko, K.V. Nazarenko // *Collection of scientific works SNUYAETA.P. Section "Information systems and technologies"*, 2018 - p.207-217.
9. Eschin E.K. Operation of the asynchronous electric motor with the device of smooth start / E.K. Eshchin, I.A. Sokolov // *Notices of universities. Electromechanics*. - №5 (547) - 2016. - p.53-58 DOI: 10.17213 / 0136-3360-2016-5-53-58
10. Soft-Starter SSW900 Programming Manual. - Access mode: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/49605-soft-starter-inductionmotor-model>

Надійшла 22.11.2021  
Received 22.11.2021

## STUDY OF PHYSICAL PROCESSES IN LAMINATED MAGNETIC CORES OF ELECTRIC MACHINES

*The aim of the work is to use fast-moving processes to detect defects in the interlayer insulation of laminated magnetic cores of electric machines. Damages of interlayer insulation causes increased eddy currents as a result of increased losses and integral local overheating in the magnetic core. The article develops a mathematical field model of induction distribution in a toroidal toothed magnetic core of a 0.37 kW 4AA63V4U3 asynchronous motor when superimposed on the back of the core of the power winding powered by a high frequency voltage source in the given range. An experimental study of losses in the magnetic core and the distribution of eddy current losses and magnetization reversal (hysteresis) were carried out.*

*When designing an electric machine, its performance, optimum operating conditions, thermal state and many other factors are calculated using the nominal values of the parameters of steel, windings and all materials used in the machine. However, these materials do not always have the declared characteristics and quality. For example, in the manufacture and stamping of electrical steel sheets, it experiences a significant level of influence, which in a certain way affects its characteristics. In addition, even if one assume that during production all the stages of manufacturing the material came flawlessly, the state and, as a result, the parameters of the materials and the electric machine as a whole change during operation as a result of emergencies or even simple aging and wear.*

*Therefore, given these facts, it becomes clear that during planned or unplanned repairs it makes sense to check the condition of materials, insulation, since the allowable loads, temperature conditions, etc. depend on their condition. In particular, the state of the magnetic core largely determines the temperature around the conductors in the grooves and, as a result, determines how long the winding will actually last, in contrast to the specified service life and the rated power at which this electric machine should be used.*

*The concept of the state of the magnetic core can be divided into the state of electrical steel and the state of its insulation. The first component changes rather little during operation and is generally caused by the "aging" of the steel, except for any serious damage as a result of faults, but it can be damaged during manufacture. But it is the second component that is significantly influenced during operation and significantly determines the quality of the magnetic core as a whole.*

**Key words:** *electric machine, magnetic cores, eddy current losses, magnetic flux*

### Introduction

Laminated magnetic cores of electric machines are an active part, one of the most important components for carrying out a working magnetic flux, without which electromechanical energy conversion is impossible. During the operation of an electric machine in the magnetic core, the field is remagnetized in each sheet separately in the case when they are ideally isolated and in parasitic eddy current circuits in case of damage of the interlayer insulation. In this case, defects can be of a local nature if they are concentrated in a separate zone, and they can also be of a distributed nature if the defects are in the form of damages of interlayer insulation and are stochastically located in the core. The causes of defects are technological and operational in nature.

### Causes of manufacturing defects

Electrical steel sheets are subjected to different manufacturing processes during the manufacture of magnetic cores for electric machines. Each of these manufacturing steps changes the physical and magnetic characteristics of the sheet material.

### Cutting

To obtain the required shape of the magnetic core sheet, electrical steel sheets are stamped or cut, which causes deformation near the interaction line. These deformations worsen the permeability and degrade the performance of the electric machine, which negatively affects the distribution of the flux density and increases the losses.

The degree of deformation of the crystalline molecular structure depends on many factors of the cutting process and the properties of the sheet material.

Worn punching cutting tools, slow laser cutting speed, large grain size, and high silicon content increase the wear rate. In addition, the deformation of the material (burrs) right at the border of stamping or cutting creates additional short-circuited contours when assembling magnetic core packages, which increases eddy current losses.

#### **Stamping**

The stamping process also negatively affects the properties of the laminated magnetic core. In the article, the effect of stamping on the distribution of the magnetic field and the power loss in the region of the teeth was studied. The stamping effect was modeled as a continuous exponential decrease in permeability from the center of the tooth to its edges according to equations (1) and (2).

$$\mu_{Tooth} = \mu_{Sheet} e^{-\alpha x/d}, \quad (1)$$

$$\hat{B} = \mu_{Sheet} \hat{H}. \quad (2)$$

Despite the high flux density (at which the existence of the stamping effect stops) and the relatively small area affected by punching in the area of the teeth, an increase in the magnetization flux by about 5-10% is observed.

#### **Force of pressing and fastening packages into a solid magnetic core**

Ensuring sufficient interlayer insulation and increasing compaction density are two opposing current trends in the process.

With an increase in pressing pressure, simultaneously with an increase in the fill factor of the core with steel, the sheets are stressed, the electrical resistance between the sheets of the core decreases and, accordingly, eddy currents increase.

For cores stapled, welded, etc. after removing the effort, no noticeable deterioration in the parameters of the stators is observed even at pressures of 100-150 MPa.

The actual specific pressure of the sheets relative to each other in the finished core after bonding and release of the pressing pressure is significantly different from the specific pressure created during its pressing.

The maximum stresses in the core remain when it is bonded by pouring. In this case:

1) During the pouring process, the cores are subjected to a fairly significant pressing pressure (when pouring stators of asynchronous motors of low and medium power, the specific pressure reaches 550 MPa).

2) The maximum contact area of the fastening structure elements with the end and diametral surfaces of the core is ensured.

3) The core is subjected to additional pressures created during the cooling of the filled stators.

An increase in the specific pressing pressure leads to a significant deterioration in the characteristics of the cores. At pressures of about 550 MPa, the increase in specific losses in steel at induction  $B = 1.5$  T at frequency  $f = 50$  Hz was 46%; when the pressure decreases from 550 to 60 MPa, the specific losses decrease by 10% [3].

The two most common fastening methods are welding and stapling. Welding together with burrs creates additional short-circuited contours for eddy currents between steel sheets, which cause an increase in eddy current losses.

#### **Annealing**

Annealing is done to relieve residual stress caused by manufacturing processes.

Annealing involves uniform heating to a predetermined temperature, maintaining that temperature for a period of time, after which uniform cooling occurs.

Studies on the action of cutting [1] and [2] have also been experimented on annealed samples and found a marked reduction in loss compared to samples that did not go through it.

#### **Local defects of magnetic cores**

During the manufacture process, especially with the static pressing method, in certain zones of the core, most likely in the tooth zone, there is an increase in pressure due to the structure of the surface of the steel sheets, equal thickness and the presence of burrs. In such cases, insulation may be damaged. In damage zones, circulating currents create local flashes of increased heat release.

At a level with the value of specific losses in steel, the thermal resistance of the core and its individual parts characterizes the quality of its manufacture.

The main parasitic circuit of eddy currents in the magnetic core, due to the technological process, is closed as follows: a closed outer surface - a closed surface as a result of burrs (tooth zone) - the outer sheets of the stator. If the conductivity of burrs over the entire area of the bore is approximately the same, then this can be attributed to the integral deterioration of the state of the magnetic core.

If the conductivity of burrs in some zone significantly exceeds the average and the density of eddy currents increases during engine operation in this zone, then this is already a local defect, since there is a zone of increased heat generation.

#### **Appearance of defects in interlayer insulation during repair work**

Engines are often repaired, in which, as a result of a crash, the rotor barrel breaks off its axis and is pumped, leaving behind a strong defect in the tooth zone, the so-called "licking" of part of the bore surface, plastic deformation of the plates.

In many cases, the defect consists in the "tearing" of the plates from the tooth. The insulation between the sheets in this case may be broken along the entire height of the tooth.

In repair shops, torn and deformed tooth plates are straightened to their original position with special brackets.

In these cases, one can speak of a partial and even complete effect of a massive magnetic core in a separate area of the laminated magnetic core. All this leads to additional power losses.

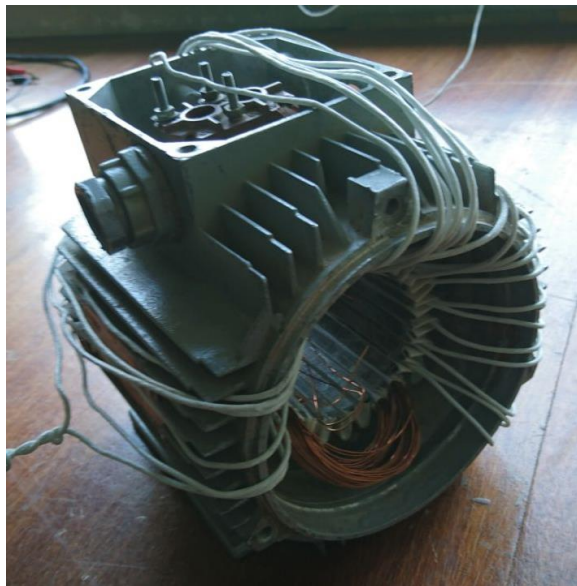
But the danger of local defects lies elsewhere. A magnetic core having a local defect may well satisfy the integral level of quality, consisting in the given specific losses. At the same time, part of the winding adjacent to the defective teeth falls into the region of increased heat release, which drastically reduces the service life. In some cases, even thermal breakdown of the insulation is possible.

It should be noted that the necessity to take into account local defects is much higher for engines that are in operation and have been repaired than in the production process.

#### **Materials and methods of research**

The main task is the determination of specific losses in the magnetic core of an asynchronous motor with a power of 0.37 kW. The purpose of the experimental study was to evaluate the specific losses in the toothed toroidal magnetic core in the absence and presence of defects in the interlayer insulation.

Measurement of specific losses was carried out by conventional methods [4].



*Fig. 1. The magnetic core of a 0.37 kW 4AA63V4U3 asynchronous motor in the housing*

As a result of the experiment it can be noted that the losses in the specified magnetic core were determined at an induction  $B = 1$  T and a power frequency of 50 Hz, which are approximately 16.8 watts.

To get the specific loss in steel, one first need to calculate the mass of steel, which is 3.48 kg.

A theoretical study was carried out by means of a field calculation of the quasi-static process of magnetization reversal in a toothed magnetic core in order to estimate the mass of that part of the magnetic core that takes part in the conduction of the magnetic flux.

With a help of applied software COMSOL Multiphysics, on the basis of a ready-made calculation model, the distribution of magnetic induction in one of the studied magnetic cores was calculated using the wattmeter method. Fig. 2 shows the distribution of magnetic induction in the magnetic core of a 0.37 kW 4AA63V4U3 asynchronous motor. The peak value of the induction corresponds to the position of the field winding.



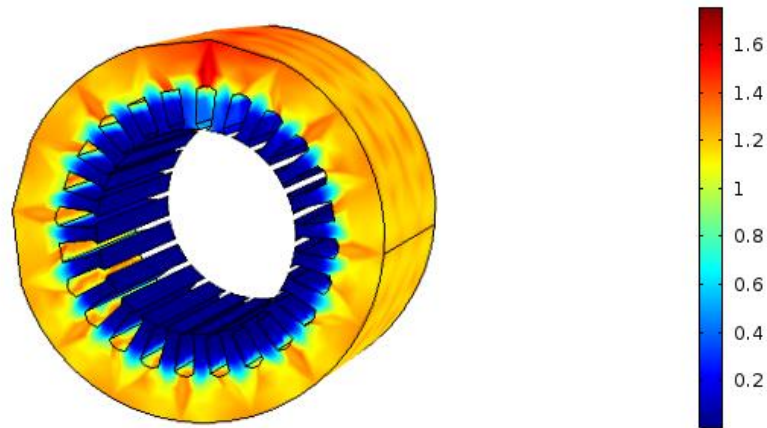


Fig. 2. Distribution of magnetic induction in the magnetic core of a 0.37 kW 4AA63V4U3 asynchronous motor

This calculation visually displays the flow paths of the magnetic flux and confirms the formulas that were used in the calculations, namely, the magnetic flux does not enter the teeth. Thus, the fact that only the height of the stator back was used to calculate the area of active steel and the fact that when calculating the mass of active steel only the mass of the back is calculated is theoretically and mathematically justified.

Since the magnetic flux almost does not enter the stator teeth when examining a disassembled motor and calculating specific losses, the mass of the teeth is not taken into account, since the losses in them are almost zero. And then the specific losses are:

$$\rho = \frac{P_{Steel}}{m_a} = \frac{10,97}{3,48} = 3,15 \frac{W}{kg} \quad (3)$$

Also, on the basis of the complete mathematical model, the induction distribution over the sheet thickness was calculated at different remagnetization frequencies.

So, at a frequency of 50 Hz, which corresponds to the purple line, it can be seen that the induction is distributed evenly over the width of the sheet, that is, it completely penetrates it. And with increasing frequency, it can be seen that in the center of the sheet, the value of induction decreases and is almost equal to zero, which indicates that the magnetic flux penetrates the sheet only on the surface and does not penetrate into the depths.

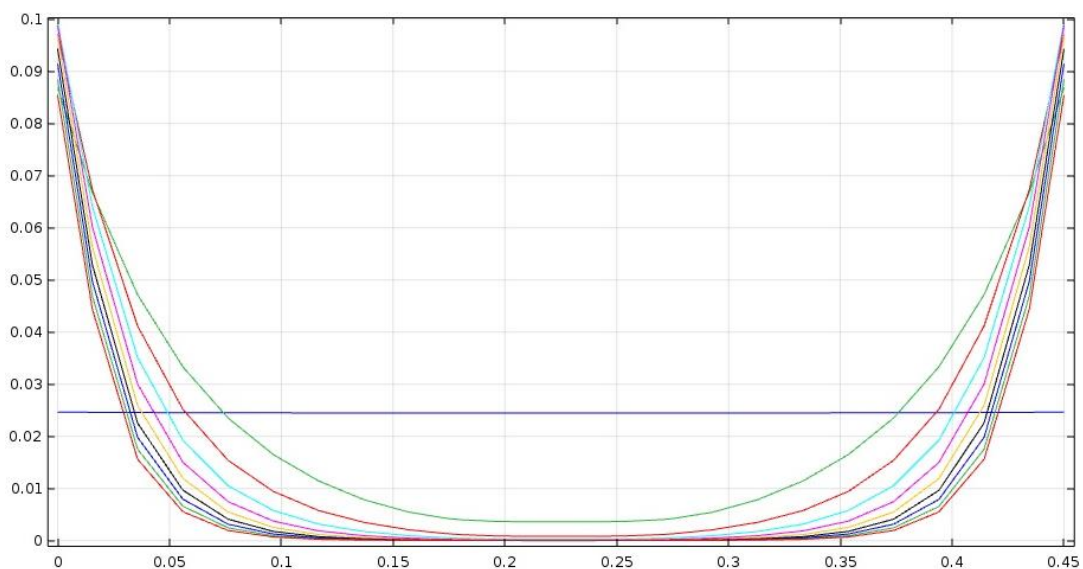


Fig. 3. Distribution of magnetic induction over the thickness of the sheet in the magnetic core of a 0.37 kW 4AA63V4U3 asynchronous motor at different frequencies

In a previous article by the authors [4], the measured losses were divided into hysteresis and eddy currents separately at frequencies in the frequency range close to the industrial frequency from 40 to 70 hertz using the Steinmetz method [9].

However, the most recent publications use a steel loss distribution model, also often referred to as the Bertotti model, which separates steel losses into hysteresis losses, eddy current losses, and sometimes excess losses.

More advanced steel loss models attempt to mathematically describe the physical properties of material hysteresis. However, such models require more input data and take much longer to calculate. Thus, there is a compromise between the effort involved and the time and accuracy of the results.

It should be kept in mind that the engineering approach of distributing losses in steel into different components and the calculation models associated with it is an empirical approach that tries to separate different physical effects, due to changes in frequency and induction in an electromagnetic system, into different components.

As a result of the analysis of various approaches, the Jordan method was chosen, the formula of which for the distribution of hysteresis losses is as follows:

$$p_{Steel} = p_h + p_e = C_h f \hat{B}^2 + C_e f^2 \hat{B}^2. \quad (4)$$

Based on the results of the studies, the dependences of losses in the magnetic core on hysteresis and eddy currents were plotted in the absence and presence of interlayer insulation defects, shown in Fig. 4.

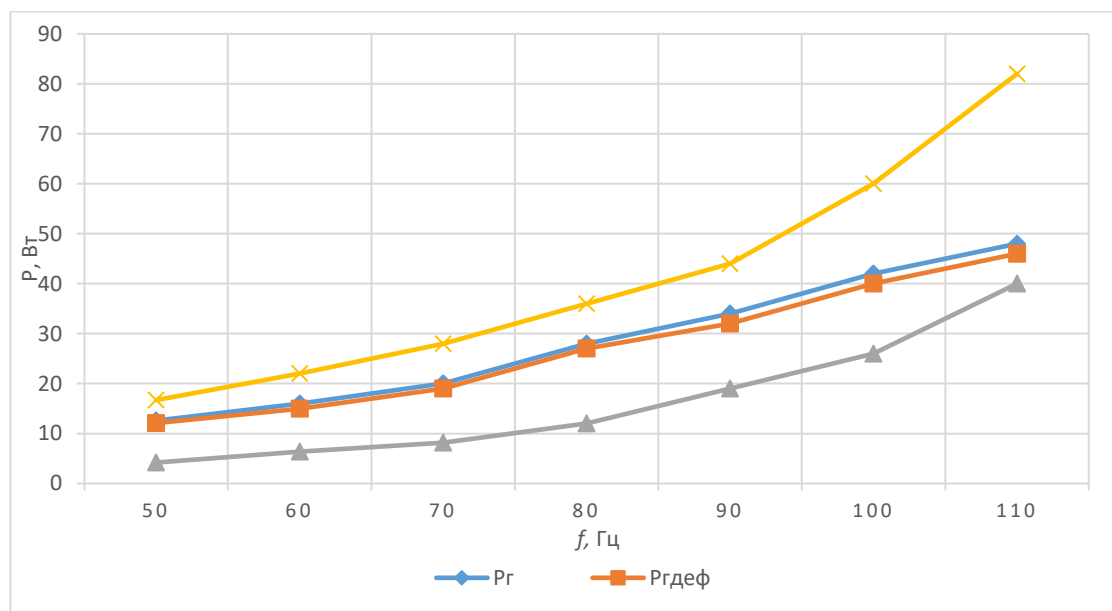


Fig. 4. Distribution of losses for eddy currents and hysteresis in the magnetic core with a defect in interlayer insulation and without a defect at different frequencies

### Conclusions

As a result of the study on the distribution of losses, the following values were obtained: at a frequency of 50 Hz and an induction of 1 T, the total hysteresis loss is 12.6 W, the specific loss is 4.8 W/kg, and the eddy current loss is 4.2 W.

In the presence of defects, the hysteresis loss is 12.1 W, and the eddy current loss is 16.1 W.

The nature of the dependences obtained shows a significant increase in eddy current losses in the presence of interlayer insulation defects. The difference between eddy current losses and hysteresis on a defective magnetic core increases sharply with increasing frequency, which makes it possible to create the most sensitive methods for assessing the state of intersheet insulation in the high-frequency region (in the audio range).

The obtained dependence of the distribution of magnetic induction in specific sheets of the magnetic core at frequencies from 50 Hz to 50 kHz shows that at high frequencies the skin effect sharply increases, which manifests itself in the fact that the field does not penetrate into the depth of the sheet, but is concentrated on its side surfaces.

In the article, using a field mathematical model, the distribution of the magnetic field in the toroidal magnetic core was obtained at an industrial frequency and an induction of 1 T, which made it possible to reasonably determine that part of the magnetic core that is involved in the conduction of the magnetic flux, which allows one to reasonably calculate the specific losses in the magnetic cores, which, according to regulatory documents, indicate the quality of the magnetic core.

#### References

1. F. Ossart, E. Hug, O. Hubert, C. Buvat, and R. Billardon, "Effect of punching on electrical steels: Experimental and numerical coupled analysis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, pp. 3137–3140, Sept. 2000.
2. A. Kedous-Lebouc, B. Cornut, J. C. Perrier, P. Manfàc, and T. Chevalier, "Punching influence on magnetic properties of the stator teeth of an induction motor," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 254-255, pp. 124–126, 2003.
3. Григорян С.С., Айвазян К.Э., Гаспарян Л.А. Влияние усилий прессования на электромагнитные характеристики сердечников статоров. – М.: Электротехника, 1974. – 22-26 с.
4. Chumak V.V., Kovalenko M.A., Ihnatiuk Y.S., Distribution of magnetic induction in laminated magnetic core with intersheet insulation control, *International scientific and technical journal "Modern problems of electrical engineering and automation"*, 2021.
5. M. Mu, Q. Li, D. J. Gilham, F. C. Lee, and K. D. T. Ngo, "New Core Loss Measurement Method for High-Frequency Magnetic Materials," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 8, pp. 4374–4381, Aug. 2014.
6. J. Mühlethaler, J. Biela, J. W. Kolar, A. Ecklebe, J. Muhlethaler, J. Biela, J. W. Kolar, and A. Ecklebe, "Core losses under the DC bias condition based on steinmetz parameters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 2, pp. 953–963, Feb. 2012.
7. *Magnetic Materials—Part 4: Part 4: Methods of measurement of D.C. magnetic properties of magnetically soft materials*, IEC 60404-4, 2008.
8. *Magnetic Materials—Part 3: Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Electrical Strip and Sheet by Means of a Single Sheet Tester*, IEC 60404-3, 2010.
9. C. Steinmetz, "On the law of hysteresis (originally published in 1892)," *Proceedings of the IEEE*, vol. 72, no. 2, pp. 197–221, 1984.
10. Y. Guo, J. G. Zhu, J. Zhong, H. Lu, and J. X. Jin, "Measurement and modeling of rotational core losses of soft magnetic materials used in electrical machines: a review," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 2, pp. 279–291, 2008.
11. Кравчик А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А. Москва. "Энергоиздат" 1982 – 504 с.
12. Ламмиранер Йржи, Штафль Милош, Вихревые токи, Энергия 1967, 208 с.

**В.В. Чумак**, канд.тех.наук, доц., **ORCID** 0000-0001-8401-7931

**М.А. Коваленко**, канд.тех.наук, доц., **ORCID** 0000-0002-5602-2001

**Є.О. Троценко**, канд.тех.наук, доц., **ORCID** 0000-0001-9379-0061

**Є.С. Ігнатюк**, аспірант, **ORCID** 0000-0002-4675-8728

**А.С. Стулішенко**, аспірант, **ORCID** 0000-0001-9982-9246

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

#### **ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН**

*Метою роботи є використання швидкоплинних процесів для виявлення дефектів міжлистової ізоляції шихтованих магнітопроводів електричних машин. Порушення міжлистової ізоляції викликає підвищені вихрові струми як наслідок підвищені втрати та інтегральні то локальні перегріву в тілі магнітопроводу. В статті розроблено математичну польову модель розподілу індукції в тороїдальному зубчастому магнітопроводі асинхронного двигуна серії 4АА63В4У3 0,37 кВт при накладенні на спинку осердя силової обмотки яка живиться від джерела напруги високої частоти в заданому діапазоні. Проведено експериментальне дослідження втрат в магнітопроводі і розподіл втрат на вихрові струми та на перемагнічування (гістерезис).*

*При проектуванні електричної машини її робочі характеристики, оптимальні режими роботи, тепловий стан та багато інших факторів розраховуються використовуючи номінальні значення параметрів сталі, обмоток та загалом усіх матеріалів, які використовуються у машині. Проте, ці матеріали не завжди мають заявлені характеристики і якість. Наприклад під час виготовленні та*

штампування листів електротехнічної сталі вона зазнає значного рівня впливу, який певним чином впливає на її характеристики. До того ж, навіть якщо припустити, що під час виробництва всі етапи виготовлення матеріалу прийшли бездоганно, стан і як наслідок параметри матеріалів та електричної машини в цілому змінюються під час експлуатації в результаті аварійних ситуацій або навіть простого старіння і зносу.

Тож зважаючи на ці факти, стає зрозуміло, що під час запланованих чи незапланованих ремонтних робіт має сенс перевіряти стан матеріалів, ізоляції, оскільки від їх стану залежить допустимі навантаження, температурний режим і т.п. Зокрема стан магнітопроводу значною мірою визначає температуру навколо провідників в пазах і як результат визначає скільки реально прослужить обмотки на відміну від зазначеного терміну експлуатації та номінальної потужності на якій варто використовувати цю електричну машину.

Поняття стан магнітопроводу можна розділити на стан електротехнічної сталі та стан її ізоляції. Перша складова досить слабо змінюється під час експлуатації та загалом викликана "старінням" сталі якщо не брати до уваги якісь серйозні пошкодження в результаті аварійних ситуацій, проте вона може бути порушена під час виготовлення. А ось саме друга складова зазнає значного впливу під час експлуатації і значним чином визначає якість магнітопроводу в цілому.

**Ключові слова:** електрична машина, магнітопровід, втрати на вихрові струми, магнітний потік

#### **Список використаних джерел**

1. F. Ossart, E. Hug, O. Hubert, C. Buvat, and R. Billardon, "Effect of punching on electrical steels: Experimental and numerical coupled analysis," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, pp. 3137–3140, Sept. 2000.
2. A. Kedous-Lebouc, B. Cornut, J. C. Perrier, P. ManfA`c , and T. Chevalier, "Punching influence on magnetic properties of the stator teeth of an induction motor," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 254-255, pp. 124 – 126, 2003.
3. Григорян С.С., Айвазян К.Э., Гаспарян Л.А. Влияние усилий прессования на электромагнитные характеристики сердечников статоров. – М.: Электротехника, 1974. – 22-26 с.
4. Chumak V.V., Kovalenko M.A., Ihnatiuk Y.S., Distribution of magnetic induction in laminated magnetic core with intersheet insulation control, International scientific and technical journal "Modern problems of electrical engineering and automation", 2021.
5. M. Mu, Q. Li, D. J. Gilham, F. C. Lee, and K. D. T. Ngo, "New Core Loss Measurement Method for High-Frequency Magnetic Materials," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 8, pp. 4374–4381, Aug. 2014.
6. J. Mühlethaler, J. Biela, J. W. Kolar, A. Ecklebe, J. Muhlethaler, J. Biela, J. W. Kolar, and A. Ecklebe, "Core losses under the DC bias condition based on steinmetz parameters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 2, pp. 953–963, Feb. 2012.
7. Magnetic Materials—Part 4: Part 4: Methods of measurement of D.C. magnetic properties of magnetically soft materials, IEC 60404-4, 2008.
8. Magnetic Materials—Part 3: Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Electrical Strip and Sheet by Means of a Single Sheet Tester, IEC 60404-3, 2010.
9. C. Steinmetz, "On the law of hysteresis (originally published in 1892)," Proceedings of the IEEE, vol. 72, no. 2, pp. 197–221, 1984.
10. Y. Guo, J. G. Zhu, J. Zhong, H. Lu, and J. X. Jin, "Measurement and modeling of rotational core losses of soft magnetic materials used in electrical machines: a review," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 2, pp. 279–291, 2008.
11. Кравчик А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А. Москва. "Энергоиздат" 1982 – 504 с.
12. Ламмиранер Йржи, Штафль Милош, Вихревые токи, Энергия 1967, 208 с.

Надійшла 11.11.2021  
Received 11.11.2021

# ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

## ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.039.539

DOI 10.20535/1813-5420.4.2021.257268

В.В. Філонов<sup>1,2</sup>, асп., ORCID 0000-0001-8123-026XС.М. Письменний<sup>1</sup>, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-6403-6596В.Г. Разумовський<sup>1</sup>, канд. техн. наук., ORCID 0000-0002-7326-5056<sup>1</sup> Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<sup>2</sup> ТОВ «ІПП-Центр»

### АДАПТАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ПРИСТІНКОВОЇ ФУНКЦІЇ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ НАДКРИТИЧНИХ ПАРАМЕТРАХ ТЕПЛОНОСІЯ

У роботі обговорюється проблема адаптації існуючого універсального чи спеціалізованого інструментарію теплогідравлічного аналізу для нелінійних задач теплообміну при надкритичних параметрах теплоносія при погіршенні тепловіддачі. Розглянуті складності прогнозу нелінійного теплообміну при надкритичних параметрах інженерними методами розрахункової гідродинаміки. Запропоновано простий спосіб адаптації двозонної температурної пристінкової функції Кадера на основі існуючих зондових досліджень для двоокису вуглецю. Обговорюється проблема імплементації в універсальні пакети обчислювальної гідродинаміки CFD, яка базується на способі вибору опорної координати пристінкової зони для визначення динамічної швидкості та безрозмірної температури. На прикладі ANSYS CFX показаний один із способів створення спеціальної користувальницької процедури, яка має покращену тенденцію щодо прогнозу аксіального профілю температури при погіршеному теплообміні. У роботі проведено калібрування та валідацію отриманих результатів на основі експериментальних досліджень для вертикальних труб та стержневих збірок імітаторів твел. Також в роботі обговорюються особливості запропонованої імплементації, та сформовані рекомендації для застосування та подальшого удосконалення інженерних підходів для прогнозування погіршення теплообміну при надкритичних параметрах теплоносія.

**Ключові слова:** універсальні пристінкові функції, надкритичні параметри, CFD, погіршений теплообмін, перспективні реактори

#### Прийняті скорочення:

НКП	– Надкритичні параметри	EVT	– Eddy-Viscosity Turbulence
СПФ	– Спеціальна пристінкова функція	RANS	– Reynolds Averaged Navier Stokes
УПФ	– Універсальна пристінкова функція	Low-Re	– Низькорейнольдсівський
CFD	– Computational Fluid Dynamics	High-Re	– Високорейнольдсівський
DHT	– Deteriorated heat transfer		

#### Прийняті позначення:

$C_p$	– Питома теплоємність, (Дж/(кг·К))	$T^+$	– Безрозмірна температура (-)
$f$	– Функція спряження зон, (-)	$U^+$	– Безрозмірна швидкість (-)
$h$	– Питома ентальпія, (Дж/кг)	$u_\tau$	– Динамічна швидкість (м/с)
$h^+$	– Безрозмірна ентальпія (-)	$y^+$	– Безрозмірна відстань до стінки, (-)
$Pr$	– Число Прандтля (-)	$\mu$	– Коефіцієнт динамічної в'язкості, (Па·с)
$p$	– Тиск, (Па)	$\rho$	– Густина, (кг/м <sup>3</sup> )
$q_w$	– Питомий тепловий потік, (Вт/м <sup>2</sup> )	$\tau$	– Дотичні напруження (Па)
$T$	– Температура, (К)		

#### Індекси:

КЛ	– «класичні»	t, turb	– Турбулентний
f	– В потікці	w	– На стінці
lam	– Ламінарний	$\tau$	– Динамічний.
ref	– Опорний		

## Вступ

Універсальні пристінкові функції (УПФ) є дуже потужним інструментом в інженерній практиці застосування методів CFD [1-3]. Фактично, це дає можливість досить просто «проекувати» значення граничних умов на стінці до найближчого по нормалі вузла розрахункової сітки [2]. Існує УПФ декількох типів, які можна умовно поділити на групи згідно з рівнянням переносу до якого застосовується пристінкова функція (силові – швидкість; теплові – температура/ентальпія; турбулентні – кінетична енергія турбулентності/дисипативна функція). Однією з основних переваг застосування УПФ є менш жорсткі умови для дискретизації розрахункової сітки біля стінки. До того ж, якщо застосовувати УПФ в області параметрів для якої вони власне конструювалися і калібрувалися, то здебільшого вдається отримати узгодження між розрахунком та експериментом з точки зору інтенсивності теплообміну/дисипації (як локально, так і усереднено). Одним з недоліків методу УПФ є те, що вони неявні, а отже потребують спеціальної імплементації в розрахункові пакети.

Сучасні пристінкові функції узагальнені на всю товщину прилежого шару, а також враховують неізотермічність течії (узагальнення Кадера [4]). Концепція нерівноважних пристінкових функцій [5] дає можливість враховувати позовжній градієнт тиску в прилежому шарі.

Тим не менш, для «нелінійних» задач теплообміну, в яких є суттєва зміна теплофізичних властивостей, а також вплив природної конвекції УПФ фактично не працюють. Тобто прогнозний профіль температури стінки при граничних умовах другого роду і кількісно і якісно відрізняється від експериментальних даних, хоча з тією ж моделлю турбулентності при детальній дискретизації пристінкової області прогнозні проблеми відсутні (див. Рис. 1). Таким чином, застосування УПФ неможливе для режимів погіршеного теплообміну при надкритичних параметрах теплоносія. Створення спеціальних пристінкових функцій (СПФ) потребує експериментальних досліджень структури потоку теплоносія при погіршенні теплообміну.

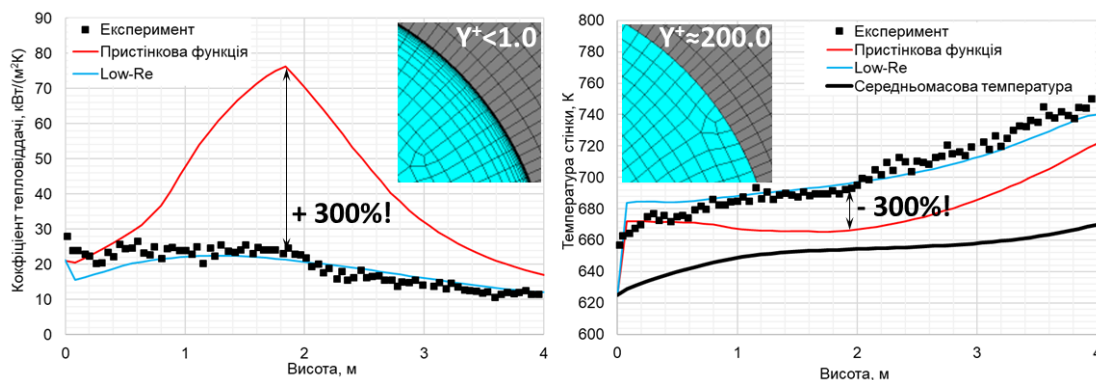


Рисунок 1 – Демонстрація проблеми застосування УПФ при розрахунку режиму теплообміну при надкритичних параметрів біля точки псевдофазового переходу

## Мета та завдання дослідження

Основною метою даної є створення СПФ на основі УПФ, що дасть можливість поліпшити прогнозні властивості CFD для режимів теплообміну при надкритичних параметрів. Важливо зберегти застосовність пристінкових функцій, оскільки це дозволяє раціональним чином використовувати розрахункові потужності, що є суттєвим в інженерній практиці та дає можливість не обмежуватися розглядом лише елементарних каналів.

### 1. Адаптація «класичних» температурних пристінкових функцій

Першим етапом створення СПФ є адаптація існуючих УПФ температури на основі комплексних зондових досліджень надкритичного потоку  $\text{CO}_2$  [6,7]. Унікальність цих експериментальних досліджень полягає у тому, що вони дають не тільки форму аксіального профілю при погіршеному теплообміні, але й структуру турбулентного потоку (Рис. 2).

Результати досліджень, а також узагальнень свідчать про те, що при суттєвому впливі плавучості та зміни теплофізичних властивостей профілі швидкості  $U^+$  та  $h^+$  подібні між собою не тільки при нормальному теплообміні (NORM, Рис. 3), але й при погіршеному (DHT, Рис. 3). Нормальний («лінійний») теплообмін характеризується незначним впливом термічного прискорення, оскільки відсутні значні градієнти теплофізичних властивостей, а отже і плавучості. В цьому випадку, тобто при використанні УПФ можна отримати задовільне узгодження результатів CFD з експериментом (без врахування low-Re ефектів).

Зважаючи на те, що при «лінійному» теплообміні профілі  $U^+$ ,  $h^+$  та  $T^+$  між собою подібні, а також на те, що в сучасних кодах застосовується комбінації  $U^+$ -  $T^+$ , була запропонована досить проста

модифікація пристінкової функції температури, яка може бути представлена у вигляді простого правила (1).

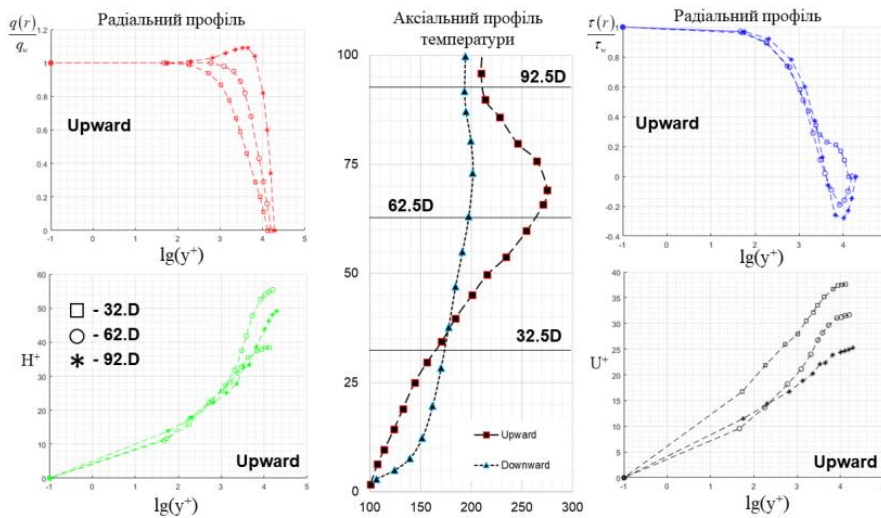


Рисунок 2 – Взаємозв'язок аксіального та радіального профілів при погіршенні теплообміну (ділянка обігріву – 2925 мм; масова швидкість – 2100 кг/(м<sup>2</sup>с); тепловий потік – 428.4 кВт/м<sup>2</sup>, ентальпія входу – 595 кДж/кг; робочий тиск – 9,0 МПа)

$$h^+ = \rho u_\tau \frac{h - h_w}{q_w} \approx \rho u_\tau \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \frac{(T - T_w)}{q_w} = \rho u_\tau \bar{C}_p \cdot \frac{(T - T_w)}{q_w} = \frac{\bar{C}_p}{C_p} T^+ \Rightarrow T_{\text{НКП}}^+ = \frac{C_p}{\bar{C}_p} T_{\text{КЛ}}^+ \quad (1)$$

Де  $\rho u_\tau \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \frac{(T - T_w)}{q_w}$  є лінеаризацією, безрозмірної ентальпії  $h^+$  відносно температури стінки.

Похідна ентальпії по тиску може трактуватися як середня величина ізобарної теплоємності між стінкою та точкою, що розглядається з координатою  $y^+$ .

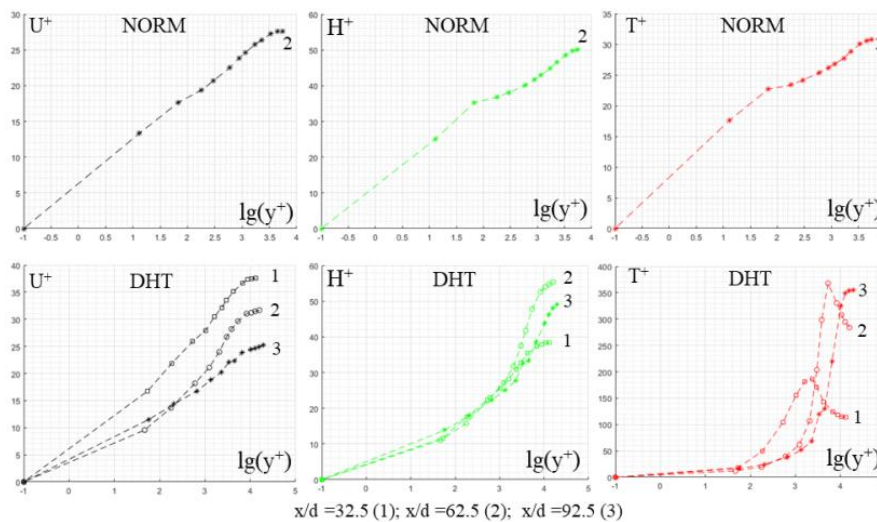


Рисунок 3 – Експериментальні УПФ (NORM – нормальний, DHT погіршений теплообмін)

В загальному випадку, структуру двозонної рівноважної температурної УПФ можна представити як [8]:

$$T^+ = e^{-\Gamma} f_{\text{lam}} y^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} \left[ f_{\text{turb}} \ln(y^+) + B(\text{Pr}, \text{Pr}_t) \right] \quad (2)$$

Перший член (2) характеризує ламінарну частину теплового прилежого шару (завичай обмежується  $y^+ \sim 11$ ), другий член відповідає турбулентній частині. Для сполучення ламінарної та

турбулентної зон використовується експоненціальні поправки, як функції числа Прандтля та безрозмірної координати.

Функція  $B(\text{Pr}, \text{Pr}_t)$  характеризує додатковий термічний опір температурного прилеглового шару. Зважаючи на те, що в першому наближенні, «принципово» профіль швидкості не змінюється при переході від нормального до погіршеного теплообміну, то в першому наближенні, можна оцінити вплив модифікації  $B(\text{Pr}, \text{Pr}_t) \frac{C_p}{C_p}$  на температурну УПФ.

Для апріорної оцінки (температура та тепловий потік на стінці відомі) використовуємо двозонну УПФ Кадера [4], яка може бути представлена у вигляді:

$$T_{\text{КЛ}}^+ = e^{-\Gamma} (\text{Pr} y^+) + e^{-\frac{1}{\Gamma}} \left[ 2,39 \ln(9,79 \cdot y^+) + B(\text{Pr}, \text{Pr}_t) \right]; \Gamma = \frac{0,01(\text{Pr} y^+)^4}{1 + 5 \cdot \text{Pr}^3 y^+}$$

$$B(\text{Pr}, \text{Pr}_t) = 9,28 \left[ \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_t} \right)^{\frac{3}{4}} - 1 \right] \left( 1 + 0,28 \cdot e^{-0,007 \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_t}} \right)$$
(3)

При застосуванні (3) для апріорної оцінки (див. Рис. 4) було використано фіксоване значення  $\text{Pr}_t$ , яке прийнято рівним 0,9.

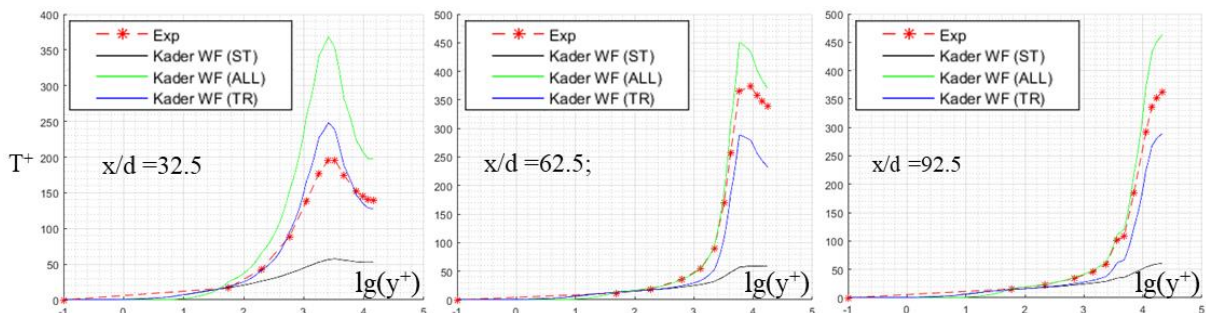


Рисунок 4 – Адаптовані УПФ (СПФ) (ST – стандартна, ALL – адаптація (1), TR – адаптація термічного опору  $B(\text{Pr}, \text{Pr}_t)$ )

Отримані результати апріорної оцінки є досить оптимістичним, оскільки в першому наближенні значно покращують прогностичні можливості пристінкової функції, яка взагалі кажучи отримана при принципово інших температурних умовах [4]. Навіть в області  $y^+$  від 30 до 300 (а іноді до 1000 при числах Рейнольдса  $\sim 10^6-10^9$ ), яка характерна для інженерних розрахунків запропонована модифікація УПФ дозволяє отримувати значно кращі прогнози (Рис. 5).

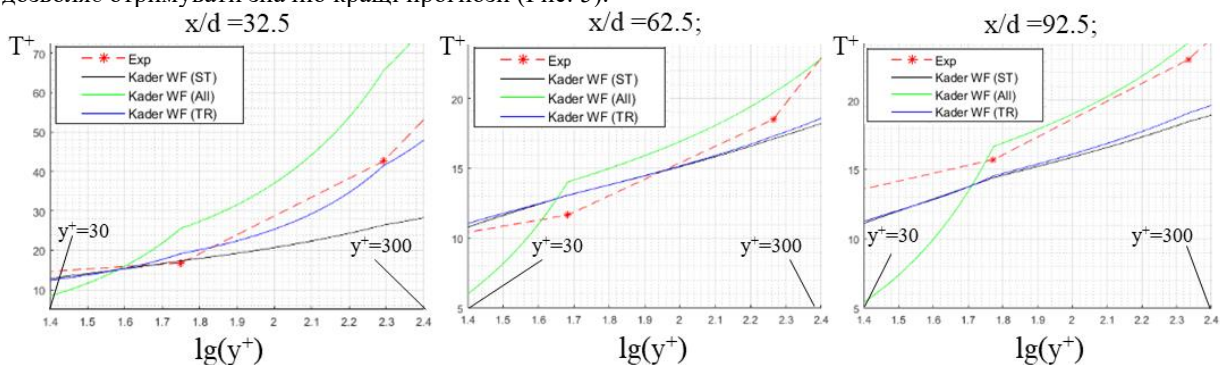


Рисунок 5 – Адаптовані УПФ (СПФ) у межах  $y^+$  від 30 до 300 (ST – стандартна, ALL – адаптація (1), TR – адаптація термічного опору  $B(\text{Pr}, \text{Pr}_t)$ )

Таким чином, для інженерної практики запропонована досить проста модифікація може бути корисною. Зважаючи на те, що самі по собі пристінкові функції, які проінтегровані на ділянці від 0 до  $y^+$  можуть бути неявними, то це означає, що проблеми неявних кореляцій, які описані в розділі 3 автоматично відносяться і до пристінкових функцій. Нижче наведені результати імплементації СПФ у розрахунковий CFD код.



## 2. Особливості імплементації та застосування пристінкової функції

Як видно із залежності (3), для визначення всіх коефіцієнтів необхідно обумовити опорне значення  $y^+$ , для розрахунку теплофізичних властивостей. Якщо прийняти  $y^+$  рівним локальному вузловому значенню першого контрольного об'єму, то отримаємо повністю явну постановку. Якщо ж визначальним значенням прийняти  $y^+=0$ , то отримаємо повністю неявну імплементацію, оскільки необхідні коефіцієнти є функціями температури стінки. Слід зазначити, що йде мова про теплові граничні умови другого роду, що є притаманними для такого роду задач. Згідно з [9] спосіб імплементації пристінкової функції в багатьох випадках є визначальним, і може бути реалізований навіть шляхом побудови щось типу екстраполяційного профілю, тобто задіяти декілька по нормалі пристінкових вузлів. Проте з алгоритмічної точки зору в загальному випадку такий спосіб є дуже складним і у комерційних CFD пакетах практично не застосовується.

Принциповою відмінністю від «лінійного» теплообміну у випадку застосування пристінкової функції є те, що теплофізичні властивості у межах характерної висоти пристінкового КО практично не змінюються. У випадку теплообміну при надкритичних параметрах (НКП) може виникнути проблема конвергенції із-за екстремально-нелінійної поведінки функції питомої теплоємності від температури. До того ж, при «лінійному» теплообміні можна прийняти постійність дотичних напружень, що підтверджується багатьма експериментами [4,8]. При теплообміні з НКП, в особливості при погіршені тепловіддачі постійність дотичних напружень не зберігається не тільки із-за зміни теплофізичних властивостей, але й із-за зміни «фізики», що поки не може бути враховано за допомогою УПФ та СПФ.

Саме з цих причин при застосуванні СПФ (1)-(3) представляється у вигляді (4), що за своєю формою являється неявним узагальненням, тобто з точки зору розрахункового коду втрачає деяку універсальність (з'являється параметр, який є деякою середньою функцією локального поля температури).

$$T^+ = c_p(T) \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p^{-1} \cdot T_{\text{кл}}^+ \approx \frac{c_p(T)}{\text{av}[c_p(T)]} T_{\text{кл}}^+ \quad (4)$$

Де,  $\text{av}[...]$ - є певною процедурою усереднення аргументу, в якості якого виступає питома ізобарна теплоємність.

Для використання СПФ у формі (4) необхідно вирішити, яку функцію  $\text{av}[...]$  необхідно обрати, а також організувати додаткову розрахункову процедуру у самому CFD коді. Інтерфейс, який дозволяє працювати з власним пристінковими функціями присутній у комерційних розрахункових кодах, проте він має деякі особливості. По-перше організувати усереднення можливо лише шляхом введення додаткових циклічних рестартів методу встановлення (CFX), що може на відносно простій геометрії бути цілком прийнятним, проте на складних задачах втрачається сенс застосовувати СПФ (із-за необхідного часу розрахунків), По-друге, ANSYS CFX використовує в якості опорної температури типу «Wall Adjacent Temperature», тобто значення температури потоку. Як вже зазначалося вище, це є суттєвим недоліком при «нелінійному» теплообміні. Для реалізації СПФ таким підходом необхідно створювати спеціальну процедуру, яка б синхронізувала ітерації за потоком, з підпрограмою розрахунку температури стінки.

Для апробації побудованої температурної СПФ було реалізовано спеціальну підпрограму, яка застосовувалася послідовно після розрахунку основних полів потоку з надкритичними параметрами. Це дало можливість у порівнянні з (4) деякою мірою зберегти універсальність СПФ. Для визначення температури стінки було імплементовано трансцендентне рівняння (5) відносно температури стінки, яке враховує вище наведені особливості, які притаманні теплообміну при НКП.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w^{\text{CFD}} \cdot \rho(T_{\text{ref}})^{-1}}{\rho(T_f)^{-1} \cdot [\mu(T_f) + \mu_f^{\text{CFD}}] \cdot \left. \frac{\partial U}{\partial n} \right|_f^{\text{CFD}}}}; y^+ = \left[ \frac{(y^+)_{\text{CFD}}}{y_f u_\tau(T_{\text{ref}}) \cdot \nu(T_{\text{ref}})^{-1}} \right] \quad (5)$$

$$q_w K(y^+) T_{\text{КЛ}}^+(y^+; \text{Pr}) = \rho(T_{\text{ref}}) u_\tau [h(T_w) - h(T_f)]; \text{Pr} = \text{Pr}(T_{\text{ref}})$$

Де  $T_{\text{ref}}$  - опорна температура, яка знаходиться в межах від  $T_f$  до  $T_w$ .  $K(y^+)$  - коефіцієнт пропорційності.

Температура  $T_f$  визначається в CFD і якщо її обрати в якості опорної, то отримаємо повністю явний підхід. Варто зазначити деякі особливості (5). Те що реалізована СПФ є наслідком (4) не є очевидним, оскільки від безрозмірної температури вдалося перейти до безрозмірної ентальпії. Для цього в функцію  $\text{av}[...]$  залежності (4) слід покласти середньоентальпійне значення теплоємності, яке визначається як  $(h_w - h_f)/(T_w - T_f)$ . Якщо звернути увагу на різницю між  $h^+$  та  $T^+$ , (див. Рис. 3) при нормальному

теплообміні (що є граничним випадком для (4) у сенсі  $\frac{C_p(T)}{\text{av}[C_p(T)]} \rightarrow 1$ ), то в першому наближенні можна прийняти, що  $h^+ \approx K(y^+)T^+$ , як для нормального, так і для погіршеного теплообміну. Для  $y^+ < 1000$ ,  $K(y^+)$  знаходиться в межах від 1 до  $\sim 1,5$ .

Калібрування та валідація запропонованої СПФ проводилася при застосуванні High-Re моделей турбулентності EVT (однопараметрична) та SST (двопараметрична). Зазначимо, що для High-Re і побудовані пристінкові функції.

На Рис. 6 наведені результати тестування СПФ на основі експериментальних даних [6,7] для CO<sub>2</sub> на аналізі яких власне і була побудована відповідна адаптація УПФ.

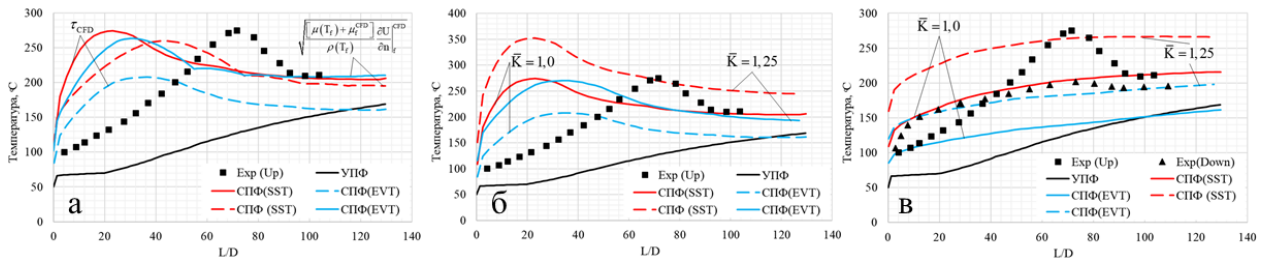


Рисунок 6 – Результати застосування СПФ (а – опорна температура біля стінки для  $T^+$  та  $u_\tau$  при різних способах визначення дотичних напружень; б - опорна температура біля стінки для  $T^+$  та  $u_\tau$  для різних середніх значень коефіцієнту пропорційності  $K$ ; в - опорна температура стінки для  $T^+$  та  $u_\tau$ , неявна постановка)

Отримані результати із застосуванням (5) демонструють якісну та кількісну зміну прогнозних значень при використанні СПФ. Варто зазначити, що в цілому отримані температури зросли у абсолютних величинах, а у випадку опорної температури потоку вдається і прогнозувати характерний пік в аксіальному розподілі (хоча цей пік зміщений у сторону ділянку обігріву і може бути результатом «реакції» на встановлення радіального профілю температури/швидкості). Також з результатів видно, що при використанні альтернативного способу визначення дотичних напружень на основі даних CFD (шляхом розрахунку градієнту швидкості) вдається отримати зміщений пік відносно вхідної ділянки, що краще узгоджується з експериментом. При альтернативному способі розрахунку дотичних напружень виникає необхідність аналізу більшого масиву даних (необхідно оперувати з полем швидкості принаймні у деякій кількості сусідніх вузлів по нормалі до стінки, що обігрівається). Необхідність альтернативної визначення дотичних напружень (виходячи із визначення) продиктовано тим, що в залежності від RANS моделі турбулентності присутні відмінності у визначенні напружень на стінці у CFD коді (використовується формулювання через кінетичну енергію турбулентних пульсацій).

У випадку застосування температури стінки (невідомо величина) в якості визначальної для  $T^+$  та  $u_\tau$ , то результати в цілому покращується кількісно, а якісно відповідають «лінійному» теплообміну. Отримані аксіальні профілі подібні до тих, які в переважній більшості отримуються при врахуванні low-Re ефектів [10], але потребують значно нижчі розрахункові ресурси (густина дискретизації зменшується в 4-10 разів). Відмітимо важливу особливість. Для повністю неявної постановки, при екстремально-нелінійній зміні теплофізичних властивостей виникає проблема конвергенції і для пристінкових функцій, що є подібною проблемою і для неявних кореляцій для НКП і в загальному вимагає використання спеціальних методів [11].

Отримані результати є очікуваними, оскільки як зазначалося вище СПФ, які базується на УПФ не здатні враховувати фізичні особливості процесів при погіршеному теплообміні.

Наступним кроком є розрахунковий тест, який відноситься до теплообміну з надкритичними параметрами води з чого і почалося обговорення проблеми УПФ (див. вступ). На прикладі експерименту, який вважається класичним для тестування розрахункових методів [12] розглянемо можливості застосування СПФ. Основні характеристик обраного режиму детально розглядаються наступні: довжина ділянки обігріву – 4 м; опорний тиск – 24 МПа; температура на вході – 352 °С; масова швидкість – 1500 кг/(м<sup>2</sup>с); тепловий потік -884 кВт/м<sup>2</sup>. Відповідно до класифікації [13] даний режим відповідає погіршеному теплообміну, оскільки знаходиться в IV групі. На Рис. 7 наведені результати застосування СПФ.

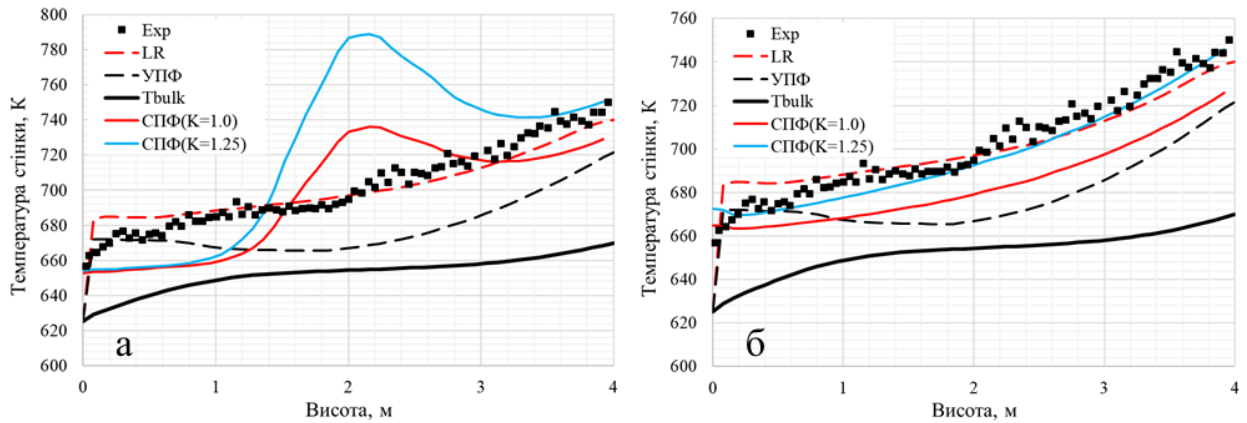


Рисунок 7 – Результати застосування СПФ (а – опорна температура біля стінки для  $T^+$  та  $u_r$ ; б – опорна температура стінки для  $T^+$  та  $u_r$ , неявна постановка)

Отримані результати відповідають вище зазначеним висновкам. Для конкретизації розрахункового тесту відмітимо, що в якості моделі турбулентності була використана модель EVT, з дискретизацією, яка відповідає значенню  $y^+$  біля стінки  $\sim 400$ . Для довідки: при розрахунку з використанням Low-Re розрахункова сітка в  $\sim 13$  більше! має розрахункових вузлів лише за рахунок додаткової дискретизації пристінкової області).

Нижче наведені результати тестування СПФ на результатах експериментальних досліджень НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» для одно- та трьох-стержневого імітаторів твел при наступних режимних характеристиках : опорний тиск – 22,6/27,5 МПа; температура на вході – 246/212 °С/; масова швидкість – 2500/1500 кг/(м<sup>2</sup>·с); тепловий потік – 2750/2400 кВт/м<sup>2</sup> відповідно [14]. Отримані результати (Рис. 8) досить наглядно демонструють можливості СПФ у контексті їх застосування для збірок імітаторів твел.

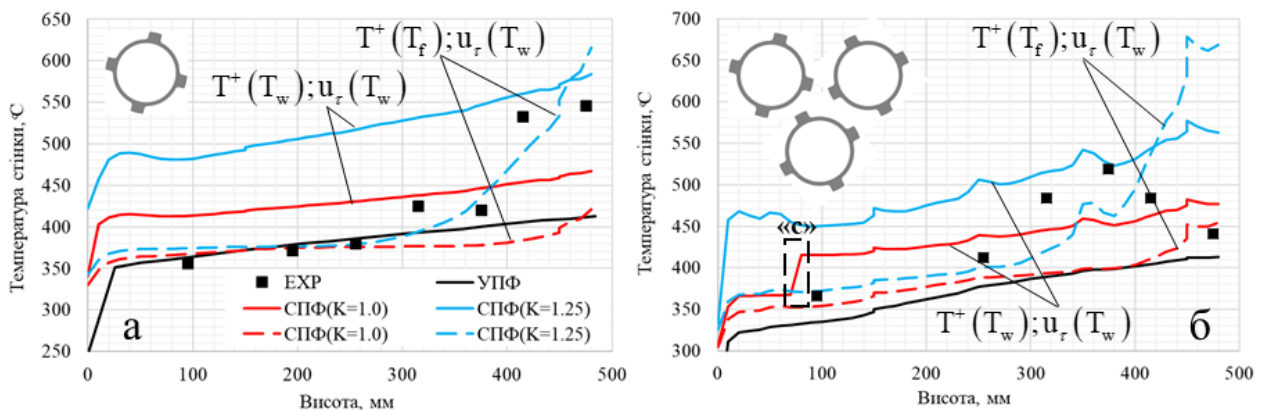


Рисунок 8 – Результати застосування СПФ для режиму з ПТВ (а – одно-стержневий імітатор; б – трьох-стержневий імітатор твел)

В цілому прогнозні властивості СПФ значно кращі у порівнянні з УПФ, проте для збірок імітаторів твел існують деякі особливості. По-перше, скоріше за все визначення дотичних напружень по температурі потоку дає велику похибку в першу чергу із-за специфіки дискретизації із-за наявності шнеків. Справа в тому, що зберегти по всьому тепловому периметру значення  $y^+ > 100$  практично не можливо (це стосується першу чергу 3-ох та 7-ми стержневих імітаторів). По-друге, із-за досить тісної компоновки імітаторів складається ситуація, коли характерний розмір пристінкового контрольний об'єму співставний з характерним розміром всього ядра потоку. По-друге, це все приводить до того, що процедура усереднення параметрів потоку по тепловому периметру необхідних для (5) має суттєві неточності, що проявляється на аксіальних профілях температури. До того ж при повністю неявній постановці можуть виникати проблеми з конвергенцією притаманні такого типу розрахункам [11] (Рис. 8б, зона «с»). Те, що існує проблема з визначенням дотичних напружень також свідчить і вплив комбінації опорних температур, за яких  $T^+$  за температурою потоку, а динамічна швидкість розраховується неявно (за температурою на стінці).

Виходячи з отриманих результатів, для подальших розрахунків можна рекомендувати застосовувати СПФ з High-Re, одно- та двох- параметричними моделями турбулентності в рамках RANS. Характерний розмір пристінкового контрольного об'єму слід обирати виходячи із рекомендованого значення  $u^+$ , яке заходиться у межах від 100 до 1000. Середнє значення коефіцієнту пропорційності рекомендується прийняти рівним 1,25. Для строгості, варто відзначити, що застосування СПФ (УПФ) порушує консервативність розв'язку у контексті законів збереження.

### **Висновки**

В представленій роботі обговорюється проблема прогнозування погіршеного теплообміну за допомогою CFD кодів, використовуючи інженерні підходи, які дають можливість раціонально підходити до аналітичної частини проектування перспективних активних зон. Досить потужним інженерним інструментом є метод пристінкових функцій, перспективність якого недооцінена в контексті розрахунку нелінійних режимів теплообміну при надкритичних параметрах. Вище представлена спроба адаптувати універсальні пристінкові функції для розрахунку в першу чергу зони з погіршенням тепловіддачі. Отримані результати переконають в перспективності даного підходу, оскільки:

– За допомогою запропонованою спеціальною пристінковою функцією, вдається суттєво покращити прогнозні властивості погіршеного теплообміну не лише в трубах, алей в каналах складної форми поперечного перерізу.

– При найгірших прогнозних властивостях СПФ, результати принципово не відрізняються від тих, що отримані при врахуванні low-Re ефектів, про те досягається суттєвий приріст в швидкості розрахунків за рахунок зменшення густини дискретизації.

– Дискретизація розрахункової області при застосуванні СПФ може бути більш ніж в 10 разів меншою лише за рахунок пристінкової області, що є суттєвим з точки зору аналізу не фрагменту каналу, а фрагменту перспективної активної зони.

– Імплементация таких функцій принципово не змінює розрахунковий алгоритм CFD коду і фактично може застосовуватися послідовно (на етапі постобробки).

Основним недоліком СПФ, який потрібно мінімізувати у майбутньому є проінтегрована форма УПФ. Тобто УПФ отримані при таких гіпотезах (наприклад сталість дотичних напружень), які в загальному не справедливі при «нелінійному» теплообміні. Підтвердженням недоліку проінтегрованої форми УПФ являється те, що необхідно обумовити вибір опорної температури, за якою розраховуються безрозмірні величини. Також УПФ не враховують особливостей балансу сил біля неадіабатичної стінки, що не дозволяє враховувати фізику пов'язану із структурою потоку надкритичного середовища. Таким чином, СПФ дозволяє враховувати лише зміну теплофізичних властивостей, що є лише однією з причини погіршеного теплообміну. Запропонована адаптація стосується лише температурної пристінкової функції, хоча коректніше розглядати адаптацію системи УПФ  $U^+ - T^+$ .

Варто також відзначити, що залишається відкритим питання введення спеціальних інженерних методів оцінки турбулентного числа Прандтля, яка є складовою не тільки рівняння енергії, але й СПФ. Після апробації СПФ щ відповідними функціями  $Pr_t$  стане остаточно зрозумілим межа застосування СПФ, які побудовані на базі алгебраїчних УПФ.

### **Список використаної літератури.**

1. Allegrini J., Dorer V., Defraeye T., Carmeliet J. An adaptive temperature wall function for mixed convective flows at exterior sur-faces of buildings in street canyons. *Building and Environment*. 2012. №49. pp. 55–66.
2. Popovac M., Hanjalic K. Compound Wall Treatment for RANS Computation of Complex Turbulent Flows and Heat Transfer. *Flow Turbulence Combust.* 2007. №78. pp. 177–202.
3. Кириллов П. Л., Терентьева М. И. Турбулентное число Прандтля (История и современность). Обнинск: ФЭИ– 3271. 2017. 56 с. (ISBN 978-5-906512-89-5).
4. Kader B. Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1981. №9. pp. 1541–1544.
5. Жлутков С. В., Аксенов А. А. Пристеночные функции для высокорейнольдсовых расчетов в программном комплексе FlowVision. Компьютерные исследования и моделирование. 2015. №6. С. 1221–1239.
6. Kurganov V. A., Kaptil'nyi A. G. Velocity and enthalpy Fields and eddy diffusivities in a heated supercritical fluid flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1992. №5. pp. 465–478.
7. Kurganov V. A., Kaptil'nyi A. G. Flow structure and turbulent transport of a supercritical pressure fluid in a vertical tube under the conditions of mixed convection. *Experimental data. Int. J. Heat Mass Transfer*. 1993. №36. pp. 3383–3392.

8. Жукаускас А., Шлянчюскас А. Теплоотдача в турбулентном потоке жидкости. Вильнюс: Минтис, 1973. С. 328.
9. Berni F., Fontanesi S. A 3D-CFD methodology to investigate boundary layers and assess the applicability of wall functions in actual industrial problems: A focus on incylinder simulations. *Applied Thermal Engineering*. 2020. №174. pp. 4–15.
10. Dubyk Y., Filonov V., Filonova Y., Kovalenko O. Deteriorated Heat Transfer Influence On the Stress-Strain State of SMR SCWR Fuel Bundles. *ASME J of Nuclear Rad Sci*. 2021. pp. 1–14.
11. Filonov V., Filonova Y., Dubyk Y., Pis'mennyi E. Transfer matrix method for analysis of flow thermohydraulic characteristics with extremely nonlinear behavior of thermophysical properties using channel approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. №15. С. 1–18.
12. Mokry S., Pioro I., Kirillov P., Gospodinov Y. Supercritical-water heat transfer in vertical bare tube. *Nuclear Engineering and Design*. 2010. №240. pp. 568–576.
13. Kurganov V. A., Maslakova I. V. Normal and deteriorated heat transfer upon heating of turbulent flows of heat carriers with variable physical properties in tubes. *High Temperature*. 2016. №54. pp. 577–598.
14. Filonov V., Filonova Y., Razumovskiy V., Pis'mennyi E. N. On experimental and computational investigation of heat transfer deterioration and hydraulic resistance in annular channel and SCWR 3-rod bundle. *Proceedings of the ICONE-26*. 2018.

V. Filonov<sup>1,2</sup>, Ph.D. student, ORCID 0000-0001-8123-026X

E. Pis'mennyi<sup>1</sup>, Dr. Tech. Sc., prof., ORCID 0000-0001-6403-6596

V. Razumovskiy<sup>1</sup>, Ph.D, ORCID 0000-0002-7326-5056

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

<sup>2</sup>IPP-Centre LLC

#### ADAPTATION OF TEMPERATURE WALL FUNCTION FOR CALCULATION THE HEAT TRANSFER AT SUPERCRITICAL COOLANT PARAMETERS

*To date, the engineering community pays special attention to the study, research and development of methods for predicting the behavior of the coolants at supercritical parameters. This paper discusses the problem of adaptation of the existing universal or specialized tools of thermohydraulic analysis for nonlinear heat transfer problems at supercritical coolant parameters with deterioration of heat transfer. Complexities of prediction the nonlinear heat transfer at supercritical parameters of the coolant by engineering methods of computational fluid dynamics are considered. A simple way to adapt the dual-zone Kader's temperature wall function on the basis of existing probe measurements for carbon dioxide is proposed. The problem of implementation into universal packages of computational fluid dynamics (CFD), which is based on the method of choosing the reference coordinate of the near-wall zone to determine the dynamic speed and dimensionless temperature, is discussed. The example on the ANSYS CFX using shows one of the ways to create a special user procedure, which has an improved tendency to predict the axial temperature profile with deteriorated heat transfer. Calibration and validation of the obtained results on the basis of experimental investigations for vertical pipes and rod assemblies of fuel simulators is carried out in the work. The paper also discusses the features of the proposed implementation, and formed recommendations for the application and further improvement of engineering approaches to predict the heat transfer deterioration at supercritical parameters of the coolant.*

**Keywords:** universal wall functions, supercritical parameters, CFD, deteriorated heat transfer

#### References:

1. J. Allegri, V. Dorer, T. Defraeye, J. Car-meliet, “An adaptive temperature wall function for mixed convective flows at exterior sur-faces of buildings in street canyons,” *Building and Environment*, vol. 49, pp. 55–66, 2012.
2. M. Popovac, K. Hanjalic, “Compound Wall Treatment for RANS Computation of Complex Turbulent Flows and Heat Transfer,” *Flow Turbulence Combust*, vol. 78, pp. 177–202, 2007.
3. P. Kirillov, M. Terent'eva, “Turbulent Prandtl number (History and present),” (In Russian), Obninsk: IPE, 3271, p. 56, 2017. (ISBN 978-5-906512-89-5).
4. B. Kader, “Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 9, pp. 1541–1544, 1981.
5. S. ZHlutkov, A. Aksenov, “Near-wall functions for high-Reynolds calculations in the FlowVision software package,” (In Russian), *Computer research and modeling*, vol. 6, pp. 1221–1239, 2015.

6. V. Kurganov, A. Kaptil'nyi, "Velocity and enthalpy Fields and eddy diffusivities in a heated supercritical fluid flow," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 5, pp. 465–478, 1992.
7. V. Kurganov, A. Kaptil'nyi, "Flow structure and turbulent transport of a supercritical pressure fluid in a vertical tube under the conditions of mixed convection. Experimental data," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 36, pp. 3383–3392, 1993.
8. A. Zhukauskas, A. Shlyanchauskas, "Heat transfer in a turbulent fluid flow," (In Russian), Vilnius: Mintis, pp. 328, 1973.
9. F. Berni, S. Fontanesi, "A 3D-CFD methodology to investigate boundary layers and assess the applicability of wall functions in actual industrial problems: A focus on incylinder simulations," *Applied Thermal Engineering*, vol. 174, pp. 4–15, 2020.
10. Y. Dubyk, V. Filonov, Y. Filonova, O. Kovalenko, "Deteriorated Heat Transfer Influence On the Stress-Strain State of SMR SCWR Fuel Bundles," *ASME J of Nuclear Rad Sci*, pp. 1–14, 2021.
11. V. Filonov, Y. Filonova, Y. Dubyk, E. Pis'mennyi, "Transfer matrix method for analysis of flow thermohydraulic characteristics with extremely nonlinear behavior of thermophysical properties using channel approach," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, pp. 1–18, 2022.
12. S. Mokry, I. Piro, P. Kirillov, Y. Gospodinov, "Supercritical-water heat transfer in vertical bare tube," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, pp. 568–576, 2010.
13. V. Kurganov, I. Maslakova, "Normal and deteriorated heat transfer upon heating of turbulent flows of heat carriers with variable physical properties in tubes," *High Temperature*, vol. 54, pp. 577–598, 2016.
14. V. Filonov, Y. Filonova, V. Razumovskiy, E. N. Pis'mennyi, "On experimental and computational investigation of heat transfer deterioration and hydraulic resistance in annular channel and SCWR 3-rod bundle," *Proceedings of the ICONE-26*, 2018.

Надійшла 09.11.2021  
Received 09.11.2021

В.П. Калінчик, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000 - 0003- 4028- 0185

В.А. Побігало, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000 - 0003- 2673 - 7329

В.В. Калінчик, канд. техн. наук, ORCID 0000 - 0003- 3931- 646X

О.В. Мейта, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4132-5202

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

В.Г. Скопирев, канд. техн. наук, ORCID 0000 - 0002- 4758- 802X

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»

## КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ВИРОБНИЧИХ ОБ'ЄКТІВ

*В статті досліджуються методи управління режимами електроспоживання. Показано, що дефіцит потужності в години пікових навантажень ускладнює підтримання балансу між потужностями генерації та споживання, що приводить до необхідності введення обмежень електричного навантаження виробничих споживачів і розвитку методів і засобів управління режимами електроспоживання. Необхідність управління енергоспоживанням обумовлена цілою низкою причин, у тому числі: 1) значною різницею між піком навантаження та нічним провалом в енергосистемах; 2) недостатньою регулюючою можливістю теплових електростанцій та АЕС для покриття змінної частини графіків навантаження; 3) несприятливою тенденцією зниження частки маневрених потужностей в енергосистемах, спричиненої укрупненням енергоблоків; 4) значними капітальними та енергетичними витратами, пов'язаними із спорудженням та експлуатацією пікових агрегатів; 5) технічною можливістю та економічною доцільністю штучного вирівнювання графіків навантаження. Показано, що на даний час відомі наступні методи управління електроспоживанням: по миттєвій нормі; по ідеальній нормі; управління по прогнозній величині; управління з використанням усередненої потужності на рухомому інтервалі часу (метод рухомого вікна) і комбіновані методи, що використовують різні сполучення, а також по розподілу управляючого впливу між споживачами - регуляторами (метод розподілу ресурсів). Крайім варто вважати такий метод управління, що забезпечує для більшого числа керованих споживачів випадковий за часом характер розподілу можливих нетривалих викидів навантаження, їх мінімальне абсолютне значення, а також більш повне використання споживачем заявленої потужності або виділених йому лімітів потужності та енергії. За зазначеними критеріями порівняємо перераховані методи управління. Причому, метод миттєвої норми реалізується при диспетчерському або автоматичному управлінні з використанням сигналу, пропорційного усередненій потужності за 1, 2 або 3 хвилини, метод ідеальної норми передбачає вимірювання усередненої потужності споживача за малі проміжки часу (до трьох хвилин) і порівняння цієї величини із заявленою (або лімітною) потужністю, управління із прогнозом полягає в тому, що керуючий сигнал формується як різниця між величиною можливої потужності і прогнозованої на кінець циклу управління. Для підвищення ефективності управління електроспоживанням запропоновано комбінований метод управління, який представляє собою синтез двох відомих методів - управління по ідеальній нормі та управління за прогнозною величиною електроспоживання, що дозволяє поєднати переваги обох методів. Умовою управління є підтримання такого режиму електроспоживання, при якому не перевищується задана потужність і її задана величина використовується максимально.*

*Виконання даної умови забезпечується відпрацюванням заданих кожному кроку управління обмежень. З огляду на те, що різні кроки управління мають різну реакцію управління на реальний процес, для різних кроків застосовані відповідні методи управління. На перших кроках, коли для прийняття оптимального керуючого впливу достатньо часу і його можна скорегувати, управління ведеться на підставі прогнозної величини електроспоживання, на останніх кроках, які несуть особливу відповідальність за процес управління, управління ведеться за методом ідеальної норми. Таким чином, в даному методі поєднані переваги управління по прогнозу (керуючий вплив обґрунтовується) і методу управління по ідеальній нормі (на останньому кроці управління, що дозволяє оптимально використовувати ліміт потужності, що залишився, і не перевищити заданої величини) з апіорно обґрунтованим порядком споживачів-регуляторів.*

**Ключові слова:** електроспоживання, управління, миттєва норма, ідеальна норма, прогноз, комбінований метод.

**Вступ.** В сформованій енергетичній галузі України базові електрогенеруючі потужності суттєво переважають маневрові, які вкрай необхідні для ефективного покриття потреб в електроенергії, особливо в періоди пікового попиту на неї [1, 2].

Дефіцит потужності в години пікових навантажень, екстенсивне використання електроенергії ускладнюють підтримання балансу між потужностями генерації та споживання. Все це привело до необхідності введення обмежень електричного навантаження виробничих споживачів.

Створення маневрових електроенергетичних потужностей вимагає значних коштів і, що не менш важливо, значного часу. Іншим шляхом вирішення цієї задачі є управління електроспоживанням, яке до останнього часу зв'язувалось з регулюванням потужності споживачів-регуляторів (СР) систем електропостачання (СЕ) промислових підприємств [1, 3].

Необхідність управління енергоспоживанням обумовлена цілою низкою причин [4], у тому числі:

- значною різницею між піком навантаження та нічним провалом в енергосистемах;
- недостатньою регулюючою можливістю теплових електростанцій та АЕС для покриття змінної частини графіків навантаження;
- несприятливою тенденцією зниження частки маневрених потужностей в енергосистемах, спричиненої укрупненням енергоблоків;
- значними капітальними та енергетичними витратами, пов'язаними із спорудженням та експлуатацією пікових агрегатів;
- технічною можливістю та економічною доцільністю штучного вирівнювання графіків навантаження.

На даний час відомі наступні методи управління електроспоживанням [5-10]: по миттєвій нормі; по ідеальній нормі; управління по прогнозній величині; управління з використанням усередненої потужності на рухомому інтервалі часу (метод рухомого вікна) і комбіновані методи, що використовують різні сполучення, а також по розподілу управляючого впливу між СР (метод розподілу ресурсів).

Кращим варто вважати такий метод управління, що забезпечує для більшого числа керованих споживачів випадковий за часом характер розподілу можливих нетривалих викидів навантаження, їх мінімальне абсолютне значення, а також більш повне використання споживачем заявленої потужності або виділених йому лімітів потужності та енергії. За зазначеними критеріями порівнюємо перераховані методи управління.

*Метод миттєвої норми.* Даний метод (рис. 1) передбачає вимірювання усередненої потужності споживача  $\bar{P}(t)$  за малі проміжки часу  $\tau_0$  (до трьох хвилин) і порівняння цієї величини із заявленою  $P_3$  (або лімітною  $P_n$ ) потужністю, тобто керуючий вплив запишеться:

$$\Delta P(t) = P_3 - \frac{1}{\tau_0} \int_{t-\tau_0}^t P(t) dt$$

де  $P(t)$  – поточне навантаження споживача;  $\Delta P(t)$  – керуючий вплив.

При  $\Delta P(t) < 0$  кероване навантаження споживачів-регуляторів знижується, а при  $\Delta P(t) > 0$  відновлюється до  $P_3$ .

Метод миттєвої норми реалізується при диспетчерському або автоматичному управління з використанням сигналу, пропорційного усередненій потужності за 1, 2 або 3 хвилини.

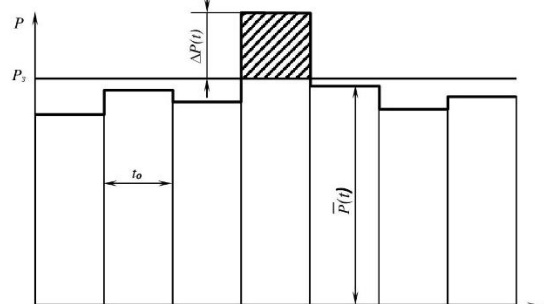


Рисунок 1 – Управління за методом миттєвої норми.

Основним недоліком управління по методу миттєвої норми є недовикористання споживачем заявленої  $P_3$  або лімітної  $P_n$  потужності на півгодинному проміжку часу усереднення  $T$ .

*Метод ідеальної норми.* Цей метод (рис. 2) управління електроспоживанням є інтегральним (тобто управління по енергії) і припускає практично повне використання заявленої  $P_3$  або лімітної  $P_n$  потужності. При регулюванні навантаження на дискретних півгодинних інтервалах часу  $T$  по даному методу управління (рис. 2) необхідно мати ту максимально можливу потужність  $P_0$ , що підприємство може споживати до закінчення півгодинних інтервалів часу  $T-\tau$ , щоб не перевищувати заявлену потужність  $P_3$  або  $P_n$ .



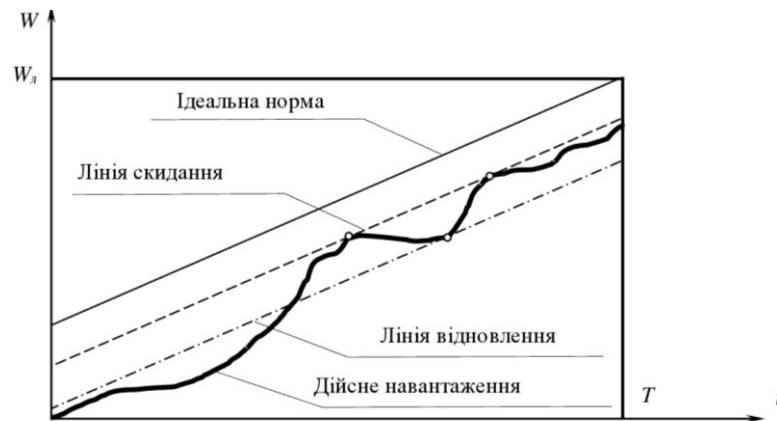


Рисунок 2 – Управління за методом ідеальної норми.

Виходячи з максимально можливого споживання енергії  $W_i = P_3 \cdot T$  за півгодинний проміжок часу, значення  $P_6$  визначиться з виразу

$$P_6 = \frac{P_3 T - \int_0^T P(t) dt}{T - \tau}.$$

Недоліками методу управління по ідеальній нормі є: 1) відсутність обмеження в споживаній потужності на початку півгодинних інтервалів часу  $T$ , що може привести до значних піків навантаження в енергосистемі в ці моменти часу при регулюванні по цьому методу на значній кількості підприємств. Звичайно, ці піки навантажень можна зменшити, задаючи початок максимумів навантаження зі зрушенням на кілька хвилин для кожного підприємства або групи підприємств, однак це приведе до великих незручностей і практично неприйнятно; 2) необхідність відключення значних навантажень наприкінці півгодинних інтервалів.

Ці недоліки обумовлені тим, що при такому методі управління здійснюється без урахування закону можливої зміни навантаження споживача, що приводить до необхідності відключення значних потужностей, або до недовикористання виділених лімітів.

*Управління із прогнозом.* Управління із прогнозом (рис 3) полягає в тому, що керуючий сигнал  $\Delta \bar{P}_{np}(t)$  формується як різниця між величиною можливої потужності  $P_6$  і прогнозованої  $\bar{P}_{np}(t)$  на кінець циклу управління або на кінець півгодинного проміжку часу  $T$

$$\Delta \bar{P}_{np}(t) = P_6 - \bar{P}_{np}(t)$$

Системи управління із прогнозом забезпечують більш повне використання заявленої потужності або відведених лімітів потужності й енергії. Однак відзначені вище основні недоліки залишаються. Крім того, через неминучі помилки прогнозування є деяка ймовірність перевищення заданого ліміту електроспоживання.

Застосування розглянутих методів у конкретних умовах диктується в основному ступенем напруженості технологічного процесу з погляду виконання виробничих завдань при введенні обмежень потужності. За основні критерії визначення межі прийнятності використовується економічна доцільність і технологічна допустимість.

Згідно [7] метод миттєвої норми використовується при рідких перевищеннях, метод ідеальної норми та за прогнозом використовуються при частих перевищеннях (до 4-х значень навантаження на контрольному інтервалі).

**Метою роботи є** підвищення ефективності управління режимами електроспоживання.

**Викладення основного матеріалу.** Для підвищення ефективності управління електроспоживанням запропоновано комбінований метод управління, який представляє собою синтез двох відомих - методів - управління по ідеальній нормі та управління за прогнозною величиною електроспоживання [6,7], що дозволяє поєднати переваги обох методів.

Умовою управління є підтримання такого режиму електроспоживання, при якому не перевищується задана на час  $T$  потужність і її задана величина використовується максимально, тобто

$$\left. \begin{array}{l} P_3^T \geq P_t^T \\ P_3^T - P_t^T \rightarrow \min \end{array} \right\}, \quad (1)$$

де  $P_3^T$  – заявлена (лімітуєма) на час  $T$  потужність;  $P_t^T$  – поточна  $T$ -хвилинна потужність об'єкта.



Рисунок 3 – Управління із прогнозом.

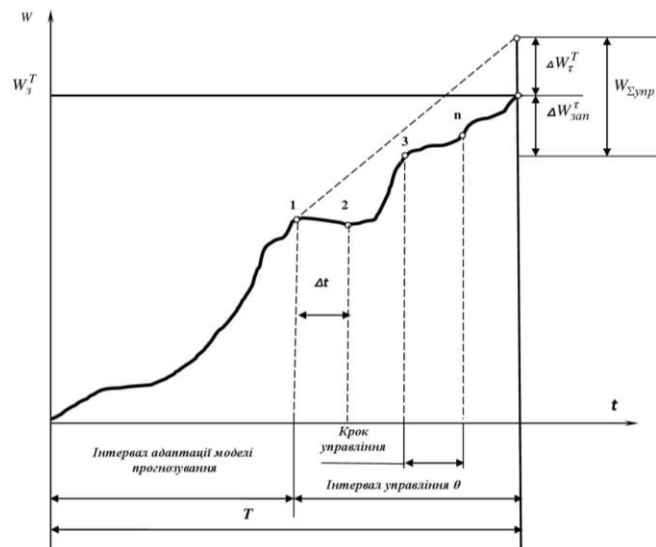


Рисунок 4. Принцип управління електроспоживанням за комбінованим методом

Виконання умови (1) забезпечується відпрацюванням заданих кожному кроку управління обмежень. З огляду на те, що різні кроки управління мають різну реакцією управління на реальний процес, для різних кроків застосовані відповідні методи управління. На перших кроках, коли для прийняття оптимального керуючого впливу достатньо часу і його можна скорегувати, управління ведеться на підставі прогнозної величини електроспоживання, на останніх кроках, які несуть особливу відповідальність за процес управління, управління ведеться за методом ідеальної норми.

Принцип управління за даним методом показаний на рисунку 4. Інтервал контролю  $T$  розбивається на  $N$  підінтервалів

$$N = T / \Delta t, \quad (2)$$

де  $\Delta t$  – крок прогнозу (управління).

На рисунку 5 показано укрупнений алгоритм управління електроспоживанням. На перших  $N - \tau$  кроках проводиться адаптація моделі прогнозу до реального процесу електроспоживання (блок 1). На  $\tau$  ( $\tau = \theta / \Delta t$ ) кроках, що залишилися, здійснюється управління електроспоживання.

Починаючи з першого кроку управління, обчислюється величина можливого перевищення заданого значення електроспоживання (блок 2). Залежно від величини перевищення приймається рішення необхідності управління (блок 3).

При необхідності управління вирішується задача відключення споживачів-регуляторів (СР) з урахуванням їх пріоритету (блок 4). У блоці 5 аналізується, на якому етапі перебуває процес управління електроспоживанням і, якщо це останній крок, то управління ведеться за методом ідеальної норми (блок 6).

На першому кроці управління перевіряється необхідність відключення споживачів-регуляторів в залежності від очікуваного перевищення. Нехай в точці 1 (див рис.1) на підставі прогнозованої величини електроспоживання на кінець контрольованого інтервалу  $T$  очікується перевищення заданої величини рівної

$$W_3^T = P_3^T \cdot T \quad (3)$$

на величину

$$\Delta W_\tau^T = \hat{W}_\tau^T - W_3^T, \quad (4)$$

де  $\hat{W}_\tau^T$  – прогнозне значення електроспоживання на кінець інтервалу  $T$ .

Визначається величина запасу електроенергії з урахуванням знаку  $(\pm \Delta W_{zan}^\tau)$  для випадку, якщо в точці 1 провести відключення всіх працюючих СР.

$$(\pm \Delta W_{zan}^\tau) = \tau \Delta t \sum_{p=1}^n P_p x_p - \Delta W_\tau^T, \quad (5)$$

де  $\tau$  – кількість кроків управління, що залишилися;

$P_p$  – потужність  $p$ -го СР;

$x_p$  – індикатор стану  $p$ -го ПР.

$$x_p = \begin{cases} 0 & \text{– якщо споживач не працює,} \\ 1 & \text{– якщо споживач працює.} \end{cases}$$

Якщо  $\pm \Delta W_{zan}^\tau < 0$ , то виробляється сигнал на відключення всіх СР.

Якщо  $\pm \Delta W_{zan}^\tau \geq 0$ , то визначається запас енергії для випадку, якщо відключення СР на величину  $\Delta W_\tau^T$  провести в наступній точці управління

$$\pm \Delta W_{zan}^{\tau-1} = (\tau - 1) \Delta t \sum_{p=1}^n P_p x_p - \Delta \hat{W}_\tau^T. \quad (6)$$

Таким чином, перевіряється можливість перенесення управляючої дії на СР в наступну точку управління і, якщо  $\pm \Delta W_{zan}^{\tau-1} \geq 0$ , то здійснювати управління в точці 1 недоцільно. Якщо

ж  $\pm \Delta W_{zan}^{\tau-1} < 0$ , тобто запас є, але на величину меншу, ніж  $\Delta t \sum_{p=1}^n P_p x_p$ , то в цьому випадку

необхідно відключити таку частину СР, яка компенсувала б  $\Delta W_{zan}^{\tau-1}$ . Для цього знайдемо неузгодженість між

$\Delta W_{zan}^{\tau-1}$  і електроспоживання за час  $\Delta t$  першого за пріоритетом працюючого споживача

$$\Delta W_p^{\Delta t} = \Delta W_{zan}^{\tau-1} - P_1 \cdot \Delta t. \quad (7)$$

Якщо  $\Delta W_p^{\Delta t} \leq 0$ , то для компенсації достатньо відключити один СР, в іншому випадку  $(\Delta W_p^{\Delta t} > 0)$  перевіряється умова

$$\Delta W_p^{\Delta t} = \Delta W_{zan}^{\tau-1} - (P_1 + P_2) \cdot \Delta t \quad (8)$$

і в загальному вигляді

$$\Delta W_p^{\Delta t} = \Delta W_{zan}^{\tau-1} - \Delta t \sum_{p=1}^n P_p. \quad (9)$$

На наступних кроках управління проводиться корекція управляючого впливу і можливі чотири варіанти поведінки управляючої системи в залежності від очікуваного перевищення заявленої потужності (або ліміту потужності)  $P_3^T$  і результатів рішення алгоритму на першому кроці управління.

Варіант 1. Початковою умовою рішення алгоритму управління на по-наступних кроках є факт вироблення керуючого впливу на попередньому кроці управління (в іншому випадку працює алгоритм першого кроку управління).

Нехай очікується перевищення  $W_3^T$  на величину  $\Delta W_{zan}^T$ . Перевіряється умова (6) і, якщо  $\Delta W_{zan}^{\tau-1} \leq 0$ , то виробляється сигнал на відключення всіх інших ПР (і видачу аварійного сигналу).

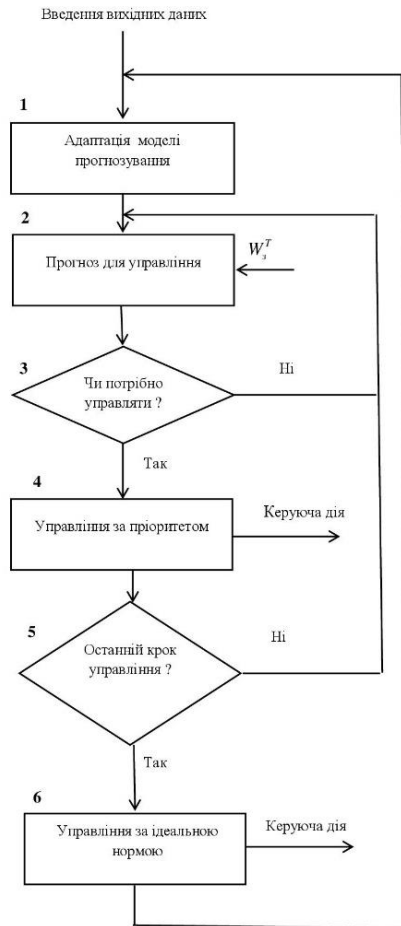


Рисунок 5. Алгоритм управління електроспоживанням за комбінованим методом

Варіант 2. Нехай очікується перевищення  $W_3^T$  на величину  $\Delta W_{\tau-1}^T$ , але  $\Delta W_{zan}^{\tau-1} > 0$ , тоді знаходимо співвідношення

$$K = \frac{\Delta W_{\tau-1}^T}{\Delta W_{\tau}^T} \quad (10)$$

і якщо для другого кроку управління  $K \leq (\tau-1)/\tau$ , для третього  $K \leq (\tau-1)/(\tau-1)$  і для  $n$ -го  $K \leq [\tau-(n-1)]/[\tau-(n-2)]$ , тобто очікуване перевищення зменшилася пропорційно відношенню порядкового номера поточного кроку управління до попереднього, це означає, що керуючий вплив вибраний на попередньому кроці достатній для підтримки в нормі реального процесу електроспоживання. В цьому випадку додаткове відключення навантаження не проводиться.

Варіант 3. Умови аналогічні умовам варіанту 2, але  $K > [\tau-(n-1)]/[\tau-(n-2)]$ .

У цьому випадку необхідно провести додаткове відключення навантаження. Величина додаткового навантаження, що відключається  $W_{\text{дон}}^{\Delta t}$ , визначається з умови

$$\frac{\Delta W_{\tau-1}^T - W_{\text{дон}}^{\Delta t}}{\Delta W_{\tau}^T} \leq C; \quad C = \frac{\tau-(n-1)}{\tau-(n-2)}, \quad (11)$$

звідки

$$W_{\text{дон}}^{\Delta t} = \Delta W_{\tau-1}^T - C \Delta W_{\tau}^T. \quad (12)$$

Вибір додаткових відключаємих СР здійснюється відповідно до (9), вважаючи, що  $\Delta W_{zan}^{\tau-1} = W_{\text{дон}}^{\Delta t}$  і, з огляду на відключених СР.

Варіант 4. На підставі прогнозу перевищення заданої величини не очікується, тобто  $\Delta W_{\tau-1}^T \leq 0$ . У цьому випадку проводиться відновлення навантаження в порядку зворотному відключення. Величина дозволеного до відновлення навантаження дорівнює

$$W_b^{\Delta t} = \Delta W_{\tau-1}^T. \quad (13)$$

На останньому кроці управління, якщо не очікується перевищення заданої величини, залишається в силі вплив, вироблений на попередньому кроці.

Якщо очікується перевищення на величину  $\Delta W_{\tau-n}^T$ , то управління ведеться за методом ідеальної норми. Причому останній крок управління ділиться на  $m$  рівних часових відрізків. В кінці кожного відрізка перевіряється відповідність реального електроспоживання  $W_t$  з нормою на даний момент  $W_n$  і в разі перевищення норми проводиться відключення навантаження до кінця контролююмого інтервалу  $T$  на величину

$$W_{відкл} = W_t - W_n, \quad (14)$$

незалежно від поведінки процесу електроспоживання на наступних контролююмих відрізках.

По закінченню інтервалу  $T$  проводиться відновлення всієї відключеного навантаження.

Таким чином, в даному методі з'єднанні переваги управління по прогнозу (керуючий вплив обґрунтовується) і методу управління по ідеальній нормі (на останньому кроці управління, що дозволяє оптимально використовувати ліміт потужності, що залишився, і не перевищити заданої величини) з апіорно обґрунтованим порядком споживачів-регуляторів.

**Висновок.** Застосування різних методів управління електроспоживання диктується в основному ступенем напруженості технологічного процесу з погляду виконання виробничих завдань при введенні обмежень потужності. За основні критерії визначення межі застосовності методів управління електроспоживання використовуються економічна доцільність і технологічна допустимість. Запропонований комбінований метод управління представляє собою синтез двох відомих - методів - управління по ідеальній нормі та управління за прогнозою величиною електроспоживання і поєднує переваги обох методів - керуючий вплив обґрунтований (управління по прогнозу) при оптимально обґрунтованому використанню ліміту потужності (управління на останньому кроці по ідеальній нормі).

#### Список використаної літератури

1. Чокин Ш.Ч., Лойтер Э.Э. Управление нагрузкой электроэнергосистем. - Алма-Ата, Наука, 1985. - 288 с.
2. Скляр В.Ф., Праховник А.В., Экель П.Я. О многокритериальном управлении электропотреблением // Электронное моделирование. - 1987, т. 9, № 5. - С. 61 - 65.
3. Праховник А.В., Калинин В.П., Экель П.Я. К управлению электропотреблением в условиях дефицита энергоресурсов // Изв. ВУЗов СССР. Энергетика. - 1986. - № 10. С.11 - 15.
4. В. Тубинис. Управление электропотреблением. Зарубежные технические средства [Электронный ресурс]. - 2007. - Режим доступа: <http://www.news.elteh.u>
5. Застосування методу ідеальної норми для диспетчерського регулювання максимуму навантаження / Калінчик В.П., Несен Л.І., Суменко К.Ю.; НТУУ „КПІ” Н.-д. ін-т автоматики та енергетики „Енергія”. - Київ, 2013. - 9 с.: іл. - Бібліогр.: 5 назв. - Укр. - Деп. в ДНТБ України 18.04.13, № 10 - Ук 2013.
6. В.П.Калінчик, Л.І.Несен, О.В.Витвицький. Огляд і аналіз методів управління електроспоживанням/ Збірник наукових праць. Матеріали XXXVII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції „Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії” - Переяслав-Хмельницький. - 2017.- С.160-163.
7. Праховник А.В. Методы и средства управления электропотреблением. - Киев: Общество “Знание”, 1981. - 25 с.
8. Праховник А.В. Автоматизация управления электропотреблением. // Изв. вузов. Энергетика, - 1984, - № 12, - С. 3 - 10.
9. Праховник А.В., Розен В.П., Дегтярев В.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий.- М.: Недра, - 1985,- 231с.
10. В.П.Калінчик. Методологія оперативного управління споживанням електричної енергії/ Енергетика: економіка, технології, екологія - 2013. - № 1. - С. 47 - 51

V.P. Kalinchyk, Ph.D., ORCID 0000 - 0003- 4028- 0185

V.A. Pobigaylo, Ph.D., ORCID 0000 - 0003- 2673 - 7329

O.V.Meita, Ph.D., ORCID 0000-0002-4132-5202

V.V. Kalinchyk, Ph.D., ORCID 0000 - 0003- 3931- 646X

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

V.G. Skosyrev, Ph.D., ORCID 0000 - 0002- 4758- 802X

State Higher Education Institution «Pryazovskyi State Technical University»

#### COMBINED METHOD OF ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION MANAGEMENT OF PRODUCTION FACILITIES

*The article investigates the methods of power consumption control. It is shown that the power shortage during peak hours makes it difficult to maintain a balance between generation and consumption capacity, which*

leads to the need to introduce restrictions on the electrical load of industrial consumers and the development of methods and tools to control power consumption. The need to manage energy consumption is due to a number of reasons, including: 1) the significant difference between peak load and night failure in power systems; 2) insufficient regulatory capacity of thermal power plants and nuclear power plants to cover the variable part of load schedules; 3) unfavorable tendency to reduce the share of shunting capacity in power systems caused by the consolidation of power units; 4) significant capital and energy costs associated with the construction and operation of peak units; 5) technical feasibility and economic feasibility of artificial alignment of load schedules. It is shown that the following methods of power consumption control are currently known: instantaneous rate; at the ideal norm; management on the forecast value; control with the use of average power on a moving time interval (moving window method) and combined methods that use different combinations, as well as the distribution of control influence between consumers - regulators (resource allocation method). It is better to consider such a control method that provides for a larger number of managed consumers random time distribution of possible short-term emissions, their minimum absolute value, as well as more complete use by the consumer of the declared capacity or allocated power and energy limits. According to these criteria, the listed management methods are compared. Moreover, the method of instantaneous rate is implemented in control or automatic control using a signal proportional to the average power for 1, 2 or 3 minutes, the method of the ideal norm involves measuring the average power of the consumer for short periods of time (up to three minutes) and comparing this value with the declared ( or limit) power, control with prediction is that the control signal is formed as the difference between the amount of possible power and predicted at the end of the control cycle. To increase the efficiency of power consumption management, a combined control method is proposed, which is a synthesis of two known methods - control at the ideal norm and control over the predicted value of power consumption, which combines the advantages of both methods. The condition of management is maintenance of such mode of power consumption at which the set capacity is not exceeded and its set value is used as much as possible. Fulfillment of this condition is provided by working off of the restrictions set to each step of management. Due to the fact that different control steps have different control reactions to the real process, appropriate control methods are used for different steps. In the first steps, when there is enough time to adopt the optimal control effect and it can be adjusted, the control is based on the forecast value of electricity consumption, in the last steps, which have special responsibility for the control process; control is carried out by the ideal norm. Thus, this method combines the advantages of forecast management (control effect is justified) and the method of management at the ideal norm (in the last step of management, which allows optimal use of the remaining power limit and not exceed the specified value) with a priori justified order of consumers-regulators.

**Key words:** electric energy consumption, management, instantaneous rate, ideal norm, forecast, combined method.

#### References

1. S. Chokin, E. Loiter. Power system load management. - Almaty, Nauka, 1985. - 288 p.
2. V. Skliarov, A. Prakhovnik, P. Ekel. Multicriteria load management in power systems // Elektronnoe modelirovanie. - 1987, т. 9, № 5. - p. 61 - 65.
3. A. Prakhovnik, V. Kalinchyk, P. Ekel. To manage electricity consumption in conditions of energy shortage // Izv. VUZof SSSR. Energetika. - 1986. - № 10. p.11 - 15.
4. V. Tubinis. Power consumption management. Foreign technical means 2007. – <http://www.news.elteh.ru>
5. Application of the ideal norm method for control of maximum load control / V. Kalinchyk, L. Nesen, K. Sumenko; NTUU „KPI” NDI „Energia”. – Kyiv, 2013. – 9 p.: il. – Biblio.: 5 names. – Ukr. – Dep. v DNTB Ukrainy 18.04.13, № 10 – Uk 2013.
6. V. Kalinchyk, L. Nesen, O. Vytvytskyi. Review and analysis of power consumption management methods / Collection of scientific works. Proceedings of the XXXVII International Scientific and Practical Internet Conference „Problemy ta perspektyvy rozvytku nauky na pochatku tretoho tysiacholittia u krainah Evropy ta Azii” – Pereiaslav. – 2017.- p.160-163.
7. A. Prakhovnik. Methods and means of power management. - Kyiv: Obshestvo “Znanie”, 1981. - 25 p.
8. A. Prakhovnik. Automation of power consumption management. // Izv. vuzov. Energetika, - 1984, - № 12, - p. 3 - 10.
9. A. Prakhovnik, V. Rozen, V. Dehtiarov. Energy saving modes of power supply of mining enterprises.- M.: Nedra, - 1985,- 231p.
10. V. Kalinchyk. Methodology of operative management of electric energy consumption / Enerhetika: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia – 2013. - № 1. – p. 47 – 51.

Надійшла 19.10.2021

Received 19.10.2021

# ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

УДК 621.175.845, 621.184.4

DOI 10.20535/1813-5420.4.2021.257271

С.В. Новаківський, к.т.н, доцент, ORCID 0000-0002-8682-5710

А.В. Неділько, аспірант, ORCID 0000-0002-4030-2332

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЗАСТОСУВАННЯ КОНДЕНСАЦІЙНИХ ЕКОНОМАЙЗЕРІВ НА ГАЗОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА ВОДОГРІЙНИХ КОТЛАХ

*Розглянуто забезпечення підвищення рівня безпеки електростанції при аварійному відключенні, а також підвищення ККД котла. Відключення ТЕЦ від електромережі несе за собою насамперед загрозу припинення відпуску теплоносія у місто і, як наслідок, людських та матеріальних втрат. Розроблений один з варіантів недопущення або мінімізації наслідків такої аварії на міських ТЕЦ, який являє собою систему швидкого відновлення живлення електростанції незалежно від зовнішніх обставин шляхом встановлення конденсаційного теплообмінника та турбіни на органічному циклі Ренкіна. Така турбіна може слугувати як пускорезервне джерело живлення станції, так і працювати разом з паровою турбіною, підвищуючи ККД блоку в цілому. Дана система являється універсальною для блоків, що працюють на природньому газі.*

**Ключові слова:** конденсаційний економайзер, турбіна на органічному циклі Ренкіна, котел, парціальний тиск водяних парів, енергобезпека.

**Вступ.** Низькопотенційна теплота, отримана в результаті утилізації димових газів зазвичай використовується для нагріву сирової води при підготовці живильної і підживлювальної води для котлів і теплових мереж. Також води для технологічних потреб промислових підприємств, мережної води систем опалення та гарячого водопостачання. Рідше – для підігріву повітря в опалювально-вентиляційних системах. [1, 3, 4]. Для нагріву холодної підживлювальної води парових котлів і систем теплопостачання потрібно істотно більша кількість теплоти, ніж її може бути отримано в процесі утилізації [1,6]. Тому більш привабливою є ідея використання в якості підживлювальної води конденсату, який утворюється з продуктів згоряння природного газу, але для цього потрібно задіяти значну кількість ресурсу, так як конденсат є корозійно активним [2,5]. Використання утилізаційної теплоти в системах опалення обмежується попереднім підігрівом мережної води перед подачею її в водогрійний котел, а також періодичністю роботи теплових мереж. При цьому ККД утилізаційної системи підвищується незначно (на 3 - 6%). Більш ефективним є нагрів води з температурою 5 - 15 °С в системах гарячого водопостачання, але зворотна температура досягає 20-70 °С. Для усунення добової періодичності споживання води досить ефективним є застосування баків-акумуляторів [6]. У цьому випадку підвищення ККД системи може становити 10 - 15%. Це показує, що ефективність утилізатора теплоти обмежується параметрами робочого тіла .

Альтернативним варіантом є підвищення ККД парового котла до 10% шляхом підігріву саме органічно тіла і вироблення більш цінного ресурсу – електричної енергії на турбіні з органічним теплоносієм [10] .

Великі міста України, такі як Київ, Харків, Дніпро, Запоріжжя і т.д. значно залежать від централізованого теплопостачання. Саме ТЕЦ призначені для централізованого забезпечення теплом промислових підприємств, житлових та адміністративних будівель з одночасним постачанням електроенергії в енергосистему України.

При аварійному відключенні ТЕЦ страждає ринок електричної енергії, але насамперед комунальні споживачі теплової енергії. Перебої в теплопостачанні можуть призвести до негативних наслідків для життя та здоров'я людей, а також зруйнувати зношені теплові мережі через замерзання, що може призвести до значних аварій у місті. Таке відключення ТЕЦ можливе, як наслідок аварії на станції, так і в випадку особливої системної аварії, при якій відбувається знеструмлення більшої частини території України.

Відновлення живлення станції відбувається шляхом відбору електричної енергії з ОЕС України, акумуляторної підстанції або шляхом ввімкнення в роботу дизельних генераторів, якщо вони передбачені. Пуск блоку відбувається з будь-якого стану після відновлення живлення на власні потреби.

Пуск блоків потужністю більше 100 МВт потребує попереднього прогріву, що вимагає або наявність пускорезервної котельні (ПРК) або від інших станцій міста. Відповідно, у випадку аварій техногенного фактору не завжди є можливість запуску станцій з холодного стану і вони повинні мати або пускорезервні котельні, або резервні джерела тепло- та електро- забезпечення.

#### **Мета роботи**

Обґрунтування можливості застосування турбін на органічному циклі Ренкіна, як пускорезервного джерела на електростанціях.

Аналіз роботи системи котел-конденсаційний економайзер-турбіни на органічному циклі Ренкіна.

#### **Результати досліджень**

В даній статті розглянута Київська ТЕЦ-5, яка складається з двох блоків 100 МВт і двох блоків 250 МВт. На даній станції немає ПРК, а відновлення роботи станції відбувається шляхом пуску блоку 100 МВт, а у випадку неможливості пуску блоків 100 МВт - шляхом подачі пари з інших ТЕЦ. Авторами пропонується встановлення конденсаційного теплообмінника (КТ) та турбіни, яка працює на органічному циклі (Organic Rankine cycle, далі – ORC) на блоці 100 МВт. Дане рішення може бути реалізоване на всіх великих ТЕЦ та ТЕС, які використовують газоподібне паливо не залежно від їх потужності.

Для забезпечення пуску блоку з будь-якого стану в найкоротші строки та відновлення життєздатності станції джерелом теплоти для турбіни на органічному циклі являються відхідні гази котла при використанні газоподібного палива або теплогенератора.

Конденсаційний теплообмінник розташовується за регенеративними повітря-підігрівачами (рис. 1) та перед димососом. Він призначений для підігріву робочого тіла до температури насичення. Всередині змійовика конденсаційного економайзера теплоносієм є аміак, ззовні трубки омиваються димовими газами, охолоджуються до температури нижче температури насичення з відведенням конденсату. В якості матеріалу труб для КТ був обраний біметал. Через високу корозійну активність конденсату поверхня труби виконана із матеріалу сталь 20. Задля збільшення коефіцієнту теплопровідності поверхня труби оребрена, а зі сторони робочого тіла поверхня виконана із алюмінію.

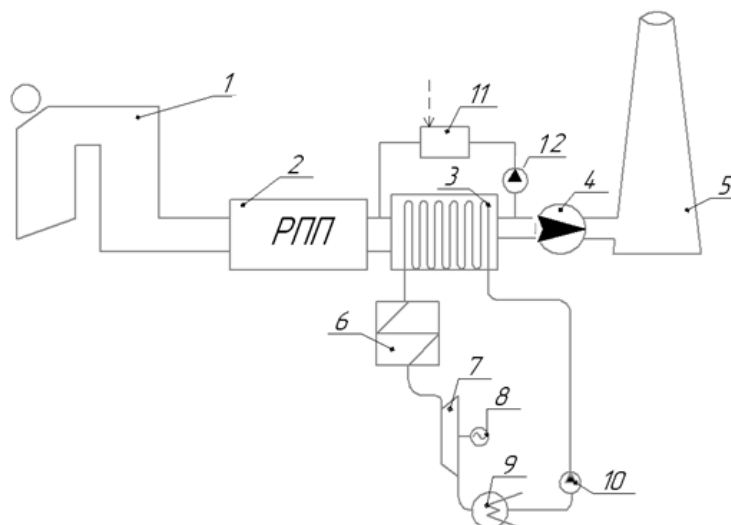


Рисунок 1- Використання конденсаційного теплообмінника з турбіною на органічному циклі.

1- котел, 2- регенеративний повітряпідігрівач, 3-конденсаційний економайзер, 4- димосос, 5- димова труба, 6- паровий теплообмінник, 7- турбіна, 8- генератор, 9- конденсатор, 10 - живильний насос, 11- теплогенератор, 12 – вентилятор.

В якості робочого тіла було обрано аміак, який має високу теплотворну здатність, нульовий потенціал глобального потепління, а також дешевий у порівнянні з іншими робочими тілами [9,10]. Цикл роботи робочого тіла було побудовано у програмному середовищі CoolPack [13] та зображено на рисунку 2. Параметри в ключових точках представлені в таблиці 1.

Для унеможливлення конденсації всередині газового тракту за конденсаційним теплообмінником, а також на димовій трубі, димові гази на вході підмішуються до димових газів на виході. Після розрахунку було встановлено, що температура димових газів після конденсаційного теплообмінника становить 30 °С, а після підмішування склала 70 °С.



Таблиця 1 - Параметри робочого тіла

Точка, №	Температура, °С	Тиск, бар	Ентальпія, кДж/кг	Теплота пароутворення, кДж/кг
1	20	8,5	292	-
2	30	50	312	-
3	90	50	656	823
4	90	50	1426	-
5	130	50	1616	-
6	20	8,5	1479	1178

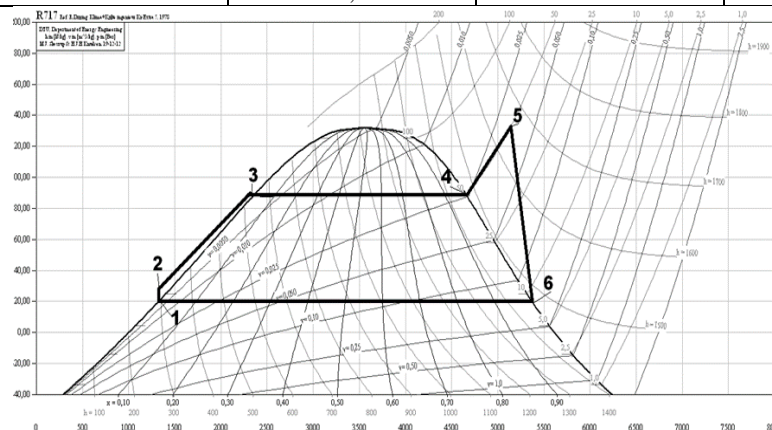


Рисунок 2 – Цикл роботи аміаку на ТС діаграмі

1-2- підвищення тиску насосом, 2-3- нагрівання в конденсаційному економайзері, 3-4 кипіння робочого тіла, 4-5- перегрівання робочого тіла, 5-6-розширення пари в турбіні, 6-1- конденсація робочого тіла

Підвищення тиску до 5 МПа відбувається за допомогою живильного насоса 10 (процес 1-2). Робоче тіло поступає в конденсаційний теплообмінник, де нагрівається до температури насичення 90°C (процес 2-3). Пари аміаку поступають до проміжного парового теплообмінника, де перегріваються до температури 130 °С (процес 4-5) парю з ІІІ відбору парової турбіни [12]. Перегріта пара поступає до турбіни, розширюється і приводить в дію ротор турбіни (процес 5-6). Після розширення в турбіні пара потрапляє в конденсатор, де конденсується до температури 20 °С і подається на живильний насос (процес 6-1).

При встановленні ORC турбіни процес відновлення живлення відбувається за допомогою теплогенератора. Схема запуску ORC турбіни представлена на рисунку 3.

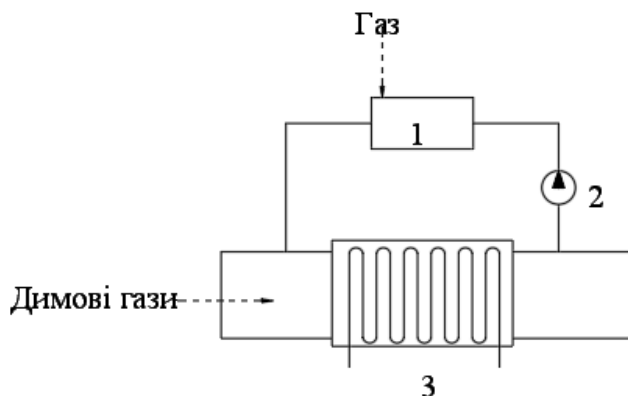


Рисунок 3 – Відновлення живлення за допомогою теплогенератора. 1-Теплогенератор, 2- вентилятор, 3- конденсаційний теплообмінник.

Природний газ подається в теплогенератор, де в результаті спалювання утворюються гарячі димові гази, якими підігрівается робоче тіло. Для недопущення перегріву робочого тіла на виході з теплогенератора використовується рециркуляція димових газів. При досяганні температури в 90 °С перегріті пари аміаку з тиском 5,0 МПа поступають на турбіну. Енергія обертання турбіни передається на генератор. При отриманні пускової потужності виконується пуск блоку згідно з інструкцією по експлуатації [11, 12].

**Результати математичного розрахунку конденсаційного теплообмінника на різних режимах роботи котельного агрегату**

Вхідними даними для розрахунку є результат розрахунку котла Е-480-560-140 ГМ [14]. Мінімальна робоча потужність котла становить 50 % від номінальної (240 т/г). Вихідні дані для розрахунку конденсаційного економайзера представлені в таблиці 2. Крок по потужності було взято згідно режимної карти котла [11].

Таблиця 2 - Параметри продуктів згорання на виході з котла в залежності від навантаження.

Точка, №	Величина	Розмірність	Показник						
			50	58	66	75	83	91	100
1	Потужність блоку	%	50	58	66	75	83	91	100
2	Продуктивність котла	т/г	240	280	320	360	400	440	480
3	Надлишок повітря за котлом (за РВП)	-	1,95	1,79	1,69	1,62	1,58	1,54	1,52
4	Об'ємна витрата продуктів згорання на виході з котла	м <sup>3</sup> /сек	53,45	61,68	68,53	76,75	84,98	93,20	100,0
5	Температура продуктів згорання на виході з котла		107	110	113	115	118	121	124
6	Ентальпія продуктів згорання на виході з котла	кДж/м <sup>3</sup>	2454	2524	2594	2641	2711	2782	2852

Результати розрахунку параметрів димових газів на виході з КТ представлені в залежності від потужності блоку наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 - Параметри продуктів згорання на виході з конденсаційного теплообмінника.

Величина	Розмірність	Показник						
		50	58	66	75	83	91	100
Потужність блоку	%	50	58	66	75	83	91	100
Надлишок повітря в ДГ за КТ	-	2	1,84	1,74	1,67	1,62	1,58	1,55
Вологовміст в ДГ за КТ	кг/кг с.п.	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Температура ДГ за КТ		30	30	30	30	30	30	30
Ентальпія ДГ за КТ	кДж/м <sup>3</sup>	685	739	766	783	797	805	812

Мінімальна температура ДГ на виході з КТ обумовлена температурою на вході в КТ, яка становить 20 °С. При даних умовах охолодження ДГ (табл. 3) були розраховані, в залежності від потужності блоку - потенціал ДГ, температура точки роси, парціального тиску водяних парів, кількість конденсату та теоретична потужність ORC турбіни (табл. 4).

Таблиця 4 - Параметри теплоносія та продуктів згорання в конденсаційному економайзері в залежності від навантаження котла

Величина	Розмірність	Показник						
Потужність блоку	%	<b>50</b>	<b>58</b>	<b>66</b>	<b>75</b>	<b>83</b>	<b>91</b>	<b>100</b>
Середній коефіцієнт надлишку повітря в КТ	-	1,97	1,81	1,71	1,64	1,6	1,56	1,54
Температура насичення водяних парів		49,92	51,32	52,28	52,99	53,41	53,84	54,07
Парціальний тиск водяних парів в відхідних газах	МПа	0,012	0,013	0,0137	0,0142	0,0144	0,0148	0,0149
Кількість конденсату	кг/м <sup>3</sup>	1,225	1,253	1,276	1,288	1,301	1,315	1,326
Потенціал димових газів	кВт	23033	27042	30674	34760	39177	43775	47807
Температура точки роси	°С	55	57	58,6	59,88	60,9	61,72	65
Витрата робочого тіла через КТ	кг/с	12,95	15,45	17,79	20,35	23,25	26,31	29,07
Потужність блоку	%	<b>50</b>	<b>58</b>	<b>66</b>	<b>75</b>	<b>83</b>	<b>91</b>	<b>100</b>
Питома витрата пари	кг/кВт	2627	2627	2627	2627	2627	2627	2627
Питома витрата димових газів	м <sup>3</sup> /кВт	10848	10491	10123	9910	9605	9310	9043
Потужність ОРС турбіни	кВт	1770	2120	2440	2790	3180	3600	3980

Потенціал димових газів розраховувався за формулою:

$$Q_{ДГ} = [(I'_{KE} - I''_{KE}) + (G_{конд} \cdot r)] \cdot B_p, \quad (1)$$

де  $I'_{KE}$  - ентальпія димових газів на вході в конденсаційний економайзер,  $I''_{KE}$  - ентальпія димових газів на виході з конденсаційного теплообмінника [14],  $G_{конд}$  - кількість конденсату,  $r$  - теплота конденсації в залежності від парціального тиску.

Основним обмеженням глибокого охолодження димових газів є конденсація водяної пари, яка міститься у продуктах згорання, на газоходах, димососах та димовій трубі. Визначення недоохолодження димових газів наведено в таблиці 5. Авторами взято припущення, що загальна температура димових газів не повинна бути менша 70 0С. Така температура досягається шляхом підмішування димових на виході з котла до димових газів на виході з конденсаційного теплообмінника. Параметри ДГ після КТ та перед димовою трубою представлені в таблиці 5.

Розрахунок підмішування гарячих димових газів на виході з котла до димових газів на виході з КТ виконано з запасом, щоб уникнути конденсації водяних парів в газовому тракті димососа і димової труби, але якщо покрити димову трубу корозійностійким матеріалом або враховувати димові гази з інших котлів, які потрапляють в димову трубу можна значно підвищити потужність конденсаційного теплообмінника, а як наслідок турбіни, що працює на органічному циклі.

Таким чином було визначено максимальну потужність обладнання, яку можна забезпечити при відповідному навантаженні котла (табл. 6).

Перегрів парів робочого тіла відбувається за допомогою пароперегрівника. В пароперегрівник поступає пара з III відбору турбіни з тиском 1,13 МПа, температурою 190 °С і витратою 1 кг/с [12]. Відношення витрати пари на пароперегрівач до паропродуктивності турбіни наведено в таблиці 6.

Таблиця 5 - Параметри ДГ на виході з конденсаційного економайзера в залежності від навантаження блоку.

Величина	Розмірність	Показник						
Потужність блоку	%	<b>50</b>	<b>58</b>	<b>66</b>	<b>75</b>	<b>83</b>	<b>91</b>	<b>100</b>
Відсоток підмішування ДГ	%	37,38	36,36	35,4	34,78	33,9	33,06	32,26
Запас температури до точки роси	°С	15	13	11,4	10,12	9,09	8,27	5
Температура після підмішування	°С	70	70	70	70	70	70	70
Вологовміст після підмішування	г/кг с.п	15,82	16,06	16,29	16,43	16,64	16,85	17,04

Таблиця 6 - Параметри обладнання в залежності від навантаження котла

Величина	Розмірність	Показник						
Потужність блоку	%	<b>50</b>	<b>58</b>	<b>66</b>	<b>75</b>	<b>83</b>	<b>91</b>	<b>100</b>
Потужність КТ	кВт	14423	17209	19816	22670	25897	29304	32385
Потужність ОРС турбіни	кВт	1770	2120	2440	2790	3180	3600	3980
Потужність Пароперегрівника	кВт	2460	2935	3380	3866	4417	4998	5524
Доля відбору пари з парової турбіни	%	0,015	0,012857	0,01125	0,01	0,009	0,008182	0,0075
Потужність Конденсатору	кВт	15368	18336	21115	24155	27594	31224	34508

Потужність конденсаційного теплообмінника розраховується за формулою:

$$N_{KE} = Q_{ДГ} \cdot \frac{100 - V_{\%}}{100}, \quad (2)$$

де  $Q_{ДГ}$  - потенціал димових газів,  $V_{\%}$  - відсоток підмішування димових газів [14].

Для порівняння наведена діаграма порівняння ентальпії продуктів згорання на виході з котла та конденсаційного економайзера (рис.4), а також величина вологовмісту димових газів після котла, конденсаційного теплообмінника та після підмішування гарячих димових газів (рис.5).

Можна зазначити, що при збільшенні навантаження котла збільшується витрата палива і зменшується коефіцієнт надлишку повітря, що в свою чергу збільшує значення ентальпії димових газів на виході з котла. Різниця між значеннями ентальпії димових газів на виході з котла та ентальпії димових газів на виході з конденсаційного теплообмінника являє собою корисно використану теплоту в останньому.

На рисунку 5 зображена залежність вологовмісту ДГ на вході до теплообмінника, після теплообмінника та після підмішування гарячих ДГ від навантаження котла. Вологовміст продуктів згорання зростає пропорційно навантаженню котла, що пояснюється парціальним тиском водяних парів, які зворотнопропорційно залежать від коефіцієнту надлишку повітря (табл. 2). Вологовміст після підмішування ДГ підтримується постійним здала запобігання конденсації вологи в димовій трубі. Температура ДГ може підвищуватися за рахунок підмішування ДГ з паралельно працюючих котлів або парових колекторів.

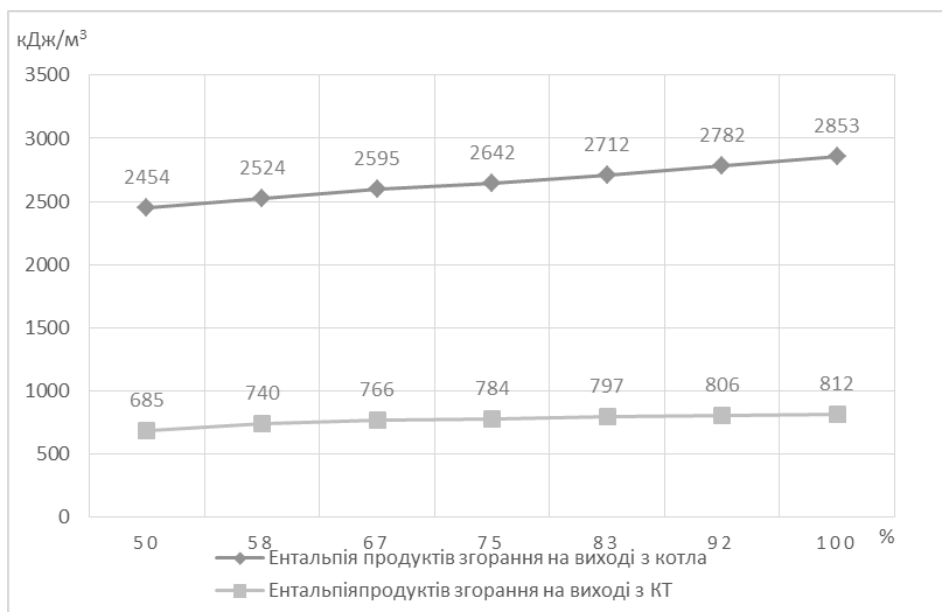


Рисунок 4 - діаграма порівняння ентальпії продуктів згорання на виході з котла та конденсаційного економайзера

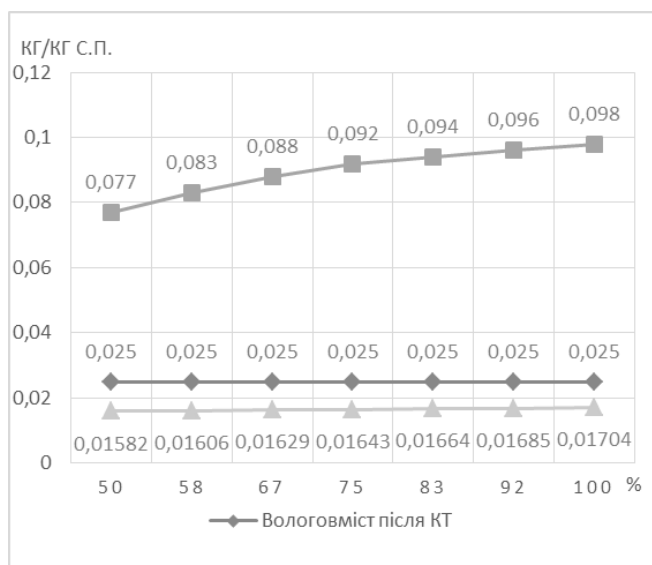


Рисунок 5 - діаграма порівняння вологовмісту димових газів після котла, конденсаційного економайзера та після підмішування гарячих димових газів

### Висновки

Дана установка дозволяє збільшити тепловий та електричний ККД блоку в залежності від навантаження котла (паропродуктивність котла 240 - 480 т/г) відповідно на 5-10 % та 2-4 % шляхом вироблення електричної енергії від 1774 до 3982 кВт. Теплова потужність КТ становить від 14 МВт до 32 МВт. Теплова потужність пароперегрівника становить від 2,5 МВт до 5,5 МВт, конденсатора від 15,3 МВт до 34,5 МВт.

Основним обмеженням глибокого охолодження димових газів є конденсація водяної пари, яка міститься у продуктах згорання на газоходах, димососах та димовій трубі, тому температура на виході з КТ завищена. Також в розрахунках враховано підмішування відхідних газів котла до відхідних газів КТ.

За рахунок встановлення системи конденсаційний теплообмінник – ORC турбіна ТЕЦ має можливість запустити блок з будь-якого теплового стану незалежно від наявності зовнішнього живлення та підвищити надійність роботи. В результаті впровадження даної системи на ТЕЦ підвищується

надійність на випадок аварій. В порівнянні з пасивно працюючими резервними джерелами (такі як ПРК або дизельні генератори), які необхідно постійно обслуговувати незалежно від потреби в активації, дана активна система дозволяє забезпечувати додаткове вироблення електричної енергії. Вироблення електричної енергії за рахунок відхідних газів являє собою інноваційний підхід в національному енергетичному секторі, який дозволяє збільшити економічність роботи станції. Слід зазначити, що система є універсальною для кожного енергоблоку, який працює на газоподібному паливі, так як система дозволяє перетворити низкопотенційну теплоту в електричну енергію.

#### **Список використаної літератури**

- 1.Баскаков А.П. Реальные возможности повышения энергетической эффективности газовых отопительных котельных / А.П. Баскаков, В.А. Мунц, Н.Ф. Филипповский, Е.В. Черпанова // Промышленная энергетика. – 2005. – № 9. – С. 22 – 26.
- 2.Бельский А.П., Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях // Учебное пособие. — СПб.: СПб ГТУРП, 2012. — 136 с.
- 3.Evaluation of Exhaust Gas Condensing Economizer Installation at Riga CHP Plants. Proceedings of RENVA Annual Conference 2015 “Advanced HVAC and Natural Gas Technologies” Riga, Latvia, May 6 – 9, 2015. Aris Zigurs<sup>1</sup>, Maris Kunickis<sup>2</sup>, Maris Balodis<sup>3</sup>, Olegs Linkevics<sup>4</sup>, Ilmars Stuklis<sup>5</sup>, Polina Ivanova<sup>6</sup>, 1–6 JSC Latvenergo
- 4.Vourdasa, N., Jouharab, H., Savvas, A., Tassoub, Vassilis N., Stathopoulos (2018). Design criteria for coatings in next generation condensing economizers. Energy Procedia 161 (2019) 412–420
- 5.DeFrees, J., Stuckey, R. and Foote, J. (2007). Condensing economizers. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE)
- 6.Heaphy, J. P., Carbonara, J., Litzke, W., Butcher, T. A. (1993). Condensing economizers for thermal efficiency improvements and emissions control. Conference: 10. annual international Pittsburgh coal conference: coal - energy and the environment, (United States),20-24 Sep 1993
- 7.Теплоэлектроцентраль №5 КИЕВЕНЕРГО – 2021. Режим доступу до ресурсу: <http://www.kievenergo.com.ua/ru/filials/tec-5>
- 8.С.Н. Виноградов, К.В. Таранцев, О.С. Виноградов Расчет теплообменников / ПГУ, Пенза, 2001-53 с.
- 9.Б.Н. Максимов, В.Г. Барабанов, И.Л. Серушкин и др. Промышленные фторорганические продукты: справочное издание / Б.Н.Максимов, В.Г.Барабанов, И.Л.Серушкин и др.. — 2-е, перераб. и доп. — СПб.: «Химия», 1996. — 544 с
- 10.Гринман М. И. Перспективы применения энергетических установок малой мощности с низкотемпературными рабочими телами /М. И. Гринман, В. А. Фомин // Энергомашиностроение, 2006. – № 1. – С. 63–69.
- 11.Г.И. Жихар Котельные установки тепловых электростанций / Высшая школа, Минск, 2015, 517 с..
- 12.Е.И. Бененсон, Л.С. Иоффе Теплофикационные паровые турбины// М.:Энергоатомиздат, 1986, 271 с.
- 13.Комплекс утиліт, призначених для проведення розрахунків і побудови моделей холодильних систем CoolPack. Режим доступу до ресурсу: <https://www.ipu.dk/products/coolpack/>.
- 14.Тепловой расчет котлов (нормативный метод) изд.3 / ВТИ и ЦКТИ – НПО ЦКТИ, СПб, 1998. – 256 с.
- 15.Програма для розрахунку властивостей води, водяної пари, газів і газових сумішей WaterSteamPro. Режим доступу до ресурсу: <http://www.wsp.ru/ru/download.asp>.

**Evgeniy Novakivskiy**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-8682-5710

**Andrii Nedilko**, PhD stud. ORCID 0000-0002-4030-2332

**National Technical University of Ukraine**

**“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

#### **APPLICATION OF CONDENSATION ECONOMIZERS ON GAS ENERGY AND WATER HEATING BOILERS**

*The provision of increasing the level of safety of the power plant in case of emergency shutdown, as well as increasing the efficiency of the boiler is considered. Disconnection of CHP from the grid entails, first of all, the threat of cessation of heat water supply to the city and, as a consequence, human and material losses. One of the options to prevent or minimize the consequences of such an accident at municipal CHPs, which is a system of rapid power recovery of the power plant regardless of external circumstances by installing a condensing heat*

*exchanger and turbine on the organic cycle Rankin. Such a turbine can serve as a start-up power source for the station, and work together with a steam turbine, increasing the efficiency of the unit as a whole. This system is universal for units running on natural gas.*

**Keywords:** *condensing economizer, turbine with organic cycle, boiler, temperature, pressure.*

#### References

1. Baskakov A.P. Real opportunities to improve the energy efficiency of gas heating boilers / A.P. Baskakov, V.A. Munts, N.F. Filippovsky, E.V. Cherepanova // *Industrial Energy*. - 2005. - No. 9. - p. 22 - 26.
2. Belsky A.P., Lakomkin V.Yu., Smorodin S.N. Energy saving in heat power engineering and heat technologies // *Textbook*. - St. Petersburg: St. Petersburg GTURP, 2012. - 136 p.
3. Evaluation of Exhaust Gas Condensing Economizer Installation at Riga CHP Plants. Proceedings of REHVA Annual Conference 2015 "Advanced HVAC and Natural Gas Technologies" Riga, Latvia, May 6 – 9, 2015. Aris Zigurs<sup>1</sup>, Maris Kunickis<sup>2</sup>, Maris Balodis<sup>3</sup>, Olegs Linkevics<sup>4</sup>, Ilmars Stuklis<sup>5</sup>, Polina Ivanova<sup>6</sup>, 1–6 JSC Latvenergo
4. Vourdasa, N., Jouharab, H., Savvas, A., Tassoub, Vassilis N., Stathopoulos (2018). Design criteria for coatings in next generation condensing economizers. *Energy Procedia* 161 (2019) 412–420
5. DeFrees, J., Stuckey, R. and Foote, J. (2007). Condensing economizers. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE)
6. Heaphy, J. P., Carbonara, J., Litzke, W., Butcher, T. A. (1993). Condensing economizers for thermal efficiency improvements and emissions control. Conference: 10. annual international Pittsburgh coal conference: coal - energy and the environment, (United States), 20-24 Sep 1993
7. Combined heat and power plant No. 5 KIEVENERGO - 2021. Access mode: <http://www.kievenergo.com.ua/ru/filials/tec-5>
8. S.N. Vinogradov, K.V. Tarantsev, O.S. Vinogradov Calculation of heat exchangers / PGU, Penza, 2001-53 p.
9. B.N. Maksimov, V.G. Barabanov, I.L. Serushkin et al. Industrial organofluorine products: a reference edition / B.N. Maksimov, V.G. Barabanov, I.L. Serushkin et al. - 2nd, revised. and additional - St. Petersburg: "Chemistry", 1996. - 544 p.
10. Grinman M.I. Prospects for the use of low-power power plants with low-boiling working bodies / M. I. Grinman, V. A. Fomin // *Power Engineering*, 2006. - No 1. - P. 63–69.
11. G.I. Zhikhar Boiler plants of thermal power plants / Higher School, Minsk, 2015, 517 pp..
12. E.I. Benenson, L.S. Ioffe Cogeneration steam turbines // M.: Energoatomizdat, 1986, 271 p.
13. A set of utilities that are used to carry out surveys and inspire models of CoolPack refrigeration systems Access mode: <https://www.ipu.dk/products/coolpack/>.
14. Thermal calculation of boilers (normative method) ed. 3 / VTI and CKTI - NPO CKTI, St. Petersburg, 1998. - 256 p.
15. Program for the analysis of the power of water, water vapor, gas and gas mixtures WaterSteamPro. Access mode: <http://www.wsp.ru/ru/download.asp>.

Надійшла 10.10.2021  
Received 10.10.2021

## ТЕПЛООБМІН У ВИТИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ ПРИ ЗМІНІ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Стаття присвячена удосконаленню методики розрахунку теплообміну і аеродинаміки витих теплообмінників шляхом модифікації залежностей, які враховують конкретні умови експлуатації і дозволяють визначити конструктивні характеристики витих одношарових рекуперативних теплообмінників, що розташовані в кільцевих каналах в умовах часткового закручення потоку теплоносія. Для досягнення поставленої мети дослідження проведено фізичний експеримент на експериментальній установці, схема якої і методика проведення досліджень представлена у роботі.

Аналіз результатів експериментального дослідження процесів теплообміну при вимушеній конвекції газу в витому теплообміннику при ламінарному режимі руху теплоносія дозволив встановити залежність коефіцієнту тепловіддачі від основних геометричних характеристик теплообмінника, а також визначити поправки, які враховують вплив на інтенсивність теплообміну крокових характеристик трубного пучка і зазору між трубним пучком і корпусом теплообмінника. Отримані залежності дозволяють виконати оптимізацію геометричних характеристик витих теплообмінників, розташованих в кільцевих каналах для конкретних умов експлуатації.

**Ключові слова:** витий теплообмінник, частково закручені потоки, конвективний теплообмін у кільцевих каналах, геометричні характеристики витих теплообмінників.

### Прийняті позначення

d, D - діаметр, мм;  
L - довжина, мм;  
S - крок;  
t - температура, оС;  
W - швидкість, м/с;  
Z - західність;  
 $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $\delta$  - товщина, мм;  
 $\varepsilon$  - поправка;  
 $\varphi$  - кут навивки, о (град);  
 $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);  
 $\nu$  - кінематичний коефіцієнт в'язкості, м<sup>2</sup>/с;  
 $\rho$  - густина, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\sigma$  - безрозмірний крок

Прийняті числа подібності:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad \text{- число Нуссельта}$$

$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu} \quad \text{- число Рейнольдса}$$

### Прийняті нижні індекси:

max - максимальне значення  
min - мінімальне значення  
1 - поперечний  
2 - поздовжній  
вн - внутрішній  
г - газ  
з - зазор  
і - номер шару навивки  
е - еквівалентний  
к - конвективний  
кр - крокові характеристики  
т - теплоносій  
тр.п - трубний пучок  
тр - труба  
ш - шар навивки

### Вступ

Удосконалення конструкції теплообмінних апаратів є одним з основних методів енергозбереження, підвищення техніко-економічних показників енергетичних установок і подовження безпечного періоду експлуатації. Виті теплообмінники відносяться до кожухотрубних рекуперативних апаратів. Вони знайшли широке застосування в технологічних процесах виробництва зріджених газів, на підприємствах нафтохімії та в енергетиці завдяки компактності, технологічності виготовлення і здатності до компенсації температурних напружень [1,2]. Висока ефективність витих теплообмінників пов'язана з гідродинамічними процесами в міжтрубному просторі. Виникнення вторинних течій, інтенсифікація теплообміну в кормовій частині труби пов'язано з закруткою потоку, що є наслідком дії відцентрових сил.



Не зважаючи на те, що гідродинаміці і теплообміну в витих теплообмінниках присвячена значна кількість робіт механізм течії і теплообмін досліджені недостатньо.

Найбільший інтерес представляє рішення зовнішньої задачі - теплообмін між робочим тілом і зовнішньою поверхнею трубного пучка. Це пов'язано з тим, що в залежності від величини зазору рух робочого тіла може змінюватись від повздовжнього, при умові коли зовнішній і внутрішній діаметр змійовика дорівнює діаметру корпусу і внутрішньої вставки, і до руху з частковою закруткою потоку, яка призводить до руйнування вихрової структури у кормовій частині труби і, таким чином, сприяє зростанню інтенсивності теплообміну.

Аналіз літературних даних, присвячених дослідженню теплообміну в витих теплообмінниках, не дає повної картини стосовно процесів теплообміну і аеродинамічного опору. Формування поля швидкості залежить не тільки від параметрів теплоносія але, в значній мірі, і від геометричних характеристик трубного пучка. Поєднання наведених факторів визначають ефективність теплообміну. Метою багатьох досліджень було визначення інтегральних характеристик процесів. У [3, 4, 5] представлені розрахункові формули для визначення коефіцієнтів тепловіддачі і аеродинамічного опору при обтіканні зовні трубного пучка, але діапазон їх застосування достатньо обмежений. Основною причиною, яка ускладнює виконання проектування установок, в склад яких включені виті теплообмінники, це відсутність комплексного підходу до вибору конфігурації трубчатої поверхні з урахуванням конкретних умов експлуатації, теплофізичних властивостей і параметрів теплоносіїв. Слід також відмітити, що однією з важливих причин, яка стримує застосування витих теплообмінних поверхонь у конструкціях теплообмінників, є відсутність надійних інженерних методик розрахунку теплообміну та аеродинамічного опору.

#### **Мета та завдання дослідження**

Метою даної роботи є удосконалення методики розрахунку теплообміну витих теплообмінників шляхом модифікації розрахункових залежностей. Це можливо шляхом введення в них відповідних поправок, які враховують вплив геометричних характеристик трубного пучка на інтенсивність теплообміну. Для реалізації поставленої мети необхідно:

- провести експериментальне дослідження по визначенню впливу на інтенсивність теплообміну крокових характеристик пучка і зазорів між трубною поверхнею і корпусом теплообмінника;
- отримати у безрозмірному виді поправки, які враховують вплив геометричних характеристик витого теплообмінника на інтенсивність теплообміну при вимушеній конвекції в кільцевих каналах.

#### **Характерні особливості конструкцій витих теплообмінників**

Витий теплообмінник рекуперативного типу конструктивно виконується у вигляді витієї поверхні з труб малого діаметру. Схема руху теплоносіїв зазвичай протитокова для трубної поверхні, виготовленої з паралельно включених труб, які об'єднані колекторами, або змішана, що характерно для багатошарових конструкцій, виготовлених з однієї суцільної трубки яка навивається декількома шарами з різними діаметрами навивки і розташовується в корпусі фіксованої довжини. Для багатошарових одноходових конструкцій сусідні шари можуть мати протилежний або однаковий напрям навивання.

Основними перевагами конструкцій витих теплообмінників є компактність, можливість компенсації температурних напружень, значний термін експлуатації, інтенсифікація процесів теплообміну завдяки закрутці потоку.

При виборі конструкції витого теплообмінника необхідно враховувати вид теплоносія і робочого тіла, параметри (тиск і температуру, агрегатний стан), теплову потужність і гідравлічний опір. Для збільшення величини температурного напору зазвичай обирається протитокова схема руху теплоносія і робочого тіла.

До основних геометричних характеристик відносяться: площа теплообміну, діаметр труби, товщина стінки, довжина корпусу, діаметр корпусу внутрішній, діаметр внутрішньої вставки, відносний крок навивання теплообмінної поверхні, зазор між корпусом і теплообмінною поверхнею, кількість шарів, західність (кількість труб в одному шарі).

Витий теплообмінник має декілька конструктивних особливостей, які безпосередньо впливають на його техніко-економічні показники і пов'язані з умовами експлуатації. Тому виті теплообмінники поділяють на групи. До першої групи можливо віднести технологічні обмеження виготовлення, друга група визначає особливості конструкції, які обумовлені процесом, і третя група повинна враховувати специфіку гідродинаміки і теплообміну в апараті.

На відміну від традиційних рекуперативних колекторних трубчатих теплообмінників, в яких крокові характеристики визначаються з урахуванням міцності і забруднення поверхні при роботі на запылених теплоносіях, при проектуванні витих теплообмінників необхідно враховувати додатково західність, або кількість труб шару пучка, яка обмежується довжиною периметра колектора і кутом навивки труби. Ці характеристики пучка труб пов'язані між собою. Максимальна західність може бути досягнута:

$$Z_{\text{зах}}^{\text{max}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{тр.п}}}{S_1}, \quad (1)$$

де  $D_{\text{тр.п}}$  – діаметр трубного пучка, м;  $S_1$  – поперечний крок труб пучка.

В цьому випадку кут навивки  $\varphi$  становить  $90^\circ$  і пучок буде виконаний з прямих труб.

Максимальний кут навивки забезпечується тоді, коли труби в шарі безпосередньо знаходяться одна біля одної. Для такого випадку західність шару визначається:

$$Z_{\text{зах}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{тр.п}} \cdot \sin \varphi}{d_{\text{тр}}}, \quad (2)$$

де  $d_{\text{тр}}$  – діаметр труби, м.

При мінімальному значенні кута навивки  $\varphi$  західність шару має мінімальне значення  $Z_{\text{зах}}^{\text{min}} = 1$ .

Аналіз відомих конструкцій витих теплообмінників типу Хемпсона [6], які знайшли широке застосування у криогенній техніці, свідчить, що характерним для таких конструкцій є багат шаровість (від 1 до 5 і більше) з однаковим або зустрічним напрямом витка. Крім того, кут навивки труб всіх шарів однаковий. Враховуючи цю обставину, довжина труб кожного шару є різною. Ця різниця між сусідніми шарами в порівнянні з середнім значенням довжини становить

$$\ell_{i\text{ш}} = \bar{\ell}_{\text{тр}} \pm \Delta \ell_{\text{трш}} = \bar{\ell}_{\text{тр}} \pm \frac{2 \cdot \pi}{\cos \varphi} \cdot S_2 \cdot Z, \quad (3)$$

де  $\bar{\ell}_{\text{тр}}$  – середня довжина трубок теплообмінника, м;  $S_2$  – повздовжній крок навивки;  $Z$  – західність; «+» - для шару з більшим діаметром навивки, у порівнянні з середнім, «-» - з меншим діаметром.

Геометрична відмінність труб різних шарів і площі вільного перерізу, в якому знаходиться шар, є причиною виникнення гідравлічної розвірки і, як наслідок, теплогідравлічної.

По визначенню, гідравлічна розвірка це відношення масової витрати теплоносія через розвірену трубу або шар  $(W \cdot \rho)_{\text{тр}}$ , до середньої масової витрати через витий теплообмінник  $(\bar{W} \cdot \rho)$  [7]:

$$\rho_{\Pi} = \frac{(W \cdot \rho)_{\text{тр}}}{(\bar{W} \cdot \rho)}. \quad (4)$$

Слід звернути увагу на те, що шари конструктивно розташовують з зазором  $\delta_3$  між поверхнею шару і корпусом, або без нього. Крім того, на осі витого теплообмінника можливе розташування направляючої циліндричної вставки.

Наведений аналіз зміни геометричних характеристик може істотно вплинути на гідродинаміку руху теплоносія в міжтрубному просторі і на техніко-економічні характеристики обладнання.

Бажання виконати максимально компактним витий теплообмінник приводить до зниження інтенсивності процесу теплообміну між теплоносієм і зовнішньою поверхнею трубного пучка. Зменшення зазору між корпусом, внутрішньою вставкою і витотою поверхнею або між шарами приводить до переходу від режиму з частковою закруткою потоку до поздовжнього руху по гвинтовій лінії в каналі, який утворюється сусідніми трубами. Виявити вплив крокових характеристик на процеси теплообміну в багат шарових конструкціях витих теплообмінників при наявності розвірок не можливо з достатньою точністю.

На підставі наведеного, проведення досліджень теплообміну з метою виявлення впливу геометричних характеристик витого пучка на інтенсивність процесу є актуальною задачею.

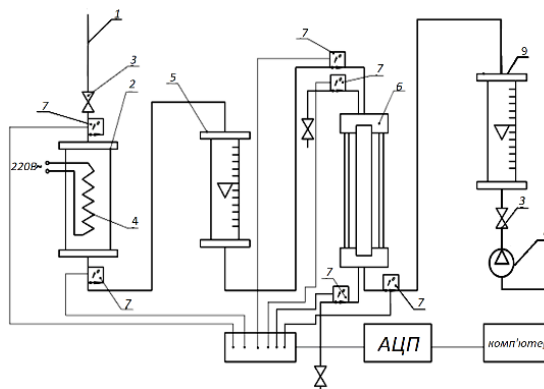
#### **Експериментальний стенд і методика досліджень**

Дослідження конвективного теплообміну і аеродинамічного опору витих теплообмінників розташованих в кільцевих каналах при поперечному їх обтіканні газовим потоком (рис. 1) здійснювалися на експериментальній установці, що представляла собою аеродинамічну трубу розімкнутого типу круглого перерізу (рис. 2), розміри якої склали: діаметр  $D_{\text{вн}} = 38,5$  мм, довжиною каналу –  $L = 1000$  мм.

Проточна частина (прямий канал), яка складалася з робочої і гідродинамічної стабілізуючої ділянок, призначеної для вирівнювання полів швидкості і статичного тиску. Стабілізаційна ділянка приєднувалась до камери термічної стабілізації, вимірювального вузла, який складався з двох ротаметрів типу РС-5 і одного типу РМ-7, вентилятора продуктивністю  $100 \text{ м}^3/\text{год}$  і напором до  $1,5 \text{ кПа}$ .



Рисунок - 1 Виті теплообмінники. Вид загальний



1 – магістраль водопостачання; 2 – електронагрівач; 3 – запірна арматура; 4 – нагрівальний елемент; 5 – ротаметр по воді; 6 – дослідна ділянка; 7 – термопари; 8 – вентилятор;  
9 – система ротаметрів по газу

Рисунок 2 - Схема експериментальної установки

Для створення кільцевого каналу в робочу ділянку встановлювалась на осі циліндрична вставка, яка мала конічні кінці. Максимальна швидкість у „живому” перерізі робочої ділянки змінювалась в діапазоні (0,68...12) м/с.

У стінки прямого каналу на відстані 0,25 м від переднього фланця перед зразком витого теплообмінника і на відстані 0,25 м від заднього фланця робочої ділянки впаяні штуцера діаметром 1,5 мм для відбору статичного тиску .

До складу експериментальної установки включені такі вимірювальні прилади:

- ротаметри типу РС-5 і РМ-7 для визначення об’ємної витрати повітря класом точності 1,0;
- мікроманометр типу ММН-240 для визначення перепаду статичного тиску труби при дослідженні аеродинамічного опору;
- для визначення тиску навколишнього середовища застосовувався барометр-анероїд типу БАММ класом точності 1,0;
- для виміру потужності нагрівача камери термостабілізації застосовувався ватметр типу Д529 класом точності 0,5;
- температура повітря на вході в експериментальну установку вимірювалась ртутним термометром з ціною поділки 0,1 °С;
- температурне поле визначалось за допомогою хромель-копелевих термопар (діаметр дроту 0,1 мм). Сигнали від термопар надсилались в аналогово-цифровий перетворювач І7018, підключений до комп’ютера, та автоматично записувались і виводилися на монітор.

#### **Конструкція і характеристики досліджуваних витих теплообмінників**

Для зменшення масогабаритних характеристик виті теплообмінники, які використовуються в кріогенній техніці, виготовляються в один або декілька шарів. Витий пучок розташовується в корпусі в кільцевому каналі між внутрішньою поверхнею корпусу і зовнішньою поверхнею циліндричної вставки. Як наголошувалось раніше, багатошаровість конструкції трубного пучка значно ускладнює методику розрахунку в наслідок виникнення розвірок. З метою зменшення впливу даного фактору дослідження проводились на одношаровій однозахідній конструкції витого теплообмінника. Теплообмінники виготовлялись з різними кутами навивання і зазорами між корпусом і поверхнею, виготовленої з мідної труби. Діаметр труби складав 2,7 мм.

Для визначення середньо-інтегральних характеристик інтенсивності теплообміну проводилось вимірювання температур на вході і виході взаємодіючих фаз (рідини і газового потоку) з витого теплообмінника за допомогою хромель-копелевих термопар, які встановлювались в гільзи виготовлених з мідної трубки діаметром 1,5 мм.

З метою визначення локальних характеристик процесу теплообміну проводилось вимірювання температурного поля в кільцевому зазорі між внутрішньою поверхнею прямої ділянки і циліндричною вставкою за допомогою зонда в якому розташовувалась термопара. Зонд вводився через задній фланець проти руху газового середовища.

Температура стінки витого теплообмінника вимірювалась хромель-копелевими термопарами діаметром дроту 0,1мм. Корольок термопари зачеканювався в стінку трубки, а місце розташування покривалось зовні термостійким лаком. Крок розташування термопар змінювався в залежності від координати перерізу, в якому проводилось вимірювання. На початковій ділянці витого теплообмінника термопари встановлювались на кожному витку, а потім крок розташування збільшувався до (3...10) витків. Виведення термопар з дослідного зразка витого теплообмінника проводилось через внутрішній простір циліндричної вставки.

На зовнішню поверхню корпусу прямої ділянки наносилась теплова ізоляція з пінополістіролу, який має коефіцієнт теплопровідності 0,01 Вт/(м·К). Для визначення теплового балансу дослідів і визначення теплових втрат в навколишнє середовище виконувалось вимірювання температури зовнішньої поверхні ізоляційного шару термопарами.

Дослідження теплообміну витих теплообмінників проводились при стаціонарних режимах. Досліди виконувалися тільки при нагріванні потоку тому, що в реалізованих режимних умовах величина коефіцієнта тепловіддачі практично не залежить від напрямку теплового потоку. У процесі проведення експериментів визначалися середні і локальні коефіцієнти тепловіддачі.

За визначальний розмір у числах Nu та Re приймався діаметр трубки витого теплообмінника  $d_{тр}$ . Теплофізичні параметри повітря  $\lambda$ ,  $\nu$ , що входять у вирази для чисел Nu і Re, відносилися до середньої температури повітря  $t_r$ .

#### **Результати досліджень**

При проектуванні теплообмінного обладнання необхідно передбачити використання тих чи інших методів інтенсифікації процесів. На практиці знайшло широке застосування закрутки потоку теплоносія. Особливістю закручених потоків є виникнення областей течії в яких відцентрові сили сприяють розвитку збурень або, навпаки, зменшують їх дію. Відцентрові сили, які виникають в закручених потоках під дією обертальної складової швидкості відтискають потік до стінки каналу, внаслідок чого відбувається перерозподіл осьової швидкості. Перебудова профіля осьової швидкості по довжині є причиною виникнення радіальної складової швидкості.

На практиці застосовуються способи повного або часткової закрутки потоку. Основною перевагою часткової закрутки потоку є вплив на процес формування пограничного шару без значного зростання аеродинамічного опору теплообмінника.

Часткова закрутка потоку можливо досягти використовуючи шнекові завихрювачі, які встановлюються з певним зазором від стінки, дотові завихрювачі, крім того, використовуються спіральні накатки, а також спіральне оребрення. Конструкція витого теплообмінника сама створює умови для закрутки потоку без застосування додаткових пристроїв.

Оцінити вплив закрутки потоку теплоносія на гідродинаміку і теплообмін можливо шляхом введення в рівняння подібності відповідних безрозмірних чисел. В [8] пропонується використовувати інтегральний параметр закручення  $\Phi$  або відносні характеристики завихрювача.

При виборі оптимальної конструкції витого теплообмінника необхідно враховувати, що величина закручення потоку залежить як від кута навивки  $\varphi$ , так і від величини зазору  $\delta_3$  між поверхнею труби, корпусом і внутрішньою вставкою.

При проведенні експериментальних досліджень діапазон зміни крокових характеристик витого теплообмінника становив  $S_2 = (2,7...13,5)$  мм, або в безрозмірних величинах  $\sigma_2 = (1...6)$ . Зазор змінювався  $\delta_3 = (1...5)$  мм.

Крім геометричних характеристик визначальний вплив на інтенсивність теплообміну в витих теплообмінниках становлять режим течії, швидкість і теплофізичні властивості теплоносія. Аналіз параметрів, при яких експлуатуються рекуперативні теплообмінники кріогенних установок, свідчить що всередині трубною поверхні зазвичай реалізується турбулентний режим, а в міжтрубному просторі теплоносії рухається при ламінарному режимі. Для розрахунку теплообміну в середині труби можливо використовувати залежності [9]. Для зовнішньої задачі визначення впливу на інтенсивність теплообміну крокових характеристик і зазору між корпусом, трубним пучком і вставкою проводилось в діапазоні чисел

Re = 100...2100.

При проведенні досліджень для визначення впливу на інтенсивність теплообміну крокових характеристик теплообмінної поверхні довжина труби залишалась постійною. Швидкість теплоносія в міжтрубному просторі змінювалась в діапазоні  $W = (0,68...10,58)$  м/с, а температура  $t_r = (50...65)$  °С.

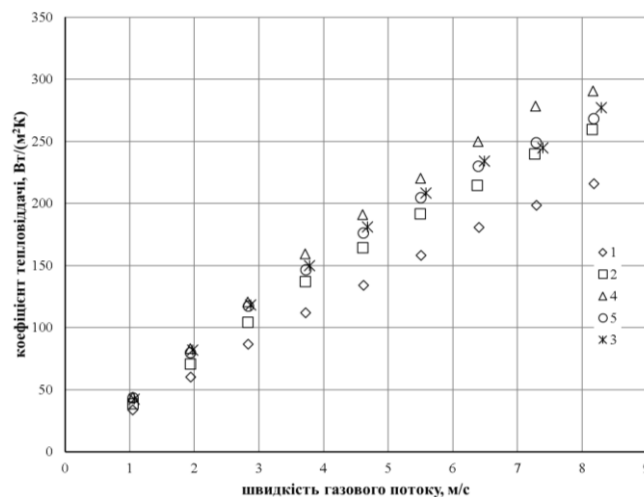
Результати досліджень, які представлені на рис. 3, свідчать, що збільшення відносного кроку  $\sigma_2$  приводить до зростання коефіцієнту тепловіддачі на 16...18%. Найбільш суттєве зростання відбувається при зміні відносного кроку  $\sigma_2$  від 1 до 3...4. Фізична сутність цього ефекту полягає у тому, що зростає доля кількості руху закрученого потоку. На процес формування пограничного шару, особливо в кормовій частині труби, впливає струмінь, який рухається вздовж труби. Наявність такого струменя впливає на утворення вихрової структури, зменшує долю поверхні труби, яка знаходиться під дією зворотної течії. Подальше збільшення значення відносного кроку  $\sigma_2$  практично не впливає на процес теплообміну, а при значних температурах стінки труби інтенсивність тепловіддачі дещо знижується. Визначити вплив крокових характеристик трубного пучка на параметри процесу теплообміну в діапазоні досліджень зміни параметрів можливо за допомогою поправки:

$$\varepsilon_{кр} = -0,022 \cdot \sigma_2^2 + 0,192 \cdot \sigma_2 + \sigma^*,$$

$$\text{де } \sigma^* = 8,9 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Re}^{0,885}. \quad 5)$$

Залежність отримана в діапазоні зміни Re = 200...1570 та  $\sigma_2 = 1...6$ .

Як і крокові характеристики трубного пучка, так і величина зазору між поверхнею труби, корпусом і внутрішньою вставкою приводить до перерозподілу між осьюовою і відцентровою кількості руху.



1 – відносний крок навивки  $\sigma_2 = 1$ ; 2 –  $\sigma_2 = 2$ ; 3 –  $\sigma_2 = 3$ ; 4 –  $\sigma_2 = 4$ ; 5 –  $\sigma_2 = 6$

Рисунок 3 - Вплив на інтенсивність теплообміну швидкості газового потоку при різних відносних кроках навивки. Температура теплоносія 65°С

На рис. 4 представлена зміна інтенсивності теплообміну при вимушеній конвекції в витому теплообміннику, розташованому в кільцевому зазорі, при різних швидкостях газового потоку і температурах стінки. Результати досліджень показують, що зміна коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha$  в значній мірі залежить від зазору. Чим менше величина зазору тим більша частина газового потоку рухається між витками теплообмінника по гвинтовій лінії. Такі умови наближені до випадку повздовжнього руху в каналах довільної форми, що підтверджується експериментальними результатами при  $\delta_3 = 1$  мм на рис.4. Пояснити це можливо тим, що незважаючи на покращення умов теплообміну в кормовій частині труби зростання товщини пограничного шару в лобовій частині пригнічує дію часткової закрутки потоку. Збільшення величини зазору  $\delta_3$  з 1мм до 1,6мм приводить до інтенсифікації процесу приблизно на 40% у всьому діапазоні швидкостей газового потоку. Подальше збільшення величини зазору уповільнює цей ефект, але гідродинамічний опір витого теплообмінника може значно зменшитись [9]. На підставі аналізу експериментальних даних по впливу величини зазору на інтенсивність теплообміну його значення доцільно обирати враховуючи не тільки теплообмін і гідродинаміку, а і загальні розміри витого теплообмінника.

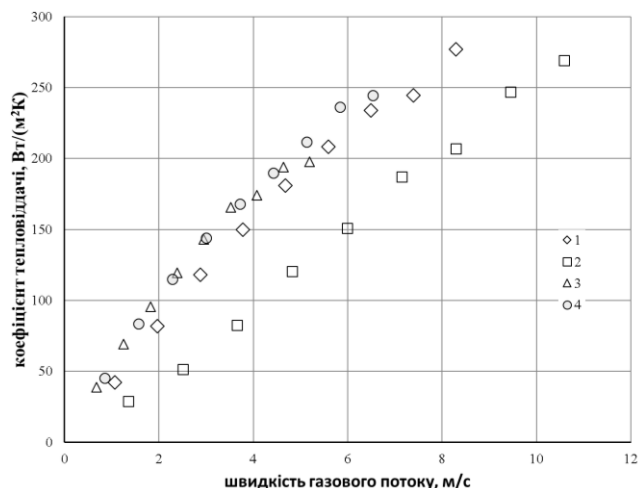
Таким чином, для врахування впливу величини зазору між поверхнею труби, корпусом і внутрішньою вставкою, коли  $\delta_3$  дорівнює 1,6мм і більше на параметри процесу теплообміну в діапазоні дослідження зміни параметрів можливо за допомогою поправки:

$$\varepsilon_3 = 1,26 \cdot [\delta^*_3]^{0,2}, \quad (6)$$

де  $\delta^*_3 = \frac{d_{тр}}{D_e}$ ;  $D_e$  – еквівалентний діаметр кільцевого каналу.

Залежність отримана в діапазоні зміни  $Re = 110 \dots 1790$  та  $d_{тр}/D_e = 0,1552 \dots 0,2288$

Отримані поправки, які визначають вплив геометричних характеристик трубного пучка на інтенсивність теплообміну, дозволяють модифікувати методику теплового розрахунку витих теплообмінників, шляхом їх введення в розрахункову залежність.



**1 – зазор між поверхнею труби, корпусом і внутрішньою вставкою  $\delta_3 = 1,6$  мм 1,6 мм;**  
**2 –  $\delta_3 = 1$  мм; 3 –  $\delta_3 = 5$  мм; 4 –  $\delta_3 = 3$  мм**

Рисунок 4 - Вплив на інтенсивність теплообміну швидкості газového потоку при різних зазорах між поверхнею труби, корпусом і внутрішньою вставкою. Температура теплоносія 65°C

### Висновки

1. Експериментальне дослідження процесів теплообміну при вимушеній конвекції газу в витому теплообміннику при ламінарному режимі руху теплоносія дозволило встановити залежності коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha$  від основних геометричних характеристик теплообмінника: відносного кроку витка, зазору між трубою і внутрішньою поверхнею корпусу, зазору між трубою і зовнішньою поверхнею циліндричної вставки.

2. На підставі результатів досліджень були визначені поправки у безрозмірному вигляді, за допомогою яких виконуються варіаційні розрахунки конструкцій витих теплообмінників, розташованих в кільцевих каналах з метою оптимізації їх геометричних характеристик.

### Список використаної літератури

1. Jinxing Wu, Q. Tian, X. Sim, Numerical simulation and experimental research on the comprehensive performance of the shell side of the spiral wound heat exchanger, Appl. Therm. Eng. 163 (2019) 114381.
2. B. BabakDehghan, Experimental and computational investigation of the spiral ground heat exchangers for ground source heat pump applications, Appl. Therm. Eng. 121 (2017)908-921.
3. Yang, L., The Latest Heat Exchanger Design Calculation and Heat Transfer Strengthening and Quality Inspection Standards Practical Manual, Northern Industrial Press, Beijing, China, 2006 (in Chinese).
4. N. Ghorbani, H. Taherian, M. Gorji, H. Mirgolbabaei, Experimental study of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers, Experimental Thermal and Fluid Science, 34 (2010) 900-905. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.02.004>.
5. X. Lu, X. Du, M. Zeng, S. Zhang, Q. Wang, Shell-side thermal-hydraulic performances of multilayer spiral-wound heat exchangers under different wall thermal boundary conditions, Applied Thermal Engineering, 70 (2014) 1216-1227. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.053>.
6. Дилевська Е. В. Криогенные микротеплообменники / Е. В. Дилевская. – Москва: Машиностроение, 1978. – 165 с.

7. Лебедев И. К. Гидродинамика паровых котлов : Учеб. пособие для вузов. М. : Энергоатомиздат, 1987. 240 с.
8. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил : в 4-х т. Т. 3. Закрученные потоки. / А. А. Халатов, А. А. Авраменко, И. В. Шевчук ; Ин-т техн. теплофизики. – Киев: Випол, 2000. – 474 с. – Библиогр.: 132 назв. – рус. – ISBN 5-77-02-1067-2.
9. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 417 с.

**V. Tuz**, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-4691-4890

**N. Lebed**, Cand. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-2194-4911

**M. Lytvynenko**, PhD student, TF, ORCID 0000-0002-1760-1449

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**  
**HEAT TRANSFER IN COIL HEAT EXCHANGERS WITH VARYING GEOMETRIC**  
**CHARACTERISTICS**

*Coil-type heat exchangers are widely used in power industry and medical and electronic technology due to the relatively simple design of their basic elements, low operating costs, reliability and long service life. The process of designing the devices with coil heat exchangers requires choosing the tube surface configuration and taking into consideration the specific operating conditions, as well as thermophysical properties and parameters of the working fluid. One of the important factors that hinder the wider use of coil heat exchangers is the lack of reliable engineering techniques for calculating the heat transfer and aerodynamic drag.*

*This study aimed to improve the technique of calculating the heat transfer and aerodynamics of coil heat exchangers by modifying the dependences that take into consideration the specific operating conditions and allow determining the design characteristics of one-layer recuperative coil heat exchangers mounted in annular channels under the conditions of partially twisted working fluid flow. In order to do that, the authors conducted a physical experiment using a test setup, both of which are described in the article in detail.*

*The analysis of the experimental results on heat transfer in a coil heat exchanger under forced gas convection and laminar flow of the working fluid helped to establish the dependence of the heat transfer coefficient on the main geometric parameters of the heat exchanger and to determine the allowances taking into consideration the extent to which the heat transfer intensity is impacted by the step characteristics of the tube bundle and the gap between the tube bundle and the heat exchanger housing, thus making it possible to optimize the geometric characteristics of the coil heat exchangers mounted in annular channels for specific operating conditions.*

**Keywords:** coil heat exchanger, partially twisted flow, convective heat transfer in annular channels, geometric characteristics of coil heat exchangers

#### References

1. Jinxing Wu, Q. Tian, X. Sim, Numerical simulation and experimental research on the comprehensive performance of the shell side of the spiral wound heat exchanger, Appl. Therm. Eng. 163 (2019) 114381.
2. B. BabakDehghan, Experimental and computational investigation of the spiral ground heat exchangers for ground source heat pump applications, Appl. Therm. Eng. 121 (2017)908-921.
3. Yang, L., The Latest Heat Exchanger Design Calculation and Heat Transfer Strengthening and Quality Inspection Standards Practical Manual, Northern Industrial Press, Beijing, China, 2006 (in Chinese).
4. N. Ghorbani, H. Taherian, M. Gorji, H. Mirgolbabaie, Experimental study of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers, Experimental Thermal and Fluid Science, 34 (2010) 900-905. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.02.004>.
5. X. Lu, X. Du, M. Zeng, S. Zhang, Q. Wang, Shell-side thermal-hydraulic performances of multilayer spiral-wound heat exchangers under different wall thermal boundary conditions, Applied Thermal Engineering, 70 (2014) 1216-1227. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.053>.
6. Dilevskaya Ye. V. (1978), Kriogennyye mikroteplobmenniki [Cryogenic micro heat exchangers], Mashinostroyeniye, Mos-cow, 165 p.
7. Lebedev I.K. Hydrodynamics of steam boilers: Textbook. manual for universities. Moscow, Energoatomizdat, 1987, 240 p.
8. Khalatov A. A., Avramenko A. A., Shevchuk I. V. (2000), Teploobmen i gidrodinamika v poljah centrobezhnyh massovyh sil [Heat transfer and hydrodynamics in centrifugal force field], Vipol, Kyiv, vol. 3. ISBN 5-77-02-1067-2.
9. V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel Heat transfer . Moscow, Energoizdat, 1981, 417 p.

Надійшла 05.11.2021

Received 05.11.2021

## ОПРІСНЕННЯ ВОДИ З ВИКОРИСТАННЯМ НАМОРОЖУВАННЯ ЛЬОДУ В БУРУЛЬКАХ

*Мета дослідження - вивчити вплив початкової солоності та витрати води на процеси опріснення в бурульках, що утворюються на горизонтальних насадках.*

*Експериментальна установка, представляє собою каркас на якому закріплені: ємність з вихідною солоною водою, поверхня удару, горизонтальні насадки. Початкова солона вода 10-30 г/л витікала через отвір, падала та подрібнювалась об поверхню удару, після чого замерзала на насадках у вигляді бурульок. Для дослідження ступеня солоності бурульки поділялись на рівні частини та плавилась.*

*З результатів дослідження видно, що отримана вода містить найменше солей в тих частинах, що знаходяться ближче до основ бурульок. При витраті в 2 мл/с бурульки в довжину зростали повільно. Ступінь опріснення визначалась як відношення початкової до отриманої солоності води і складала від 1,5 до 4, більші значення отримані при витраті 1 мл/с, та на перших відрізках.*

*Висновки: Результати експериментів показали що неможливо опріснити солону воду за 1 цикл. Для отримання питної води з концентрацією солі менше 0,5 г/л потрібно використовувати декілька циклів заморожування-плавлення або комбінувати з іншими методами опріснення. Потрібно контролювати оптимальну витрату води для забезпечення більшого ступеня опріснення.*

**Ключові слова:** опріснення виморожуванням, бурульки, солоність, поверхня удару, кристалізація, витрата солоної води.

**Вступ.** Першим хто досліджував опріснення заморожуванням був датський лікар Томас Бартолінус (1616-1680). Однак найперший опис робочого методу очищення води шляхом заморожування був зроблений Антоном Марією Лоргною. У 1786 році Лоргна опублікував свою першу статтю.

Починаючи з морської води із загальним вмістом розчинених солей (tds) 36 200 ppm, він зробив наступну серію з п'яти послідовних дослідів із кристалізацією води в ємності, щоразу заморожуючи рідину, отриману шляхом танення льоду попередньої заморозки. Лоргна зауважив, що крижаний блок, утворений з морської води, завжди містив центральне ядро рідкої води, в якому було зосереджено більшість розчинених солей та домішок води. Після трьох послідовних циклів заморожування і плавлення солоної води він отримав воду, придатну для пиття.

Протягом 1788-1789 років Лоргна досліджував очищення сечі шляхом заморожування. В останній час та сама процедура знову була запропонована для відновлення прісної води з сечі на космічних апаратах. [1]

У [2] розглядаються три широкі методи проведення процесу замороження-плавлення (в літературі позначається через абривіатуру FM): заморожування прямим контактом води з краплями фреону, заморожування непрямим контактом при теплопередачі через стінку та вакуумне заморожування. Обговорюються різні типи варіантів обробки в кожному класі з їх принципами роботи, достоїнствами і недоліками кожного процесу. Схожі порівняння різних методів наводяться в [5].

Систему непрямого контакту можна класифікувати на ті, що охолоджуються всередині та ті, що охолоджуються зовні. Кристалізатори з внутрішнім охолодженням можна додатково розділити на систему зростання статичного шару (при нерухомій рідині), шару кристалізації на обертовому барабані, блок прогресивної кристалізації, систему зростання динамічного шару (при течії води) та процеси кристалізації суспензії і розділення її в сепараційному пристрої.

У разі прямого заморожування холодоагент у рідкій формі під тиском розпилюється через форсунку в рідину продукту, де він випаровується при нижчому тиску. Таке випаровування забезпечує охолоджуючий ефект і викликає утворення кристалів льоду та/або розчиненої речовини всередині продукту. Успішне проектування установки для прямого контактного заморожування опріснення істотно залежить від її термодинамічних, хімічних та фізичних властивостей та вартості.

У непрямих контактних процесах FM тепла енергія для охолодження проходить через стінки певної форми теплообмінника. У процесі вакуумного заморожування FM вода сама може служити холодоагентом. Кожна система має свої переваги та недоліки. У процесі з вакуумом компресор повинен стискувати дуже великий об'єм водяної пари низької щільності через дуже низький тиск (0,61кПа) пари води. При вакуумному заморожуванні можна повністю уникнути прямого контакту з холодоагентом.



Основним недоліком прямого циклу FM є те, що вода може містити надмірну кількість летких холодоагентів, що в більшості випадків небажано. Також непросто відокремити холодоагент через утворення гідратів. У разі непрямого процесів FM, цих гідратів можна було б уникнути, але процес є більш складним.

Вибір технології зазвичай ґрунтується на якості продукції, економічній ефективності, вартості енергії, початкових інвестиціях та складності процесу. Основні фактори, що впливають використання процесу FM - це капітальні витрати та складність процесу. Це чітко видно з широкого спектра варіантів, методів та обладнання, наявних у сучасних умовах.

Опріснення непрямим заморожуванням зразків морської води взятої біля пляжу Умлуж [3] (TDS 40,916 мг/л), Червоне море, у Саудівській Аравії, досліджувалося в лабораторних умовах. Досліджено вплив кінетичних параметрів, включаючи ступінь кристалізації, цикли заморожування - заморожування та поступове плавлення на TDS та відокремлення солі. Тала вода, що отримана шляхом проведення одного циклу FM, має в два рази меншу концентрацію солі, ніж початкова морська вода, тоді як у відпрацьованій воді концентрація солі в два рази більша, ніж у сировині. Після 8 циклів FM видалось 98,5% солі і отримано питну воду з TDS 610 мг/л, що має концентрації солі в 67 разів меншу ніж початкова вода червоного моря. Стінки резервуара охолоджувались з зовнішньої сторони при температурі -10°C на протязі 6-10 год.

Використовуючи 3 цикли FM у [4] отримали воду з концентрацією 1 403 мг/л при вихідній концентрації 37 650 мг/л. В різних лабораторних зразках концентрація солі змінювалась від 40 750 до 1 487 мг/л, і 33 351 до 1 345 мг/л. Це показало, що після трьох циклів FM може бути отримана питна вода задовільної якості. Заморожування води проводилось за допомогою шляхом непрямого контактного зовнішнього охолодження за допомогою морозильної камери Pars-PAMCO-FRZNF170.

Зі збільшенням концентрації солі швидкість росту кристалів зменшується при постійній температурі, і для кристалізації солоної води потрібно більше часу.

Робота [6] спрямована на розробку динамічного шарового кристалізатора, що працює періодично, для заморожування опріснення морської води. Досліди проводили з розчинами води/NaCl та зразками моря вода з Ніци, Рабату та Марселя. Пілотний кристалізатор складається з охолодженої трубки, зануреної в циліндричний резервуар з подвійною оболонкою. Розчин виливають у резервуар, а кристалізація відбувається на зовнішній поверхні трубки. Трубка являлась елементом випарника холодильної установки. Розчин переміщується шляхом бульбашок повітря.

Весь процес включає стадію заморожування, що призводить до кристалізації шару льоду та стадію плавлення, яка полягає у глибокому очищенні шару льоду шляхом розплавлення нечистих зон. Дослідження впливу робочих параметрів дозволило кількісно оцінити роль різних ключових факторів заморожування та плавлення. Три експерименти дозволили досягти солоності нижче 0,5 г/кг, що відповідає стандартам питної води. Три цикли FM займали 8 годин (5 годин для заморожування та 3 години для розплавлення). Більш висока солоність вимагала більш тривалого часу. В цілому результати показують доцільність цієї технології.

У [8] проведене схоже дослідження на [6], з використанням статичного шарового кристалізатора.

У [7] опріснення методом заморожування/відтавання проводили у автоклаві з вихідним хлоридом натрію 3,5 мас. % з урахуванням швидкості перемішування, часу заморожування та переохолодження. Переохолодження становило від 1,2 К до 4 К. Оптимальними умовами для опріснення в цій роботі були швидкість перемішування 200 об/хв-1, час заморожування 120 хв і переохолодження 3 К. Результати також показали, що хлорид натрію не можна ефективно видалється шляхом одноразового заморожування/розморожування. Максимальна ефективність видалення хлориду натрію становила 64,3 %. Запропоновано дві основні причини, що призводять до забруднення одержаної талої води методом заморожування/розморожування.

Першою причиною було неминуче прилипання сольового розчину до поверхні льоду, яке можна було легко видалити шляхом промивання дистильованою водою. Друга причина полягала в тому, що сольовий розчин був неоднорідно загорнутий в накопичений лід, який важко було видалити шляхом промивання дистильованою водою.

Метод рідинного промивання був запропонований для перевірки гіпотези, і результати відповідали двом вищезгаданим причинам. Для ефективного видалення хлориду натрію та отримання прісної води під час процесу заморожування/розморожування було запропоновано використовувати додатковий метод, такий як метод багаторазової промивної рідини.

В [9] показана можливість досягнення високої якості отриманої води шляхом непрямого заморожування за одну стадію процесу при поєднанні етапів заморожування та плавленням.

Дослідження [10] проводилося при використанні теплоізолюваного резервуару. Очевидно процес замерзання води мав місце навіть при температурах вище 0 мабуть через випромінювання теплоти у космос у нічний час при безхмарному небі. Показано що більш тонкий шар льоду мав більшу солоність. У

більш широкому масштабі схоже дослідження виконано в [12]. Використані залізобетонні тази, теплоізоляційні природними матеріалами. Також показано що воду можна кристалізувати при температурах трохи вище 0°C вночі. При плавленні льоду слід видалити перші 20% талої води, що включаються в себе багато солі, а решту можна використовувати для подальшого опріснення.

У [11] розглядався процес видалення відцентровими силами та гравітаційним відстоюванням. Оцінено новий метод опріснення заморожуванням з використанням переохолодженої води динамічного виготовлення льоду. Запропонований метод мав теоретичне споживання енергії лише 58% від необхідного для непрямого прогресуючого контактного замерзання (PCSF). За допомогою гравітаційної фільтрації розділення отриманої суміші льод-вода протягом 20 хв або відцентрового зневоднення протягом 1 хв досягали стандарту вмісту солі 0,5 % для прісної води та 60 % виходу прісної води. Крім того, методом були отримані кристали льоду з мінімальними домішками, після того як розсіл, прикріплений до поверхні, видалили шляхом відцентрового зневоднення, досягнуто стандартного вмісту солі 0,05% для питної води.

Дослідження [13] показало, що можна використовувати отриману за рахунок кристалізації теплоту для створення конвективного потоку повітря, яке приводить в рух вітрову турбіну. Вода розбризувалась з висоти 200м.

В [14] південно-африканській республіці проведені дослідження для використання холоду що виділяється при плавленні льоду для охолодження шахт. Таким чином можна отримати прісну воду і кондиціонувати повітря.

Автори [15] розглянули можливість застосування теплового насосу (ТН) як для заморожування води так і для її плавлення шляхом реверсування ТН.

У роботі [16] досліджена кристалізація при гравітаційній течії плівки солоної води і заморожування в ємностях. Також проведено аналіз комбінованого використання згаданих методів.

В [17] Національному технічному університеті «Київській політехнічній інститут імені Ігоря Сікорського проведені дослідження заморожування прісної води прямим контактом холодного повітря з півкою води що тече по поверхні бурульок, які утворюються на спеціальних насадках. Показано, що така технологія доцільна при наявності холодного повітря з температурами нижче -2 - -3°C. Отримано залежності для розрахунку маси льоду віднесеної до довжини горизонтальних чи нахилених насадок.

Крім того, використання бурульок зменшує число технологічних операцій по видаленню льоду і зменшує капіталовкладення в порівнянні з заморожуванням води в ємностях.

**Мета та завдання.** Метою даної роботи є експериментальне дослідження процесу кристалізації солоної води в бурульках. Процес опріснення солоної води з використанням її замерзання в бурульках, наскільки нам відомо, раніше не досліджувався.

**Завдання:** Вивчити вплив початкової солоності та витрати води на процеси опріснення і її кристалізації. Для вирішення задач дослідження було виготовлено експериментальну установку.

**Експериментальна установка.** Розроблена експериментальна установка висотою 2 м, в плані має розміри по 0,7 м. Зверху установки закріплені дві дерев'яні підставки з відстанню між ними. На них встановлювалась ємність з солоною водою, що мала по центру в її дні отвір для витікання води.

З метою регулювання витрати отвори мали різний діаметр. Зовнішня поверхня ємності покрита теплоізоляцією щоб запобігти замерзання води в отворі. Встановлено дерев'яна пластина шириною 50 мм призначена для подрібнення води ударом об її поверхню. Пластина встановлена на відстані 0,4 м від дна ємності.

Під пластиною, на відстані 0,3 м встановлені 3 дерев'яні горизонтальні насадки круглого перерізу діаметром 50 мм. Під ними встановлені 6 натягнутих дротяних насадок по всьому периметру діаметрами 3-5мм. Різний розмір насадок взятий для того, щоб розглянути вплив діаметра, який впливає на процеси формування бурульок [17].

В нижній частині каркасу встановлена ємність для збирання незамерзлої солоної води, що стікає з поверхні бурульок. Загальний вигляд установки зображений на фото(Рис 1).

**Методика досліджень.** Досліди проводились при температурі повітря -5°C - -15°C при різних концентраціях кухонної солі (NaCl) в водопровідній воді. Для того щоб підтримувати рівень вихідної води в резервуарі, для забезпечення однакової витрати в досліді періодично через 5-10 хв додавався свіжий розчин, причому рівень води змінювався не більше ніж на 5-10 мм. Рівень води складав біля 200 мм. Витрата води складала 1 і 2 мл/с. Вода розбризувалась від удару об тверду поверхню, після чого краплі потрапляли на насадки. Із збільшенням діаметра бурульки збільшувалась площа на яку попадали краплі і відповідно автоматично збільшувалась витрата води на поверхні бурульок при зростанні їх довжини.

З метою вивчення впливу довжини бурульок на солоність отриманої води, бурульки поділялися на рівні частини довжиною по 100 мм кожна. Після чого різні частини були розплавлені при кімнатній температурі в окремих ємностях. Використовувались розчини з початковою концентрацією солі 30, 20 та 10 г/л. Отримані відрізки бурульок перед плавленням промивались чистою холодною водопровідною водою, яку попередньо охолоджували до температури +1-+2°C, для того щоб вона не плавила лід.



Рисунок 1 - Дослідна установка

**Методика вимірювання.** Аналіз води проводився електролітичним методом, за допомогою TDS-3. Також солоність вимірювали за допомогою аерометра (по густині води). Температура повітря вимірювалась термометром. Довжина бурульок вимірювалась рулеткою.

**Результати досліджень.** Попередній аналіз показав, що короткі і тонкі бурульки мають більшу солоність ніж товсті і довгі. Подальші дослідження проводились на бурульках довжиною 300-500 мм. Основа бурульок — це лід, що нагромаджується навколо дроту або дерев'яних насадок. Довжина бурульок отриманих протягом темної пори доби з 18-00 до 02-00 ночі змінювалась в залежності від температури повітря. Результати експериментів показані на графіках Рис.2 та Рис.3, на яких представлені залежності солоності отриманої води від довжини бурульок.

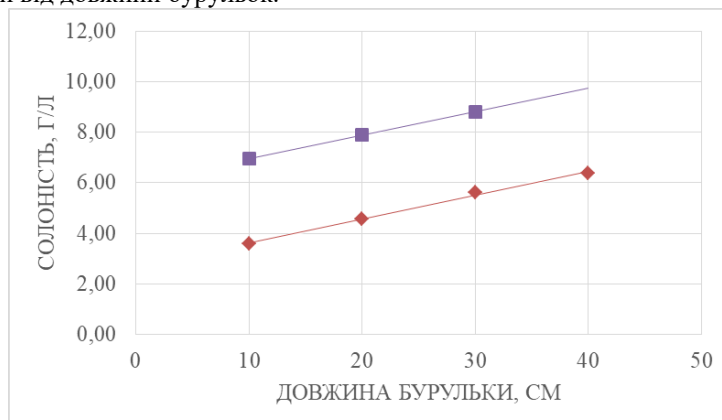


Рисунок 2 - Опріснення води при різній початковій солоності. Початкова солоність: ромб - 10г/л, квадрат - 20г/л.

На рис 2. Показана залежність концентрації отриманої води від довжини при витратах вихідної води 10 г/л та 20 г/л. Експерименти для цих початкових концентрацій проводились

на витраті солоної води 2 мл/с. Слід відзначити, що при такій витраті бурульки в довжину зростали повільно, через те що на їх кінцях часто відривалися краплі які не встигали замерзати. Максимальна довжина бурульок складала 400 мм при солоності 10 г/л та 300 мм при солоності 20 г/л. Різна довжина бурульок пояснюється різною температурою навколишнього повітря, оскільки досліди проводились в різні дні.

Як видно з графіків солоність отриманої води менша біля насадок і збільшувалась по довжині бурульок. Наприклад при початковій солоності води 10г/л у верхній частині солоність отриманої води складала 3,6 г/л а в нижній 6,4 г/л.

На рис 3. Показана залежність концентрації отриманої води від довжини при витраті вихідної води 1 мл/с. При такій витраті води утворились бурульки більших розмірів. При витраті води в 1 мл/с ступінь опріснення, яких розглядається нижче набагато більший ніж при витраті 2 мл/с. Мабуть через те що плівка на поверхні бурульки значно тонша і її термічний опір менший.

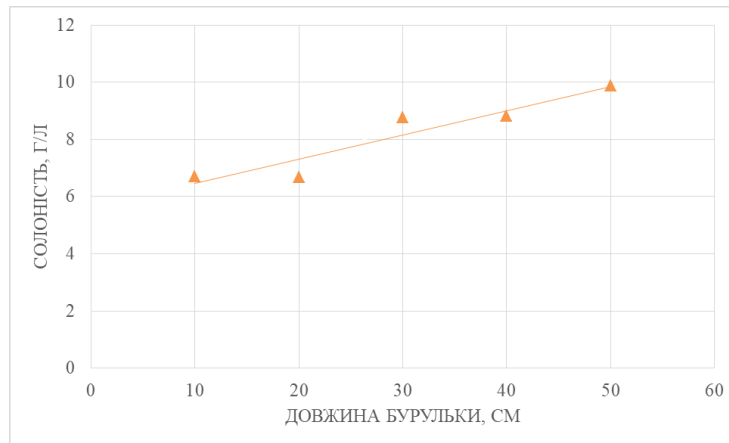


Рисунок 3 - Опріснення води при початковій солоності: 30г/л.

Ступінь опріснення води визначається за залежністю

$$S = K_n / K_k,$$

де  $K_n$  – початкова солоність,

$K_k$  – кінцева (отримана) солоність по виділеним окремим ділянкам.

Ми не мали можливості визначити початкову концентрацію для наступних відрізків крім першої ділянки, тому умовно початкову концентрацію для наступних ділянок крім першої віднесено до початкової загальної концентрації. На кожну наступну ділянку розчин приходить більш солоним. Тому фактична ступінь опріснення є більшою ніж показана на Рис. 4 для наступних після першого відрізків.

На Рис. 4 зобразимо у вигляді графіка ступінь опріснення в залежності від довжини бурульки.

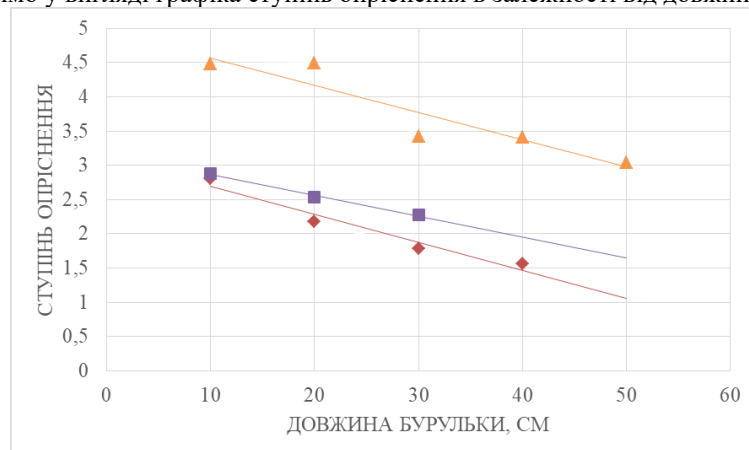


Рисунок 4 - Ступінь опріснення при різних початкових солоностях на різних довжинах бурульок.

Початкова солоність: ромб - 10г/л, квадрат - 20г/л, трикутник – 30 г/л.

На жаль маса кожного відрізка не фіксувалась. Обчисливши середню солоність по довжині бурульок для трьох випадків отримаємо: 8,16 г/л при початковій витраті 30 г/л, 7,88 при 20 г/л, 5,03 при 10 г/л. Середня солоність по довжині є вищою ніж середня з урахуванням мас окремих відрізків, враховуючи що в основі бурульки мають більшу товщину. В подальшому будуть проведені відповідні дослідження.

Як видно з отриманих даних одного циклу опріснення розглянутим методом недостатньо для отримання прісної води. Цей метод дозволяє зменшити солоність від 30 г/л до 6,7 г/л.

При меншій витраті ступінь очищення більша.

Можливе комбінування опріснення кристалізацією в бурульках з технологією опріснення методом зворотнього осмосу або іншими методами. Відомо що при високих концентраціях солі в вихідній воді мембрани що використовують в зворотньому осмосі служать менший термін.

#### Висновки

1. Ефективність опріснення при витраті 1 мл/с набагато вища ніж при витратах 2 мл/с.
2. Ступінь опріснення змінюється для вибраних відрізків бурульок від 1,5 до 4, більші значення мають при витраті 1 мл/с, та на перших відрізках.
3. Залежність солоності отриманої води від довжини бурульки має пряму лінійний характер.
4. Проведені експерименти показали що для отримання питної води слід проводити декілька циклів FM так як це показано в цитованих джерелах.

5. Представляється доцільним поєднання технології опріснення заморожуванням з технологією зворотнього осмосу, де використовуються спеціальні мембрани.

**Список використаної літератури:**

1. Giorgio Nebbia and Gabriella Nebbia Menozzi «Early experiments on water desalination by freezing». – University Bari, Italy. Desalination, 5 (1968) p. 49-54.
2. Z. Lu and L. Xu «Freezing desalination process». - Department of Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, China, 27 May 2015
3. Sayed M. Badawy «Laboratory freezing desalination of seawater» - Taylor & Francis, 01.06.2015. p. 1-8.
4. Mokhtar Mahdavi, Amir Hossein Mahvi, Simin Nasser, Masoud Yunesian «Application of Freezing to the Desalination of Saline Water» - King Fahd University of Petroleum and Minerals 2011, 21 October 2011. p. 1171–1177.
5. Mohammad Shafiur Rahman a , Mushtaque Ahmed a & X. Dong Chen «Freezing-Melting Process and Desalination: I.Review of the State-of-the-Art». - College of Agricultural and Marine Sciences, Sultan Qaboos University, Al Khod, Sultanate of Oman, Department of Chemical and Materials Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand
6. Anouar Rich, Youssef Mandri, Denis Mangin, Alain Rivoire, Souad Abderafi, Christine Bebon, Naoual Semlali, Jean-Paul Klein, Tijani Bounahmidi, Ahmed Bouhaouss, Ste'phane Veessler «Sea water desalination by dynamic layer melt crystallization: Parametric study of the freezing and sweating steps», - Journal of Crystal Growth 342 (2012) 110–116
7. Jun Chen, Jianjian Wu, Jiafeng XU, Qing Yuan, Bin Deng, Changzhong Chen, Zhi Li «Experiments and insights of desalination by a freezing/thawing method at low subcooling» - Chinese Journal of Chemical Engineering, 3 January 2020
8. Anouar Rich, Youssef Mandri, Nourimane Bendaoud, Denis Mangin, Souad Abderafi «Freezing desalination of sea water in a static layer crystallizer» - Desalination and Water Treatment . Taylor & Francis. 3 May 2009
9. Youssef Mandri, Anouar Rich, Denis Mangin, Souad Abderafi, Christine Bebon, Naoual Semlali, Jean-Paul Klein, Tijani Bounahmidi, Ahmed Bouhaouss. «Parametric study of the sweating step in the seawater desalination process by indirect freezing»
10. Phillip C. Wankat «Desalination by natural freezing» - School of Chemical Engineering. Purdue University, Lafayette, Ind. 47937 (U.S.A.) October 9, 1972. p. 147-157.
11. Dong Chen, Chaosheng Zhang, Hongwei Rong, Chunhai Wei, Siyu Gou. Experimental study on seawater desalination through supercooled water dynamic ice making / Guangzhou University, Guangzhou - 2020 - <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114233>
12. J. Fournier, J. I. Grange, S. Vergara «Water desalination by natural freezing» - University of Chile and Ministry of Public Works, Santiago (Chile) 9 May 1974, p 167-175.
13. Yang Liu, Tingzhen Minga, Yongjia Wu, Renaud de Richter, Yueping Fang, Nan Zhou «Desalination of seawater by spray freezing in a natural draft tower» - <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114700>
14. R.D.C. SHONE «The freeze desalination of mine waters» - Journal of the south african institute of mining and metallurgy, April 1987, p 107-112,
15. Ahmed A.A. «New proposed system for freeze water desalination using auto reversed R-22 vapor compression heat pump» - Mechanical Engineering Department, Benha University, Faculty of Engineering at Shoubra, 108 Shoubra Street, Cairo, Egypt, 7 October 2009, p. 179-184.
16. A. Zambrano, Y. Ruiz, E. Hernández, M. Raventós, F.L. Moreno «Freeze desalination by the integration of falling film and block freezeconcentration techniques» - <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.02.015>
17. I. I. Pukhovoi, A. M. Postolenko «Ice formation in the form of icicles and utilization of heat of crystallization for air heating» - Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 91, No. 3, May, 2018.

**I. Puhoviy**, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0003-4915-9699

**A. Petrechuk**, PhD. Student, ORCID 0000-0003-4422-7365

**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  
WATER DESALINATION USING ICE FREEZING IN ICICLES**

*The aim of the study is to investigate the effect of initial salinity and water flow rate on desalination processes in icicles formed on horizontal nozzles.*

*Experimental installation, is a frame on which are fixed: a container with initial salt water, impact surface, horizontal nozzles. Initial saline water of 10-30 g/l flowed out through the hole, fell and crushed against the impact surface, and then froze on the nozzles in the form of icicles. To investigate the degree of salinity, the icicles were divided into equal parts and melted.*

*The results of the investigation show that the obtained water contains the most salts in those parts that are closer to the bases of the borules. At a flow rate of 2 ml/sec, the borules grew to their full length. The level of the option was defined as the ratio of initial water solubility to the received solubility and was 1.5 to 4, higher values were obtained at the flow rate of 1 ml/sec, and at the first intervals.*

*Conclusions: The results of experiments showed that it is impossible to refine brackish water in 1 cycle. To obtain drinking water with salt concentration less than 0.5 g/l it is necessary to use several cycles of freezing-melting or to combine with other methods of desalination. It is necessary to control the optimum water consumption to ensure a higher degree of (solidification)desalination.*

**Key words:** *freezing desalination, icicles, salinity, impact surface, crystallization, salt water consumption.*

#### References

1. Giorgio Nebbia and Gabriella Nebbia Menozzi «Early experiments on water desalination by freezing». – University Bari, Italy. Desolination, 5 (1968) p. 49-54.
2. Z. Lu and L. Xu «Freezing desalination process». - Department of Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, China, 27 May 2015
3. Sayed M. Badawy «Laboratory freezing desalination of seawater» - Taylor & Francis, 01.06.2015. p. 1-8.
4. Mokhtar Mahdavi, Amir Hossein Mahvi, Simin Nasser, Masoud Yunesian «Application of Freezing to the Desalination of Saline Water» - King Fahd University of Petroleum and Minerals 2011, 21 October 2011. p. 1171–1177.
5. Mohammad Shafiur Rahman a , Mushtaque Ahmed a & X. Dong Chen «Freezing-Melting Process and Desalination: I.Review of the State-of-the-Art». - College of Agricultural and Marine Sciences, Sultan Qaboos University, Al Khod, Sultanate of Oman, Department of Chemical and Materials Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand
6. Anouar Rich, Youssef Mandri, Denis Mangin, Alain Rivoire, Souad Abderafi, Christine Bebon, Naoual Semlali, Jean-Paul Klein, Tijani Bounahmidi, Ahmed Bouhaouss, Stéphane Veesler «Sea water desalination by dynamic layer melt crystallization: Parametric study of the freezing and sweating steps», - Journal of Crystal Growth 342 (2012) 110–116
7. Jun Chen, Jianjian Wu, Jiafeng XU, Qing Yuan, Bin Deng, Changzhong Chen, Zhi Li «Experiments and insights of desalination by a freezing/thawing method at low subcooling» - Chinese Journal of Chemical Engineering, 3 January 2020
8. Anouar Rich, Youssef Mandri, Nourimane Bendaoud, Denis Mangin, Souad Abderafi «Freezing desalination of sea water in a static layer crystallizer» - Desalination and Water Treatment . Taylor & Francis. 3 May 2009
9. Youssef Mandri, Anouar Rich, Denis Mangin, Souad Abderafi, Christine Bebon, Naoual Semlali, Jean-Paul Klein, Tijani Bounahmidi, Ahmed Bouhaouss. «Parametric study of the sweating step in the seawater desalination process by indirect freezing»
10. Phillip C. Wankat «Desalination by natural freezing» - School of Chemical Engineering. Purdue University, Lafayette, Ind. 47937 (U.S.A.) October 9, 1972. p. 147-157.
11. Dong Chen, Chaosheng Zhang, Hongwei Rong, Chunhai Wei, Siyu Gou. Experimental study on seawater desalination through supercooled water dynamic ice making / Guangzhou University, Guangzhou - 2020 - <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114233>
12. J. Fournier, J. I. Grange, S. Vergara «Water desalination by natural freezing» - University of Chile and Ministry of Public Works, Santiago (Chile) 9 May 1974, p 167-175.
13. Yang Liu, Tingzhen Ming, Yongjia Wu, Renaud de Richter, Yueping Fang, Nan Zhou «Desalination of seawater by spray freezing in a natural draft tower» - <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114700>
14. R.D.C. SHONE «The freeze desalination of mine waters» - Journal of the south african institute of mining and metallurgy, April 1987, p 107-112,
15. Ahmed A.A. «New proposed system for freeze water desalination using auto reversed R-22 vapor compression heat pump» - Mechanical Engineering Department, Benha University, Faculty of Engineering at Shoubra, 108 Shoubra Street, Cairo, Egypt, 7 October 2009, p. 179-184.
16. A. Zambrano, Y. Ruiz, E. Hernández, M. Raventós, F.L. Moreno «Freeze desalination by the integration of falling film and block freezeconcentration techniques» - <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.02.015>
17. I. I. Pukhovoi, A. M. Postolenko «Ice formation in the form of icicles and utilization of heat of crystallization for air heating» - Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 91, No. 3, May, 2018.

Надійшла 15.09.2021

Received 15.09.2021

## ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ECOLOGICAL PROBLEMS

УДК 622.241

DOI 10.20535/1813-5420.4.2021.257275

О.М. Терентьев, д-р. техн. наук, проф, ORCID 0000-0003-2523-2804

А.И. Клешов, канд. техн. наук., ORCID 0000-0002-9412-4156,

А.І. Варфоломеев, канд. техн. наук., ORCID 0000-0002-9271-5689,

М.І. Сергієнко, викладач, ORCID 0000-0001-8284-9072

Національний технічний університет України “Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського”

### ОЧИЩЕННЯ РІДИНИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ФОКУСУВАННЯМ ДОМІШОК

*У статті розглянуті актуальні питання підвищення ефективності системи очищення фільтрату фізичними способами розробленої в інституті енергозбереження та енергоменеджменту*

*КПІ ім. Ігоря Сікорського Робота присвячена актуальному питанню впровадження новітніх, ресурсозберігаючих, енергозберігаючих, комплексних технологій очищення забруднених рідинних середовищ. До теперішнього часу не розроблена теоретична база, є тільки гіпотези, і немає практичних методик розрахунку магнітної обробки води. Стаття присвячена очищенню фільтрату побутових відходів комбінованими фізичними методами. Для очищення потоку рідини використано електромагнітний блок управління. Зменшення агресивності фільтрату передбачає багатоступінчасте забезпечення управління траєкторією домішок при їх виведенні з основного потоку. З урахуванням властивостей матриці планування експерименту обчислені коефіцієнти регресійного рівняння, адекватно відображає процеси очищення рідини при її омагнічуванні. Іони забруднюючих домішок представляють собою заряджені частинки. Для їх видалення із загального потоку необхідно на трубопроводі розмістити генератори для створення розвинутої кавітації у потоці рідини та котушки індуктивності. Кавітаційні бульбашки є внутрішніми генераторами коливань, і виділяючи енергію при захопленні, подрібнюють домішки забруднення.*

**Ключові слова:** очищення, фільтрат, фізичні способи очищення, фокусування іонів забруднень, управління траєкторією руху домішок, Ларморова прецесія, планування експерименту

**Вступ.** У практиці водоочищення недостатня увага приділяється управлінню динамікою заряджених домішок дією зовнішніх і внутрішніх сил. Магнітна обробка водного середовища має ряд переваг відносно інших фізичних способів: діє на всі групи домішок; впливає як на хімічні, так і на фізичні процеси в водному середовищі; призводить до вивільнення внутрішньої енергії середовища внаслідок руйнування електромагнітних зв'язків між молекулами рідини та домішок, активізує водне середовище. Головною перевагою при очищенні водного середовища від іонів домішок є можливість керування рухом іонів в магнітному полі, а отже безпосереднє видалення іонів домішок з потоку. Магнітна обробка водного середовища знайшла своє застосування в багатьох галузях промисловості, що в свою чергу, підтверджує ефективність таких пристроїв. Проте відсутні визначені критерії ефективності такої обробки.

**Актуальність теми.** При виборі напрямку дослідження автори керувалися наступними нормативно-правовими актами.

Закон України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2012, № 19-20, ст.166). {Із змінами, внесеними згідно із Законом № 5460-VI від 16.10.2012, ВВР, 2014, № 2-3, ст.41}

Закон України «Про Загальнодержавну програму розвитку водного господарства» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2002, № 25, ст.172 )

{Із змінами, внесеними згідно із Законами № 380-IV ( 380-15 ) від 4731-VI ( 4731-17 ) від 17.05.2012, ВВР, 2013, № 15, ст.98 }

Цими Законами передбачено впровадження новітніх, водозберігаючих, енергозберігаючих, комплексних технологій очищення забруднених вод.

Поряд з широким застосуванням магнітної обробки водного середовища, відсутні загально визнані та експериментально підтвержені теоретичні положення, які пояснюють фізико-хімічні процеси, що відбуваються при обробці магнітним полем водного середовища. Існуючі методики розрахунку та вибору параметрів магнітних систем базуються на емпіричних залежностях та висвітлюють обмежений діапазон зміни чинників та умов проведення дослідження. Тому їх неможливо використовувати в якості

функціональних залежностей при розрахунках параметрів і створенні магнітних систем, що працюють в умовах, які відрізняються від умов проведення експериментальних досліджень.

Актуальним також є встановлення закономірностей руху домішок водного середовища. І урахування їх іонізації під дією постійного аксіально-симетричного поперечного магнітного поля.

В практиці водоочищення відсутні дослідження впливу постійного аксіально-симетричного поперечного магнітного поля на заряджені домішки. Недостатня увага приділяється керуванню динамікою заряджених домішок дією зовнішніх і внутрішніх сил. Тому актуальними є встановлення закономірностей руху домішок водного середовища з урахуванням їх іонізації під дією постійного аксіально-симетричного поперечного магнітного поля, розробка методики розрахунку та вибору параметрів магнітної аксіально-симетричної системи очищення водного середовища, і на їх підставі, створення та промислове впровадження інноваційних систем очищення води.

Іони забруднюючих домішок представляють собою заряджені частинки. Для їх видалення із загального потоку необхідно на трубопроводі розмістити генератори для створення розвинутої кавітації у потоці рідини та котушки індуктивності. Кавітаційні бульбашки є внутрішніми генераторами кливань, і виділяють енергію при захопленні, подрібнюють домішки забруднення. Котушки є елементом електромагнітної системи очищення рідини, (далі EMCOP). Електромагнітне поле управляє траєкторією руху заряджених частинок домішок, фокусуючи їх у водоворот (вир). При цьому виникає Ларморова прецесія, яка сумісно з силою Лоренца забезпечує спіральність траєкторії руху частинок. У міру збільшення напруженості електромагнітного поля Лармора радіус руху частинок зменшується. Забруднюючі домішки формують параболоїд обертання з вузькою вершиною у отвори видалення забруднень із загального потоку.

**Аналіз літературних джерел.** В роботі [1] наведено огляд знезараження стічних вод, що накопичуються при складуванні або закапуванні сміття. Відомі способи знезараження стічних вод, такі як: об'єднане з внутрішніми стічними водами, переробка, біологічна обробка (аеробний і анаеробний) мають як переваги, так і недоліки. Також мають недоліки хімічна і фізична знезараження (коагуляція / утворенню грудочок, хімічне осадження, адсорбція, демонтаж амонію, хімічне окислення, іонний обмін і електрохімічне лікування), мембранна фільтрація (мікрофільтрація, ультрафільтрація, нанофільтрація і зворотний осмос [2-9]). Сьогодні, використання мембранних технологій, особливо Reverse Osmosis (RO), є головним в ланцюзі знезараження стічних вод від накопичених побутових відходів. Для очищення води застосовуються різні методи такі як ультрафіолетове опромінення, термообробка, добавка дезінфікуючих коштів, наприклад, хлору тощо. Використання зазначених методів очищення вод зменшує каламутність збільшуючи смак і видаляючи мікроби. Дослідження [2] проведено, щоб оцінити очищення води використанням *Phyllanthus emblicawood*. В результаті колір, аромат, каламутність, провідність, тверді частинки, лужність, кальцій, залізо, хлорид і рівень нітрату були збільшені в випробувальному контейнері. рН, повна твердість, сульфат і рівні магнію були зменшені. Рівень кишкової палички, повних coliforms і фекальних coliforms був знижений.

В роботі [3] наведена інформація про метод магнітного очищення води. У дослідженні розглянуті і розкриті позитивні аспекти магнетизму і магнітних матеріалів для очищення води. Кілька методів очищення можуть забезпечити відповідність води стандартам [4]. Магнітне розділення - один з цих методів очищення. Він застосовується в гірничодобувній промисловості. Забезпечує не тільки очищення води, але і очищення труб від налипання домішок на внутрішній стінці труб.

Впровадження комерційно доступного імпульсного електромагнітного поля. (PEMF) широко використовується для управління масштабуванням в таких процесах, як зворотний осмос (RO) і градірні. Його використання покращує коагуляція неорганічних частинок, таких як карбонат кальцію [4]. Щоб забезпечити науковий підставою для таких вимог, характеристики осадження карбонату кальцію при впливі PEMF проведено це дослідження [5-7].

Експерименти, для оцінки ефекту обробка магнітним полем по схильності сольового розчину до утворення відкладень в першу чергу іонів бікарбонату кальцію [8]. Позитивні результати були отримані з використанням динамічної Система Scale Loop з розсолем, що піддаються впливу магнітного поля, що створюється магнітами Гаусса марки H45 Ш в діаметральній орієнтації на 2,5 с. Після магнітного впливу, сольовий розчин піддавали впливу підвищеної температури 150 ° C при тиску від 1 бар до 5 бар.

Проводилось також дослідження [9] впливу етилендіамінтетраметіленфосфоновой кислоти на натрій (EDTMPS) по осадженню CaCO<sub>3</sub> в змінному електромагнітному полі (AEMF) і ультразвукове (УЗД) вплив. Варіації значення рН і Ca<sup>2+</sup> контролювали концентрацію розчину жорсткої води, кристалічну фазу і випадання кристалів CaCO<sub>3</sub> була охарактеризована методами XRD і SEM. У експериментальні результати показують, що присутність EDTMPS може пригнічувати осадження шкідливих домішок.

Експерименти, проведені в рамках описаних дослідження, були проведені для оцінки ефекту обробка магнітним полем по схильності сольового розчину до утворення відкладень в першу чергу іонів



бікарбонату кальцію [8]. Позитивні результати були отримані з використанням динамічної Система Scale Loop з розсолем, що піддаються впливу магнітного поля, що створюється магнітами Гаусса марки H45 Ш в діаметральній орієнтації на 2,5 с. Після магнітного впливу, сольовий розчин піддавали впливу підвищеної температури 150 ° С при тиску від 1 бар до 5 бар.

Проводилось також дослідження [9] впливу етілендіамінтетраметіленфосфоновой кислоти на натрій (EDTMP) по осадженню CaCO<sub>3</sub> в змінному електромагнітному полі (АЕМФ) і ультразвукове (УЗД) вплив. Варіації значення рН і Ca<sup>2+</sup> контролювали концентрацію розчину жорсткої води, кристалічну фазу і Морфологія випали кристалів CaCO<sub>3</sub> була охарактеризована методами XRD і SEM. У експериментальні результати показують, що присутність EDTMP може пригнічувати осадження шкідливих домішок.

**Мета дослідження.** Обґрунтувати параметри робочих режимів очищення рідини за допомогою електромагнітного способу фокусування, з подальшим видаленням з потоку шкідливих домішок.

**Завдання дослідження:**

–встановити залежності ларморового радіусу і висоти параболоїда обертання заряджених домішок від струму котушки фокусування ЕМСОЖ;

–створення математичної моделі ЕМСОЖ;

–обґрунтування параметрів робочих режимів ЕМСОЖ.

–визначення можливості управління рухом домішок котушкою їх фокусування.

–розробка методики розрахунку і вибору параметрів магнітної аксіально-симетричної системи очищення водного середовища.

–створення та промислове впровадження інноваційних систем фізико-механічного очищення води;

–формулювання гіпотези дослідження Іони забруднюючих домішок, що знаходяться в потоці рідини

**Методи дослідження.** При проведенні дослідження використані наступні методи: **методом структурного аналізу та синтезу** обрано спосіб та засіб керування станом водного середовища шляхом магнітного впливу; **методом абстрагування** потік в'язкої рідини представлено як трансляційний рух іонів та молекул рідини в напрямку прикладеної сили; **методом формалізації** використано основні принципи аналітичної динаміки, електродинаміки суцільних середовищ, математичної фізики та теорії розв'язку диференціальних рівнянь при виведенні закономірностей руху часточки в постійному аксіально-симетричному магнітному полі.; **системний підхід** для комплексного дослідження впливу магнітного поля на водне середовище з розділенням на: мікрое вплив та макрое вплив, дослідження їх як єдиного цілого із узгодженим функціонуванням усіх елементів та частин; **планування експерименту, експеримент** для підтвердження аналітичних досліджень процесу магнітного впливу на водні середовища. математичного моделювання досліджуваного процесу в вигляді лінійного поліному та дослідження його **методами математичної статистики**; хімічний аналіз води: **метод виміру масової концентрації загального заліза з сульфосаліциловою кислотою**; **метод визначення загальної жорсткості води**; **метод визначення концентрації магнію та кальцію** об'ємним способом.

**Основні результати та їх обговорення.** Магнітна обробка води може бути ефективною при насичені іонами кальцію і карбонату. Магнітний потік сприяє дробленню агрегатів феромагнітних частинок на фрагменти і окремі частинки, «звільнення» їх від водної оболонки, утворення газових мікро бульбашок.

Феромагнітні мікрочастинки створюють центри кристалізації, формування накипу. Вони менше осідають на тепло напружених поверхні і більше - всередині водного потоку. Газові мікро бульбашки сприяють флоатації часток забруднення. На практиці не завжди отримують однаковий позитивний ефект. Крім того, при температурах середовища понад 110...120<sup>0</sup>С, ефективність даного методу значно падає. Отже, така обробка не може застосовуватися для підготовки води парових котлів, де температура нагріву води більше 120<sup>0</sup>С.

Під час магнітної обробки утворюється вуглекислота. Добутий вуглекислий газ в закритих системах з великою витратою води необхідно встановлювати Дегазатори. Що виходять пластівці необхідно виводити із системи видаляючи шлами. При цьому необхідно враховувати, що відцентровий циркуляційний насос повинен встановлюватися до магнітного апарату, щоб пластівці не руйнувалися.

Очистка полягає в обробці середовища спрямованими ультразвуковим потоком від багаточастотного генератора акустичних коливань (ГАС) і знакозмінним повздовжнім та поперечним магнітним полем – блок знакозмінного магнітного поля (БЗМ) та магнітна аксіально-симетрична система (МАС) – з послідовним адсорбуванням домішок – фільтр адсорбційної очистки (ФАО).

Система включає чотири ступені очищення середовища. Ультразвукова та магнітна обробка призводять до вивільнення внутрішньої енергії самого середовища, що значно підвищує ККД процесу реструктуризації рідинного середовища з остаточним очищенням за рахунок адсорбційного фільтру.

Фільтрат є дуже агресивним середовищем. Він містить велику кількість механічних, солевих, жирових, вуглеводневих домішок, завислого піску, розчинів солей важких металів, елементів, що утворюють з кислотами нерозчинні з'єднання [2]. Окремі домішки фільтрату мають достатню площу контакту з внутрішньою поверхнею труби. Адгезійна сила налипання на стінки трубопроводу перевищує рушійну силу. Це обумовлює активне налипання домішок на стінках трубопроводу. Умовний прохід труб зменшується, що зменшує пропускну спроможність системи видалення фільтрату. Боротьба з налипанням фільтрату на внутрішні поверхні труб виконується за принципом, наведеним на рис. 1.

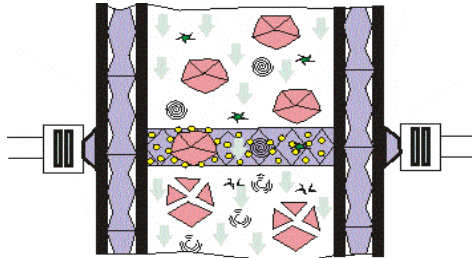


Рисунок 1– Принцип запобігання осаду фільтрату на трубах

Відомі на сьогодні механічні, хімічні, вібраційні способи очищення трубопроводів і зменшення агресивності фільтратів виробництва є трудомісткими та малоефективними. Вони не дають змоги рівномірно обробити весь об'єм фільтрату, шари якого рухаються в трубопроводі з різними швидкостями. Окреме використання гідрокавітаційних та ультразвукових способів очищення рідинних середовищ також має малу ефективність оскільки ультразвукове випромінювання відбувається з малої площі випромінювачів. Це не дозволяє збільшити інтенсивність ультразвукових коливань, що вводяться в середовище з метою його кавітаційної обробки. При намаганні збільшити інтенсивності коливань на поверхні випромінювачів утворюється кавітаційний двофазний прошарок, який поглинає та розсіює ультразвукову енергію. При озвучуванні фільтрату коливаннями з інтенсивністю, при якій не досягається поріг виникнення кавітації, коли тиск у ультразвуковій хвилі в фазі розрідження не є нижчим тиску насиченої пари у середовищі і кавітація не виникає.

Оскільки фільтрат є багатокомпонентною сумішшю - кожен з компонентів має свою власну резонансну частоту коливань. Руйнування забруднюючих домішок вимагає створення багаторезонансних генераторів з регулюємою власною частотою коливань. Це ускладнює конструкцію системи очищення фільтрату

**Метою створення автоматичної системи очистки фільтрату** є підвищення продуктивності очищення від іонів важких металів і подальшого попередження відкладення солей на внутрішніх поверхнях труб.

Завданням створення технології очищення фільтрату є деполімеризація великих молекулярних ланцюгів за рахунок використання сумісної дії керованих ультразвукових, електромагнітних та гравітаційних потоків, раціонального перерозподілу енергонасиченості технологічних процесів.

**Суть запропонованої системи.** Використання запропонованої магнітної ультразвукової адсорбційної системи обробки (МУАСО) рідинних середовищ дозволить мінімізувати кількість домішок у фільтраті, видалити старі відкладення домішок з внутрішньої поверхні стінок трубопроводу і використовувати екологічно безпечною технологію для очищення фільтрату.

Технологія, що пропонується, передбачає прокачування фільтрату під тиском через послідовно встановлені гідродинамічний, ультразвуковий кавітатори, блок знакозмінного магнітного поля, фільтр адсорбційної очистки, рис. 2.

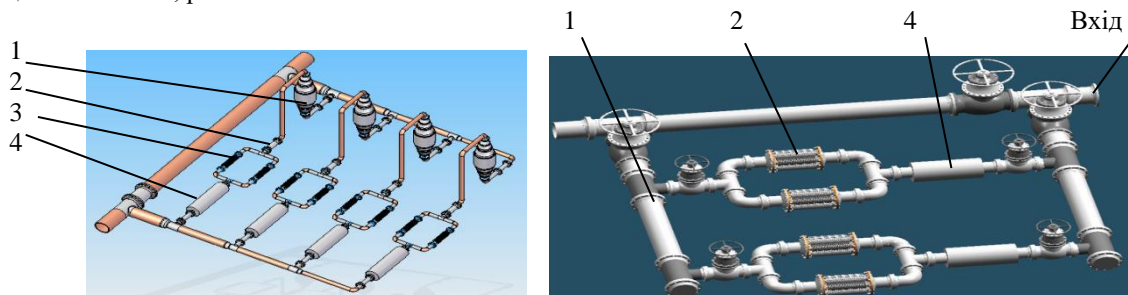


Рисунок 2 – Технологічна схема МУС: 1 – Блок адсорбційного фільтрування (БАФ); 2 - Блок магнітного циклонування (БМЦ); 3 – Блок знакозмінного магнітного поля (БЗМ); 4 – Генератори акустичних коливань (ГАК)

Розроблено чотирихступеневу магнітно-кавітаційну систему очищення робочої рідини, рис. 3. Першому ступеню відповідає підготовка води генератором ультразвукових коливань (ГАК). Другим ступенем є підготовка води повздовжнім аксіально-симетричним магнітним полем – блоком знакозмінного поля (БЗМ). Третя ступень передбачає обробку поперечним аксіально-симетричним магнітним полем – магнітною аксіально-симетричною системою (МАКС). І четверта ступінь забезпечує адсорбційну фільтрацію потоку. Система очищення фільтрату передбачає виключення з робочого процесу однієї чи декількох систем підготовки води в разі їх виходу з ладу. Для цього використовують засувки.

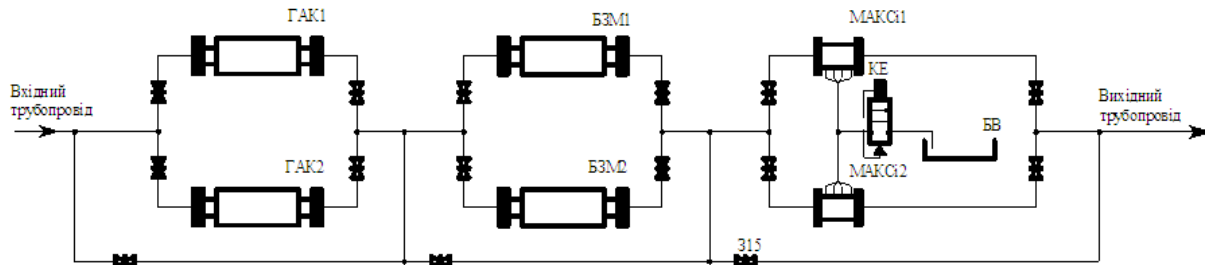


Рисунок 3 - Технологічна схема магнітно-кавітаційної системи очищення робочої рідини

Таким чином, очистка полягає в обробці середовища спрямованими ультразвуковим потоком від багаточастотного генератора акустичних коливань (ГАК) і знакозмінним повздовжнім та поперечним магнітним полем – блоком знакозмінного магнітного поля (БЗМ) та магнітна аксіально-симетрична система (МАКС) – з послідовним адсорбуванням домішок – фільтр адсорбційної очистки (ФАО). Конструктивне рішення яке впроваджено у виробництво в місті Кропивницькому наведено на рис. 4.



Рисунок 4 – Конструктивне рішення системи очищення фільтрату

Ультразвукові кавітатори закріплені на зовнішній поверхні трубопроводу і мають налаштування на власну частоту коливань домішок, що присутні у фільтраті. При руйнуванні домішок у резонансному режимі їх площа контакту з внутрішньою стінкою трубопроводу зменшується і існуючий шар налипання руйнується, а новий не осідає на внутрішніх поверхнях трубопроводу. Навантаження трубопроводу пружним і ультразвуковими коливаннями унеможливує утворенню осаду на внутрішній поверхні і сприяє очищенню труб від існуючих відкладень. Затверділі раніше утворенні відкладення руйнуються та відшаровуються від металеві поверхні внаслідок різниці в значеннях модулів пружності металу і відкладень.

Інтенсивність ультразвукових коливань внутрішньої поверхні труб обирають вищою за поріг виникнення у фільтраті ультразвукової кавітації. Крім того, гідродинамічні кавітатори створюють кавітаційні бульбашки діаметром  $10^{-4}$  м, які є зародками для утворення більш мілких  $10^{-9}$  м, частота захоплення яких наближається до власної частоти коливань середовища, що оброблюється. При цьому можливий резонансний режим, який забезпечує руйнування внутрішньої структури фільтрату

Ультразвукові кавітатори забезпечують лінійні переміщення резонансні повздовжні-згинальні коливання та радіально-згинальні коливання. Ультразвукові генератори монтується в пучностях стоячої пружної хвилі деформації.

У гідродинамічному кавітаторі внаслідок значної різниці швидкостей в потоці фільтрату досягається місцеве зниження тиску до рівня тиску насиченої пари в рідині до даних умов і ви никає гідродинамічна кавітація. Кавітаційні каверни, заповнюються паро-газовою сумішшю і потім руйнується, з

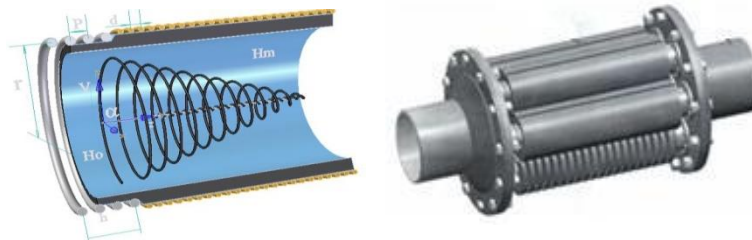
утворенням великої кількості бульбашок меншого діаметру. При попаданні в зону підвищеного тиску бульбашки захлопується з утворенням сферичних хвиль, кумулятивних струменів, великої кількості зародків кавітації

Кожний з хвилеводів-випромінювачів генератора ультразвукового потоку ГАК, рис. 5, настроюють на власну частоту коливань певного різновиду домішок, які забруднюють рідину. Конкретна робоча частота хвилеводу-випромінювача визначається товщиною п'єзокерамічних пластин, її регулювання і підстроювання виконують автоматично завдяки блоку електроніки.



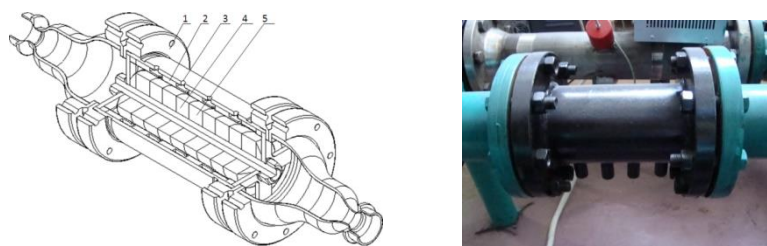
*Рисунок 5 – Генератори акустичних коливань*

Одночасно з облученням потоку рідини система передбачає обробку води повздожнім магнітним полем БЗМ, рис. 6. Кожний магнітний елемент БЗМ настроюють на власну частоту коливань певного різновиду домішок. Різні параметри магнітного поля забезпечують змінними геометричними розмірами магнітних елементів.



*Рисунок 6 – Схема і система обробки води повздожнім магнітним полем БЗМ*

При проходженні фільтрату через БЗМ проводиться також його обробка поперечним магнітним полем. За рахунок аксіально-симетричного поперечного магнітного поля (МАКС), рис. 7, заряджені частинки домішок затримують заряджені частинки в просторі системи, з подальшим безпосереднім їх видаленням з потоку.



*Рисунок 7 - Магнітна аксіально-симетрична система обробки води МАКС*

МАКС працює таким чином. Потік водного середовища надходить з робочого трубопроводу (не зображений), який з'єднано з пристроєм за допомогою фланців 1, протікає по кільцевому каналу, що утворений внутрішніми накопичувачами 2, кільцевими магнітами 4 та полюсними наконечниками 5. Під дією постійного аксіально-симетричного магнітного поля частки домішок зміщуються до внутрішніх накопичувачів 2, і через канали відведення 3 висококонцентрована суміш часток домішок та водного середовища безпосередньо видаляються з потоку через електромагнітний клапан у допоміжний бак.

Далі фільтрат надходить у фільтр адсорбційної очистки ФАО. Потік рідини, що містить розчинену речовину, надходить у шар пористих зерен і омиває їх, заповнюючи міжзернові порожнини шару адсорбенту. У результаті масопереносу розчиненої речовини до зовнішньої границі зерен адсорбенту і від зовнішньої границі зерна по системі пор до його центра, молекули речовини адсорбуються і

концентрація розчину в міру його просування уздовж шару знижується від початкової до гранично допустимої.

Конструктивні варіанти блоку адсорбційного фільтрування ФАО магнітно-ультразвукової системи очищення водних середовищ представлені на рис. 8.

На рисунку 1.8 зліва направо та зверху вниз відповідно показано:

- насосну станцію з ФАО; - збиральне креслення фільтра;
- фільтруючу касету; - елементи фільтруючої касети;
- результати роботи фільтру за один цикл - Вода після і до очищення

ФАО працює наступним чином - балон, що є корпусом фільтру, заповнений фільтруючим середовищем - клинопіглолітом. У верхній частині балону закріплено автомат, який змінює напрямок потоків води для виконання процесів фільтрації або регенерації. Автомат керує таймером і витратоміром, що дає змогу підтримувати оптимальний час кожного циклу. Під час фільтрації водний потік проходить крізь фільтруюче середовище і очищується від іонів домішок. При зменшенні ефективності адсорбції БАФ переключасться на цикл зворотного промивання та реагентна обробка фільтру розчином марганцю для відновлення хімічної активності фільтруючого середовища.



*Рисунок 8 - Конструктивні варіанти блоку адсорбційного фільтрування магнітно-ультразвукової системи очищення водних середовищ*

Система МУС проходила також виробничу апробацію на третьому нафтодобувному промислі НГВУ "Чернігівнафтогаз" з 2016 до 2020 року. За 4 місяці внутрішній діаметр труб для закачування відстояної від нафти води зменшився з 200 мм до 58 мм. Після введення в експлуатацію МУС шар забруднень на внутрішніх поверхнях трубопроводів зменшено з 4 см до 1,5 мм., (рис.9). Це підтверджує, що система здатна повністю очищувати та запобігати появі відкладень на внутрішніх поверхнях трубопроводів. Крім того, запобігалась корозія трубопроводів, так як зменшено кількість осередків кристалоутворення.



*Рисунок 9 – Результати очищення внутрішніх поверхонь 208 труб на третьому нафтодобувному промислі НГВУ "Чернігівнафтогаз": ліворуч - труба до очищення, праворуч – труба після очищення системою МУС*

**Висновки.**

1. Розроблено магнітно-кавітаційну технологію очищення робочої рідини, яка включає ультразвукову обробку рідини, що впливає на макроструктури, та магнітну обробку рідини, що впливає на мікроструктури домішок рідини. Таким чином, магнітно-кавітаційна технологія очищення рідини впливає на широкий спектр домішок в рідині.

2. Використання для очистки рідини від домішок пристроїв з аксіально-симетричним повздожнім та поперечним магнітним полем забезпечує створення однорідного в об'ємі рідини магнітного поля, що підвищує ефективність впливу магнітного поля на рідину.

3. Магнітно-кавітаційна технологія очищення робочої рідини використовує внутрішню енергію рідинного середовища, що підвищує ККД процесу очищення робочої рідини. Технологія екологічно безпечна – не має відходів, та енергозберігаюча – за рахунок використання постійних магнітів.

**Список використаної літератури**

1. Abdulhussain A. Abbas, Guo Jingsong, Liu Z. Ping, Pan Y. Ya, Wisaam S. Al-Rekabi. Review on Land&#64257 || Leachate Treatments [Text]/ Abdulhussain A. Abbas, Guo Jingsong, Liu Z. Ping, Pan Y. Ya, Wisaam S. Al-Rekabi. //American Journal of Applied Sciences. 2009; 6(4): page 672-684].

2. Sathish, Selvaganesa Pandian, Arul Amuthan. Effect of soaking of Phyllanthus emblica wood in drinking-water for purification [Text] / Sathish, Selvaganesa Pandian, Arul Amuthan //International Journal of Pharmacology and Clinical Sciences. 2012; 1(1): page 19-27.

3. Ambashta Ritu D Water purification using magnetic assistance[Text]/ Ritu D. Ambashta, Mika Sillanpää//Journal of Hazardous Materials, Volume 180, Issues 1–3, 15 August 2010, Pages 38-49.

4. Piyadasa, C. et al. The application of electromagnetic fields to the control of the scaling and biofouling of reverse osmosis membranes—a review. Desalination 418, 19–34 (2017).

5. Salman, M. & Al-Nuwaibit, G. Anti-scale magnetic method as a prevention method for calcium carbonate scaling. TOJSAT 7, (2017).

6. Sun, J. et al. Performance and mechanisms of ultrafiltration membrane fouling mitigation by coupling coagulation and applied electric field in a novel electrocoagulation membrane reactor. Environ. Sci. Technol. 51, 8544–8551 (2017).

7. Piyadasa, C. et al. The influence of electromagnetic fields from two commercially available water-treatment devices on calcium carbonate precipitation. Environ. Sci. 3, 566–572 (2017).

8. Al Helal, A., Soames, A., Gubner, R., Iglauer, S. & Barifcani, A. Influence of magnetic fields on calcium carbonate scaling in aqueous solutions at 150 °C and 1bar. J. Colloid Interf. Sci. 509, 472–484 (2018).

9. Nan, Y. et al. Effect of alternating electromagnetic field and ultrasonic on CaCO<sub>3</sub> scale inhibitive performance of EDTMPS. J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 99, 104–112 (2019).

10. Єжов С. М. В. Класична механіка.[Текст]/ С. М. Єжов С. М., М. В. Макарець, О. В. Романенко //К.: ВПЦ "Київський університет", 2008.— 480 с.

11.Гайдадин А.Н. Применение полного факторного эксперимента при проведении исследований: метод. указания /А.Н. Гайдадин, С.А. Ефремова; ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – 16 с.

**O. Terentiev**, Dr. Sciences., Prof. ORCID 0000-0003-2523-2804

**A. Kleshchov**, Cand. Sc., (Eng).ORCID 0000-0002-9412-4156

**A. Vorfolomeiev**, Cand. Sc., (Eng).ORCID: 0000-0001-5789-5149

**M. Sergienko**, Assos. Prof. ORCID 0000-0001-8284-9072

**National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

**PURIFICATION OF LIQUID BY ELECTROMAGNETIC FOCUSING OF IMPURITIES**

*The article discusses topical issues of increasing the efficiency of the filtrate purification system by physical methods developed at the Institute of Energy Saving and Energy Management «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». The work is devoted to the urgent problem of introducing the latest resource-saving, energy-saving integrated technologies for the purification of contaminated liquid media. To date, not a single theoretical base has been developed, there are only hypotheses, and there are no practical methods for calculating the magnetic treatment of water. The article is devoted to the purification by physical methods of the filtrate of domestic and industrial wastewater of industrial and domestic waste. An electromagnetic control unit was used to clean the fluid flow. Reducing the aggressiveness of the filtrate involves multi-stage control of the trajectory of impurities when they are removed from the main stream. Taking into account the properties of the experiment planning matrix, the coefficients of the regression equation were calculated, which adequately reflect the processes of liquid purification during its magnetization. Pollutant ions are charged particles. To remove them from the general flow,*

it is necessary to place generators on the pipeline to create developed cavitation in the fluid flow and inductance. Cavitation bubbles are internal oscillators and, releasing energy upon impact, crush and purify impurities.

In practical water purification, insufficient attention is paid to the control of the dynamics of charged impurities by the action of external and internal forces. Magnetic treatment of an aqueous medium has a number of advantages over other physical methods: it acts on all groups of impurities; influence on both chemical and physical processes in the aquatic environment; leads to the vivacity of the environment within the enterprise due to the destruction of electromagnetic bonds between the molecules of the indium and impurities, activates the aquatic environment. The main advantage in the purification of an aqueous medium from ions of impurities is the ability to control mobile ions in a magnetic field, and therefore direct visions of impurities per stream. Magnetic treatment of aqueous media has found its application in many industries, which, in turn, confirms the effectiveness of such devices.

**Key words:** purification, filtrate, physical purification, ion focusing, Larmor precession, experiment planning.

#### References

1. Abdulhussain A. Abbas, Guo Jingsong, Liu Z. Ping, Pan Y. Ya, Wisaam S. Al-Rekabi. *Review on Land&#64257 || Leachate Treatments [Text]/ Abdulhussain A. Abbas, Guo Jingsong, Liu Z. Ping, Pan Y. Ya, Wisaam S. Al-Rekabi. //American Journal of Applied Sciences. 2009; 6(4): page 672-684.*
  2. Sathish, Selvaganesa Pandian, Arul Amuthan. *Effect of soaking of Phyllanthus emblica wood in drinking-water for purification [Text]/ Sathish, Selvaganesa Pandian, Arul Amuthan//International Journal of Pharmacology and Clinical Sciences. 2012; 1(1): page 19-27.*
  3. Ambashta Ritu D Water purification using magnetic assistance[Text]/ Ritu D. Ambashta, Mika Sillanpää//*Journal of Hazardous Materials, Volume 180, Issues 1–3, 15 August 2010, Pages 38-49.*
  4. Piyadasa, C. et al. The application of electromagnetic fields to the control of the scaling and biofouling of reverse osmosis membranes—a review. *Desalination 418, 19–34 (2017).*
  5. Salman, M. & Al-Nuwaibit, G. Anti-scale magnetic method as a prevention method for calcium carbonate scaling. *TOJSAT 7, (2017)*
  6. Sun, J. et al. Performance and mechanisms of ultrafiltration membrane fouling mitigation by coupling coagulation and applied electric field in a novel electrocoagulation membrane reactor. *Environ. Sci. Technol. 51, 8544–8551 (2017).*
  7. Piyadasa, C. et al. The influence of electromagnetic fields from two commercially available water-treatment devices on calcium carbonate precipitation. *Environ. Sci. 3, 566–572 (2017).*
  8. Al Helal, A., Soames, A., Gubner, R., Iglauer, S. & Barifcani, A. Influence of magnetic fields on calcium carbonate scaling in aqueous solutions at 150 °C and 1bar. *J. Colloid Interf. Sci. 509, 472–484 (2018).*
  9. Han, Y. et al. Effect of alternating electromagnetic field and ultrasonic on CaCO<sub>3</sub> scale inhibitive performance of EDTMPS. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 99, 104–112 (2019)*
  10. Yezhov, S.M. *Classical mechanics./ S.M. Yezhov, M.V. Makarets, O.V. Romanenko //.– K .: VPTs "Kyiv University", 2008. - 480 p.*
  11. Gaidadin A.N. *Application of a complete factorial experiment in research: a method. instructions./ A.N. Gaidadin, S.A. Efremova.–VolgSTU. - Volgograd, 2008. - 16 p.*
- 

Надійшла 21.10.2021  
Received 21.10.2021

## ПОГІРШЕННЯ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ДІТЕЙ ШКІЛЬНОГО ТА ДОШКІЛЬНОГО ВІКУ ЧЕРЕЗ ЗМІНУ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ТЕРИТОРІЇ ШКІЛ І ДИТЯЧИХ САДКІВ

*В роботі проаналізовано стан автопарку України та приведено статистичні кількості автомобілів у 2020 році. Метою роботи є оцінка забруднення важкими металами ґрунтів, що знаходяться на території дитячих освітніх закладів м. Києва, поблизу автомагістралей, та розрахунок ризику для здоров'я від впливу важких металів. Показано структуру житлового фонду України за роками забудови. Наведено вплив важких металів на здоров'я людини. Досліджено проби ґрунтів, які взяті на території міста Києва на дитячих майданчиках на вміст забруднюючих речовин. Проведено дослідження ризику для здоров'я дітей шкільного та дошкільного віку від впливу забруднення ґрунтів важкими металами на прилеглих територіях поблизу закладів освіти, де діти проводять велику частину свого життя. Було визначено водневий показник водних витяжок, проаналізовано сульфатно-хлоридний вміст, та визначено наявність основних катіонів та аніонів. Актуальність роботи полягає в проблемі забруднення ґрунтів на території закладів шкільної та дошкільної освіти, що потребує постійного перегляду. Важливо постійно здійснювати моніторинг ґрунтового покриву в межах прилеглих територій, проводити відбір проб з поверхневого шару та на глибинах. Також важливим є врахування даної проблеми при проектуванні та будівництві нових об'єктів.*

**Ключові слова:** *автотранспортний комплекс, екологічна безпека, забруднюючі речовини, ґрунтові витяжки, кислотність ґрунту, токсиканти, важкі метали.*

**Вступ.** Сучасні темпи урбанізації та індустріалізації, накопичення великої кількості промислових та побутових відходів, призвели до забруднення ґрунтів важкими металами. Ґрунт вважається важливим компонентом навколишнього середовища, він акумулює хімічні речовини і є джерелом вторинного забруднення атмосферного повітря та води. В ґрунті відбувається поєднання всіх біогеохімічних процесів різних екосистем. Відбуваються зміни біохімічних, метаболічних та фізіологічних процесів для рослин, що знаходяться на територіях з високим вмістом металів. Основними джерелами надходження хімічних речовин в ґрунт є викиди та скиди промислових підприємств, автотранспорт, побутові та виробничі відходи.

В період великої інтенсивності техногенного навантаження на екосистеми великих міст, постала проблема підтримання стабільності та попередження деградації. Найбільш загострюється проблема для урбанізованих територій де відбувається трансформація ґрунтового покриву, а також змінюється його біологічна активність, і як наслідок знижується спроможність виконувати головні екологічні функції.

Найбільш небезпечними токсикантами для здоров'я населення є важкі метали, які здійснюють токсичну, алергічну, канцерогенну та мутагенну дію. До переважаючих хімічних речовин, що забруднюють ґрунти відносять мідь, цинк, нікель, свинець, кадмій, марганець.

Вплив хімічних речовин, які забруднюють ґрунти, на здоров'я населення може виникати як при прямому контакті з ґрунтом (праця руками в землі, ходіння босими, ігри дітей в пісочницях та ін..) так і при опосередкованому потрапленні хімічних сполук в організм людини через середовища які контактують з ґрунтом (повітря, вода).

**Аналіз досліджень та публікацій.** Однією з важливих проблем урбанізації середовища виділяють екологічний аспект стану ґрунтового покриву. Особливо актуальною ця проблема є у великих промислових центрах, де фіксуються перевищення вмісту важких металів у приземному шарі. Важливою є особливість ґрунту накопичувати різні поллютанти та зберігати їх тривалий час. Тому проблема моніторингу забруднення ґрунтів приваблює дослідників не тільки різних країн світу але і України [1; 2]. Авторами [3; 4] здійснюється оцінка техногенного навантаження на придорожні екосистеми. В роботах встановлено, що навантаження на екосистеми здійснюється не тільки інтенсивним рухом автотранспорту, а також вплив мають і інші транспортно-експлуатаційні показники доріг [2].

У працях [1; 3; 4], звертається увага на важливість моніторингу міграції небезпечних сполук металів у ґрунтах урбоекосистем. Автор пропонує удосконалену методологію прогнозування екологічної небезпечності забруднення урбоекосистем сполуками металів шляхом визначення екологічного ризику за



допомогою розподілення Вейбулла для різних рівнів поелементного та поліелементного забруднення еквівалентно ГДК та природного геохімічного фону.

Здійснено аналіз особливостей техногенного впливу автомагістралей на придорожні екосистеми з використанням біоіндикаційних методів в роботах [5; 6].

У вище вказаних роботах в основному звертається увага на визначення концентрації важких металів у ґрунтах придорожніх смуг, проте автори не розглядають забруднення територій дитячих навчальних закладів, що знаходяться поблизу цих смуг.

Маленькі діти та немовлята особливо вразливі до забруднюючих речовин через їх швидкий ріст і диференціацію клітин, незрілість метаболічних шляхів і розвиток життєво важливих систем органів [7]. Освітні заклади є певним мікросередовищем впливу забруднюючих речовин на дітей, так як вони більшість свого часу проводять в таких закладах. Після проведених занять та ігор на вулиці, діти заносять в приміщення пил, який містить в собі шкідливі домішки. Дослідження [7; 8] показують, що інтенсивні рухи є джерелом тяжких металів в придорожньому пилі та ґрунтах, який як наслідок потрапляє в приміщення.

Тому дослідження ризику для здоров'я дітей шкільного та дошкільного віку від впливу забруднення ґрунтів важкими металами на прилеглих територіях поблизу закладів освіти, де діти проводять велику частину свого життя, є досить актуальним, і потребує визначення рівня екологічної безпеки і розробки відповідних природоохоронних заходів.

**Метою роботи** є оцінка забруднення важкими металами ґрунтів, що знаходяться на території дитячих освітніх закладів м. Києва, поблизу автомагістралей, та вивчення ризику для здоров'я від впливу важких металів.

**Матеріал і результати досліджень.** Здатність важких металів накопичуватись в живих організмах, утворювати високотоксичні сполуки та здатність не піддаватись біологічному розкладанню, відносить важкі метали до особливо небезпечних для здоров'я людини. Вплив який здійснюють важкі метали в організмі людини зображено в таблиці 1 [9].

Таблиця 1 – Вплив забруднення НС важкими металами на здоров'я людини

Хімічні елементи	Можливі захворювання при великих концентраціях важких металів в організмі людини.
Zn	Впливає на зміну морфологічного складу крові, сприяє розвитку злоякісних утворень та променевою хворобам.
Cd	Вражає печінку, нирки, здатен викликати рак легенів, шкідливість підсилюється його кумулятивністю.
Cu	Спричиняє рак органів дихання
Ni	Викликає алергії, бронхіальні астми, накопичується в печінці, підшлунковій та щитовидній залозі.
Pb	Викликає зміни в легенях дітей, підвищення смертності серцево-судинних захворювань, має кумулятивні властивості.

На сучасному етапі розвитку світової економіки автомобільний транспорт є основним видом внутрішнього транспорту та ключовим елементом, що забезпечує економічний та соціальний розвиток країни. Масове застосування автомобілів сприяло змінам у всіх економічних та соціальних сферах, змінам у плануванні та будівництві, у торгівлі та різних аспектах життя суспільства. Це стало приводом до глобального характеру. В даний час в найбільш розвинених країнах 75–80% пасажирських та вантажних перевезень здійснюється автомобільним транспортом [10],[11].

Згідно статистичних даних [12], станом на 2020 рік, в Україні налічується 9,7 млн. одиниць автомобільного транспорту, частка легкових автомобілів складає 87% і становить 8,4 млн. одиниць. Проте, рівень автомобілізації в Україні не є зависоким і становить 232 автомобілі на 1000 жителів, а середній вік легкових автомобілів складає 22,4 роки.

За останніх 5 років рівень виробництва нових автомобілів в Україні знизився до критично низьких показників. Обсяг виробництва легкових автомобілів за останні 10 років впав майже в 50 разів [13]. Основними підприємствами виробниками легкових автомобілів в Україні є ПрАТ «Запорізький автомобілебудівний завод», корпорація «Богдан», ТзОВ «Кременчуцький автоскладальний завод», ПрАТ «Єврокар». За статистичними даними Укравтопрома, у 2020 році українські виробники виготовили 4202 одиниці легкових автомобілів, тоді як кількість імпортованих автомобілів з інших країн становила 544043 одиниць. Частка вживаних імпортованих авто переважає у загальному значенні і становить близько 70 %. В 2020 році в Україну було ввезено 385853 одиниць легкових автомобілів, і лише 25% з них були молодше 5 років, тоді як частка нових авто становила 7% (рис.1). Враховуючи низьку вартість старих автомобілів з

Європи, які гнє відповідають Європейським стандартам якості, українські споживачі надають їм перевагу, так як система контролю за якістю автомобілів в Україні не налагоджена на достатньому рівні [14].

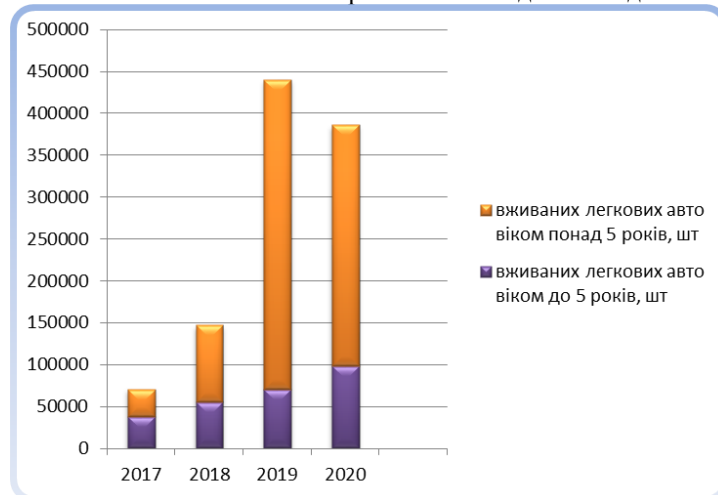


Рисунок 1 – Динаміка імпорту вживаних легкових автомобілів в період 2017- 2020 рр.

Більшість житлових комплексів, у великих містах, збудовані ще за радянськими будівельними нормами, тому постає проблема паркування приватних автомобілів, тому що раніше не очікувався такий високий рівень автомобілізації, тому біля житлових комплексів проектувалось до 10 паркомісць, тоді як в даний час цього не вистачає щоб забезпечити потреби навіть половини мешканців будинків. На рисунку 2 наведена структура житлового фонду України за роками забудови [15],[16].

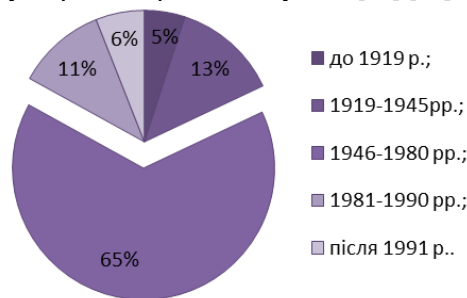


Рисунок 2 – Структура житлового фонду України за роками забудови

Нестача паркувальних місць призводить до того, що власники припарковують приватні автомобілі в дворах поблизу дитячих майданчиків, в зонах рекреації та поблизу вікон. Таке зберігання автомобілів спричиняє накопичення важких металів та інших забруднюючих речовин в ґрунтах.

Для дослідження було проаналізовано проби ґрунтів взяті поблизу основних автомагістралей м. Києва на території дитячих майданчиків. Точки відбору проб зображені на рисунку 3.

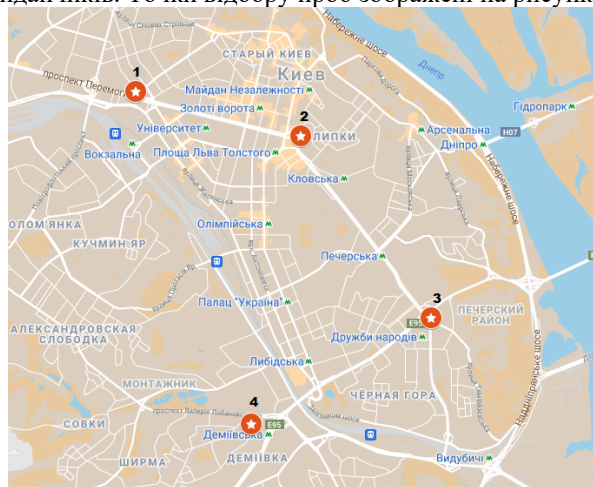


Рисунок 3 – Карта розташування точок взяття проб ґрунту

Центральна геофізична обсерваторія проводить моніторинг рівня забруднення ґрунтів важкими металами [17]. Згідно щорічних даних моніторингу забруднення важкими металами ґрунтів, найбільшими забруднювачами є Zn та Pb. Вміст цинку в пробах досліджуваних точок варіюється від 90 до 564 мг/кг, при цьому значно перевищуючи допустимі норми (рис. 4).

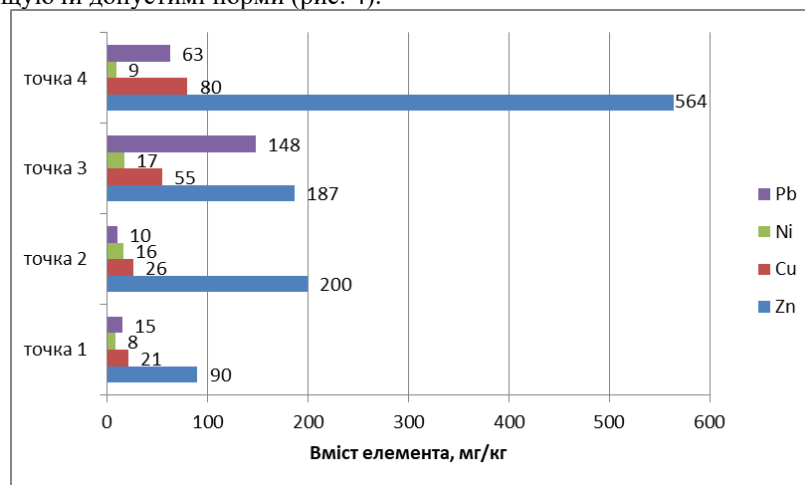
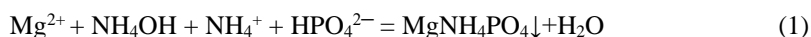


Рисунок 4 – Вміст важких металів у пробах ґрунту, відібраних у м. Київ

Проведено аналіз ґрунтових витяжок території чотирьох об'єктів. Для екологічної оцінки ґрунтового покриву визначено рівень кислотності (pH) ґрунту та здійснено якісне та кількісне визначення сольового вмісту за наявності основних макро- та мікрокомпонентів (катиони, аніони). Якісний аналіз щодо виявлення розчинних солей неорганічних кислот підтвердив наявність у пробах катіонів  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  та аніонів  $\text{HCO}_3^{-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^{-}$ ,  $\text{NO}_2^{-}$ .

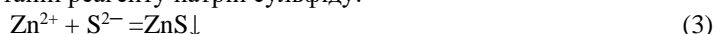
Іони магнію визначалися за допомогою магnezіальної суміші (динатрій гідрогенфосфат у присутності  $\text{NH}_4\text{OH}$  та  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ):



Наявність іонів кальцію підтверджено за допомогою використання реагенту амоній оксалату у присутності аміаку:



Іони цинк були виявлені при використанні реагенту натрій сульфід:



При виявленні аніонів хлору застосовувалася характерна реакція із аргентум хлоридом у середовищі розведеної нітратної кислоти:



Визначення присутності сульфат-аніонів у розчинах було проведено з використанням реагенту  $\text{BaCl}_2$  за присутності хлоридної кислоти:



В усіх пробах характер середовища був слабо кислий (pH 6-6,5 одиниць). Відповідно, у розчині відсутні аніони  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , які б внаслідок їх гідролізу спричинювали б лужний характер середовища розчину. Отже, можна відповідно до традиційних методик об'ємного аналізу, спочатку доцільно оцінити у пробах наявність гідроген карбонат аніону, присутніх у складі  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$   $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ .

Титрування проведено в присутності індикатора метилового оранжевого, який у точці еквівалентності знебарвлюється за pH=3,6 дозволило визначити вміст аніону  $\text{HCO}_3^{-}$ :



У досліджуваних пробах встановлено вміст кількості речовини еквівалентів цих аніонів:

$$n\left(\frac{1}{z^*}(\text{HCO}_3^{-})\right) = 1,7 \div 2,0 \text{ ммоль/л} \quad (7)$$

Кількісне визначення вмісту катіонів кальцію, магнію та цинку було здійснено титруванням проб розчином трилону Б в присутності еріохрому чорного Т у лужному середовищі за наявності буферної суміші  $\text{NH}_4\text{OH}$   $\text{NH}_4\text{Cl}$ .

Кількість речовини мілімоль еквівалентів двозарядних іонів  $n\left(\frac{1}{z^*}(\text{Me}^{2+})\right)$  становила  $2,0 \div 2,8$  ммоль/л.

У переважних випадках для більшості природних зволжених ґрунтів іони  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{Mg}^{2+}$  зв'язані з аніонами  $\text{HCO}_3^{-}$ . При цьому у мало мінералізованих досліджуваних витяжках характерним є

співвідношення 4:1 за кількостями речовини еквівалентів кальцію та магнію. Вміст еквівалентів сульфат та хлорид аніонів складає відповідно до балансу:

$$n\left(\frac{1}{z^*}(Me^{2+})\right) = n\left(\frac{1}{z^*}(HCO_3^{-1})\right) + n\left(\frac{1}{z^*}(SO_4^{-2})\right) + n\left(\frac{1}{z^*}(Cl^{-})\right) \quad (8)$$

$$n\left(\frac{1}{z^*}(SO_4^{-2})\right) + n\left(\frac{1}{z^*}(Cl^{-})\right) = 0,3 \div 0,8 \text{ ммоль/л} \quad (9)$$

Переважає більшість (90-95%) розчинних хлоридів та сульфатів- це солі натрію. Присутність іонів цинку може бути оцінена відповідно як  $(1,5 \div 4)10^{-2}$  ммоль/л.

Характерним для усіх досліджуваних зразків було виявлення у їх складі іонів  $NO_2^{-1}$ , що мають відновлювальні властивості. Окислювальність водних витяжок визначали, титруючи пробу у кислому середовищі розчином калій перманганату. За цим параметром досліджувані проби суттєво не відрізнялися: 5-6,3 мг  $KMnO_4$  витрачалося на титрування 1 л води. Відповідно, оціночний вміст нітриту іонів становить  $(0,8 \div 1,0) \cdot 10^{-2}$  ммоль/л.

Серед присутніх у ґрунтах забруднювачів можна виділити ті, поява яких імовірно зумовлена антропогенними джерелами: викиди промислових виробництв та котельень, інтенсивний автомобільний рух, спалювання сміття, обробка доріг антижелезними сумішами.

Концентрація домішок у поверхневих шарах ґрунту залежить як від дії самого джерела забруднення, так і від властивостей ґрунтів, а саме їх різною ємністю катіонного обміну, яка обумовлена гранулометричним складом. Здатність ґрунтів накопичувати шкідливі домішки знижується в ряду: глина – суглинки – піски.

Слід зазначити, що виявлення в ґрунтах іонів цинку створює несприятливий вплив на рослини. Рядом досліджень встановлено здатність іонів  $Zn^{2+}$  утворювати міцні комплекси з білками, їх пригнічуюча дія на синтез галактоліпідів та хлорофілу, порушення сумарної проникності клітинних оболонок, тобто фотосинтезу, дихання та осморегуляції.

Внесення у зимовий період засобів, що запобігають обледенінню доріг обумовлює привнесення легкорозчинних солей разом з талими водами у ґрунтові породи. Як наслідок, формуються солонцюваті ґрунти, у яких погіршуються водно-фізичні характеристики. В таких умовах погіршується розвиток рослин, порушується споживання ними біогенних елементів.

Поява у ґрунті зв'язаного Нітрогену, спричинене випадінням кислотних дощів, внаслідок поглинання атмосферною вологою кислотного оксиду нітрогену (IV):



Основним антропогенним джерелами нітроген оксидів є газові відходи автотранспорту, спалювання вихлопного палива на ТЕС. Відсутність у ґрунтах зв'язаного Нітрогену у вигляді нітратів  $NO_3^{-1}$  обумовлено тим, що в природних умовах нітрат-іони відновлюються до нітриту-іонів, якщо є надлишок вологи або значна інтенсивність сонячної радіації. У деяких ґрунтах нітритний зв'язаний Нітроген є біогенним за походженням – він може утворюватись в результаті життєдіяльності мікроорганізмів. У проаналізованих пробах присутні незначні концентрації нітриту-аніонів, тому за цим компонентом стан ґрунтів є безпечним для життєдіяльності рослин.

**Висновки.** Таким чином, після проведеного дослідження ґрунтів на вміст забруднюючих речовин, можна стверджувати, що діти, які навчаються в школах та садочках, що розташовані поблизу автомагістралей піддаються постійному негативному впливу забруднюючих речовин. Вміст важких металів у досліджуваних ґрунтах перевищує допустимі норми і може викликати ряд захворювань. Діти особливо вразливі до такого виду забруднення, тому що мають невеликий зріст і постійно рухаються, піднімаючи пил, що містить частинки забруднюючих речовин. Аналіз автопарку України та структури житлового фонду, дозволяє стверджувати про недосконалість транспортної інфраструктури міста, зумовленою радянськими нормами забудови, яка є причиною екологічних проблем.

Тому проблема забруднення ґрунтів на території закладів шкільної та дошкільної освіти є досить актуальною і потребує постійного перегляду. Отже потрібно постійно здійснювати моніторинг ґрунтового покриву в межах прилеглих територій, проводити відбір проб з поверхневого шару та на глибинах. Також важливим є врахування даної проблеми при проектуванні та будівництві нових об'єктів. Освітні заклади, які опинилися в зоні автомагістралей, потребують додаткового моніторингу забруднюючих речовин в приміщенні. Потрібно звернути увагу на якість системи вентиляції в приміщеннях, а також забезпечити встановлення системи очищення повітря.

#### Список використаної літератури

1. Яковишина Т.Ф. Розвиток наукових основ удосконалення системи моніторингу мігрування небезпечних сполук металів у ґрунтах урбоєкосистем: дис. ... док. техн. наук: 21.06.01. Дніпро, 2019. 479с.
2. Васькіна І.В. Оцінка техногенного навантаження на придорожні екосистеми: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01. Суми, 2018. 214 с.

3. Шеховцева О.Г. Еколого-біологічна оцінка едафотопів урбоєкосистем міста Маріуполя: дис. ... канд. біол. наук: 03.00.16. Мелітополь, 2016. 224 с.
4. Кривицька І.А. Діагностика та моніторинг забруднення ґрунтів важкими металами в урбанізованих ландшафтах Приазов'я: дис. ... канд. біол. наук: 03.00.18. Харків, 2020. 187 с.
5. Рабош І.О. Підвищення екологічної безпеки і моніторинг впливу об'єктів автотранспортної інфраструктури на довкілля: дис. ... док. філос.: 101. Київ, 2021. 214 с.
6. Борисов О.О. Наукові засади оцінювання рівня екологічної безпеки міських зон відпочинку, прилеглих до автодоріг: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01. Київ, 2020. 253 с.
7. Tran DT, Alleman LY, Coddeville P, Gallo JC. Elemental characterization and source identification of size resolved atmospheric particles in French classrooms. *Atmos Environ. Atmospheric Environment*. 2012;54:250–9.
8. Rashed MN. Total and extractable heavy metals in indoor, outdoor and street dust from Aswan City, Egypt. *Clean Soil Air Water* 2008;36:850–7.
9. Кармазиненко С. П. Важкі метали у компонентах навколишнього середовища (еколого-геохімічні аспекти): монографія / І.В. Кураєва, А.І. Самчук, Ю.Ю. Войтюк, В.Й. Манічев. Київ, 2014. С. 18-25.
10. Autos and fuels // International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. URL: <https://www.oica.net/category/auto-and-fuels/> (дата звернення 21.12.2021).
11. Державна служба статистики України. Транспорт. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення 19.12.2021).
12. Федерація роботодавців автомобільної галузі. *Статистичні дані*. URL: <https://fra.org.ua/uk/st/statistika> (дата звернення 16.12.2021).
13. Савченко С.М., Селіверстова А.С. Оцінювання стану та виявлення перспектив розвитку автомобілебудівних підприємств України. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління*. 2018. Т. 29 (68). № 3. С. 78-82.
14. Онищук О.О., Бучацький С.П. Ринок вживаних транспортних засобів в Україні: сучасний стан та перспективи. *Аналітичне дослідження*. 2021. URL: [https://eauto.org.ua/static/documents/Ринок\\_вживаних\\_авто\\_дослідження.pdf](https://eauto.org.ua/static/documents/Ринок_вживаних_авто_дослідження.pdf) (дата звернення 15.12.2021).
15. Сухонос М. К., Молодченко Т.Г. Аналіз технічного стану житлового фонду України та пропозиції щодо його оцінки. *Економічний вісник Донбасу*. 2014. № 1 (35). С. 51-55.
16. Житлове будівництво в Україні. *Статистичний збірник*. 2018. URL: [http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat\\_u/2018/zb/10/zb\\_gb2012-2017pdf.pdf](http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2018/zb/10/zb_gb2012-2017pdf.pdf) (дата звернення 1.12.2021).
17. Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України за даними спостережень гідрометеорологічних організацій у 2020 році. ЦГО ім. Бориса Срезневського. Київ, 2021. URL: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/data/ukr-zabrud-viz-1/oglyad-stanu-zabrudnennya-2020-sayt.pdf> (дата звернення: 07.12.2021).

A. Chepel, PhD student, ORCID 0000-0002-6967-6469

O. Kofanova, Dr. Sc. (Ped), Cand. Sc. (Ch.), Prof., ORCID 0000-0002-9851-6392

A. Pidgornyy, Cand. Sc. (Ch.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-4041-1053

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

#### **DETERIORATION OF THE HEALTH OF SCHOOL AND PRESCHOOL CHILDREN BY CHANGING THE TECHNOGENIC LOAD ON THE TERRITORY OF SCHOOLS AND KINDERGARTENS**

*The paper analyzes the state of the car fleet of Ukraine and provides statistical numbers of cars in 2020. The aim of the work is to assess the contamination of heavy metals in soils located on the territory of children's educational institutions in Kyiv, near highways, and to calculate the health risk from exposure to heavy metals. The structure of the housing stock of Ukraine by years of construction is shown. The influence of heavy metals on human health is given. Soil samples taken on the territory of the city of Kyiv at playgrounds for the content of pollutants were studied. A study has been conducted on the health risks of school and preschool children from the effects of soil contamination with heavy metals in the surrounding areas near educational institutions, where children spend most of their lives. The hydrogen index of aqueous extracts was determined, the sulfate-chloride content was analyzed, and the presence of basic cations and anions was determined. The urgency of the work lies in the problem of soil contamination in schools and kindergartens, which requires constant review. It is important to constantly monitor the soil cover within the surrounding areas, to take samples from the surface layer and at depths. It is also important to consider this issue when designing and building new facilities.*

**Keywords:** motor transport complex, ecological safety, pollutants, soil extracts, soil acidity, toxicants, heavy metals.

**References**

1. Yakovyshyna T.F., “Development of scientific bases for improving the system of monitoring the migration of hazardous metal compounds in the soils of urban ecosystems”, Dr. Tech. Sc. dissertation. Prydniprov. St. Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine, 2019.
2. Vaskina I. V. “Estimation of technogenic loading on roadside ecosystems”, Cand. Tech. Sc. dissertation. Sumy State University, Sumy, Ukraine 2018.
3. Shekhovtseva O.G. “Ecological and biological assessment of edaphotopes of urban ecosystems cities of Mariupol”, Cand. Biol. Sc. dissertation. Melitopol St. Ped. Univer. after Bohdan Khmelnytsky, Melitopol, Ukraine, 2016.
4. Krivitska I.A. “Diagnostics and monitoring of soil contamination by heavy metals in the urbanized landscapes of the Azov Sea”, Cand. Biol. Sc. dissertation. Kharkiv Nat. Univer. named after V. N. Karazin MES of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, 2019.
5. Rabosh I.O. “Improving environmental safety and monitoring the impact of road transport infrastructure on the environment”, Ph D. dissertation. Nat. Tech. Univer. of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, 2021.
6. Borysov O.O. “Scientific bases of the assessment of the level of ecological safety of urban recreational areas located nearby highways”, Cand. Tech. Sc. dissertation. Nat. Tech. Univer. of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, 2020.
7. Tran DT, Alleman LY, Coddeville P, Gallo JC. Elemental characterization and source identification of size resolved atmospheric particles in French classrooms. *Atmos Environ*. *Atmospheric Environment*. 2012;54:250–9.
8. Rashed MN. Total and extractable heavy metals in indoor, outdoor and street dust from Aswan City, Egypt. *Clean Soil Air Water* 2008;36:850–7.
9. S. Karmazinenko, I. Kuraeva and Y. Samchuk, “Heavy metals in the components of the environment (ecological and geochemical aspects)”, Kyiv, Ukraine, pp.18-25.
10. Autos and fuels. *International Organization of Motor Vehicle Manufacturers* [Online]. Available: <https://www.oica.net/category/auto-and-fuels>
11. State Statistics Service of Ukraine. *Transport* [Online]. Available: <http://www.ukrstat.gov.ua>
12. Federation of Automotive Employers. *Statistics* [Online]. Available: <https://fra.org.ua/uk/st/statistika>
13. S. Savchenko and A. Seliverstova, “Assessment of the state and identification of prospects for the development of automobile enterprises in Ukraine”, *Scientific notes of TNU named after VI Vernadsky*, vol. 29, pp. 78-82, 2018.
14. O. Onishchuk, S. Buchatsky, “The market of used vehicles in Ukraine: current status and prospects. *Analytical research* [Online]. Available: [https://eauto.org.ua/static/documents/Ринок\\_вживаних\\_авто\\_дослідження.pdf](https://eauto.org.ua/static/documents/Ринок_вживаних_авто_дослідження.pdf)
15. M. Sukhonos, T. Molodchenko, “ Analysis of the technical condition of the housing stock of Ukraine and proposals for its assessment,” *Economic Bulletin of Donbass*, vol. 1, pp. 51-55, 2014.
16. Housing construction in Ukraine. *Statistical collection 2018* [Online]. Available: [http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat\\_u/2018/zb/10/zb\\_gb2012-2017pdf.pdf](http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2018/zb/10/zb_gb2012-2017pdf.pdf)
17. Review of the state of environmental pollution in Ukraine according to the observations of hydrometeorological organizations in 2020. *Borys Sreznevsky Central Geophysical Observatory* [Online]. Available: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/data/ukr-zabrud-viz-1/oglyad-stanu-zabrudnennya-2020-sayt.pdf>

Надійшла 14.11.2021

Received 14.11.2021

### ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, які вказані нижче.

**У разі невідповідності поданих матеріалів статті пунктам цих вимог, а також якщо вони не відповідають тематиці наукового журналу, редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання!**

#### Обсяг статті

Загальний обсяг статті – від 6 до 10 сторінок формату А4. Сторінки повністю заповнені текстом. Схеми, рисунки, таблиці й формули повинні бути пронумеровані та розміщені в тексті після посилань на них. Матеріал має бути викладений стисло, без повторювань даних таблиць і рисунків у тексті. Неприпустимо використовувати елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули.

**Стаття має бути ретельно перевірена авторами та відповідати всім пунктам вимог до оформлення!!!!**

#### Текстовий редактор

Стаття набирається в текстовому редакторі Microsoft Word (версії 2007 та вище) і зберігається з розширенням \*.doc або \*.docx.

**Обов'язково** надсилається стаття, збережена у форматі \*.pdf !!!

#### **Загальне оформлення:**

**1) Мова.** Статті приймаються до друку двома мовами: українською та англійською.

#### **2) Параметри сторінки:**

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – 2,5 см.
- Вирівнювання основного тексту – за шириною.
- Перші рядки всіх абзаців – з відступом 1,0 см!!!
- Шрифт – Times New Roman, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – кегль 14.
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

#### **3) Структура статті:**

- **номер УДК** (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом кегль 10)
- **прізвища авторів** (приклад: І.І. Петренко (укр.), I. Petrenko (англ)) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання); індекс ORCID – обов'язково;
- (Порядок оформлення наукових ступенів та вчених звань описано нижче в цьому ж документі в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і наукових ступенів»).
- **повна назва організації** (навчального закладу, установи) – вирівнювання за правим краєм;
- **реферат обсягом від 1600 до 1800 знаків** повинен відображати короткий зміст статті, не повторювати назву, не містити загальних фраз та бути структурованим (мета дослідження, методика реалізації, результати дослідження, висновки). В англійській версії статті наводиться реферат не менше 1800 - 2000 знаків,
- **ключові слова:** (6–8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним + курсив.

Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи:

#### **Основний текст статті**

**Вступ** (постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується зазначена стаття);

**Мета та завдання** (формулювання цілей статті, постановка завдання);

**Матеріал і результати досліджень** (виклад основного матеріалу дослідження, з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, з можливим поділом на частини з відповідними назвами);

**Рисунки** (діаграми, фото тощо) подаються у чорно-білому зображенні разом із текстом, після посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів:** будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом. Рекомендується застосування растрових форматів з роздільною здатністю не менше 300 dpi. Рисунок має бути розташований у центрі, без обтікання текстом. Підписи до рисунків повинні містити нумерацію в порядку розміщення в тексті та пояснювальний підпис. Неприпустимо включати підписи до самого рисунка. **Рисунок не повинен займати всю площу аркуша!!!**

Крапки після назви структурних частин статті не ставити.

**Графіки** повинні містити підписи усіх осей на самому рисунку. Будь-який інший вигляд підпису розглядатись та виправляти не буде!

**Таблиці.** При заповненні слід користуватись шрифтом 10 кеглю. Кожна таблиця повинна мати порядковий номер та назву і розташовуватись після посилання на неї у тексті статті. Якщо таблиця не вміщується на сторінці або виходить на іншу, слід використати позначення «Продовження табл.».

**Формули повинні бути набрані** за допомогою редактора формул Math Type (версія 6.8 і вище) або внутрішній редактор формул у Microsoft Word з розмірами: звичайного символу – 11, великого індексу – 10, малого індексу – 9. Кириличні та грецькі символи мають бути набрані прямим шрифтом, латинські літери – похилим. Виняток становлять символи операторів і стандартних функцій, які набираються прямим шрифтом. Нумерація формул, на які є посилання в тексті, – справа в дужках. Цілі частини від десяткових відокремлюються комою **Одиниці розмірності можна набирати окремо від формул, або у формулах, з обов'язковим використанням проміжку.**

**Висновки:** (навести основні висновки з дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

**Список використаної літератури** наводиться в порядку посилань у тексті, відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках.

Список використаних літературних джерел подається двічі: мовою оригіналу відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

**У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!**

Для надання відомостей про авторів англійською слід використовувати загальноприйнятну лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

**Англійська анотація за обсягом рекомендується більшою за українську 1700-2000 знаків,** оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

**У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!**

**В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:**

(Анкети подаються 2 мовами (укр., англ.). Вказується повна назва організації або установки, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

Прізвище, ім'я, по-батькові автора (повністю, без скорочень)	
Вчений ступінь, вчене звання, посада	
Місце роботи кожного автора в називному відмінку (повна назва без скорочень)	
Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом	
Контактний телефон	
Електронна адреса	
ORCID	

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку статей.

**Редакція журналу здійснює перевірку на плагіат за допомогою спеціального програмного забезпечення!!!**

**Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" та не пройшли перевірку на плагіат, будуть повернуті на доопрацювання.**

**Увага!!! На електронну адресу журналу надсилається:**

- стаття версія в форматі \*.doc або \*.docx;
- стаття версія в форматі \*.pdf (ОБОВ'ЯЗКОВО);
- анкета відомостей про авторів;
- акт експертизи про можливість оприлюднення матеріалів у засобах масової інформації.

**Контакти:**

- тел.: +38(044) 204-82-37;
- сайт: <http://energy.kpi.ua>;
- e-mail: [kravkpi@ukr.net](mailto:kravkpi@ukr.net)