

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ НАУКОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ

Матеріали XXI Міжнародної  
науково-практичної конференції  
молодих вчених і студентів  
м. Київ, 23–26 квітня 2024 року

ТОМ 1



Київ- 2024

УДК 620.9(062)+621.311(062)  
С91

**Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики.** У 2-х т. : Матеріали XXI Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і студ., м. Київ, 23–26 квіт. 2024 р. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2024. – Т. 1. – 224 с.

Подано тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» за напрямками: атомна енергетика, ядерна захищеність та нерозповсюдження, теплогідравлічні процеси в тепло- і парогенеруючих установках, сучасні технології в тепловій та альтернативній енергетиці, проблеми теоретичної і промислової теплотехніки, енергетичний менеджмент та інжиніринг.

### **Головний редактор**

Є.М. Письменний, д-р техн. наук, проф.

### **Заступник головного редактора**

Я.Є. Трокоз, завідувач Науково-дослідної (експериментальної) лабораторії процесів в енергетичному обладнанні

### **Редакційна колегія:**

О.Ю. Черноусенко, д-р техн. наук, проф.

Н.М. Аушева, д-р техн. наук, проф.

О.В. Коваль, д-р техн. наук, доц.

В.О. Туз, д-р техн. наук, проф.

В.А. Волощук, д-р техн. наук, проф.

П.О. Барабаш, канд. техн. наук, доц.

П.П. Меренгер, ст. викл.

П.В. Новіков, канд. техн. наук, доц.

А.А. Демчишин, канд. техн. наук, доц.

І.А. Остапенко, асист.

Д.О. Федоров, асист.

Т.Б. Бібік, канд. техн. наук, ст. викл.

М.В. Воробйов, канд. техн. наук, доц.

Є.С. Алексеїк, ст. наук. співроб.

Н.В. Федорова, д-р техн. наук, проф.

Н.О. Притула, канд. техн. наук, доц.

Н.А. Буяк, канд. техн. наук, ст. викл.

### **Відповідальний секретар**

О.В. Авдєєва.

*Друкується в авторській редакції за рішенням Вченої ради Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
(протокол № 9 від 25 березня 2024 р.)*

© Автори тез доповідей, 2024

© КПІ ім. Ігоря Сікорського (НН ІАТЕ), 2024

СЕКЦІЯ №1

# **Атомна енергетика**

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Бедік В.О.

<sup>1</sup> Проф., д.т.н. Кравець В.Ю.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=18nJrv0AAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ КОНТЕЙНЕРІВ СУХОГО СХОВИЩА ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА НА ОСНОВІ ДВОФАЗНИХ ТЕРМОСИФОНІВ

**Постановка проблеми та її актуальність.** На сьогодні Українська енергетика переживає скрутні часи. Тривалий термін ворог бомбардував не ядерну енергетичну інфраструктуру. Як наслідок зріс дефіцит електроенергії та необхідність постачання її до споживачів. Враховуючи окупацію одного з головних сховищ відпрацьованого ядерного палива на Запорізькій АЕС основне навантаження на постачання електроенергії лягло на решту АЕС України. При цьому також є питання про зберігання відпрацьованого ядерного палива у сухих сховищах. Також є необхідність впровадження нових технологій для модернізації систем тепловідводу від контейнерів для зберігання палива. В якості одного з методів відводу теплоти для цього можна застосовувати випаровувально-конденсаційні системи на основі двофазних термосифонів. Це автономні теплопередавальні прилади, які мають еквівалентною теплопровідність на декілька порядків вищу за найбільш теплопровідних металів (мідь, срібло та інш.).

**Формулювання мети.** Проаналізувати наявні системи контейнерів сховища відпрацьованого ядерного палива для покращення їх температурних характеристик.

**Основна частина.** В Україні працюють чотири АЕС, на яких діють 15 енергоблоків типу ВВЕР (водо-водяний енергетичний реактор) загальною потужністю 13880 МВт. Через повномасштабне вторгнення значна частина генерації на інших типах електростанцій зменшилась а отже збільшилась й частка енергогенерації на АЕС. На даний момент, атомна енергетика стала опорою енергетичної системи країни. Взятши до уваги аналіз енергетичних потреб країни враховуючи дефіцит на вироблену електроенергію та можливості їх забезпечення вказують на доцільність і необхідність розвитку в Україні атомної енергетики.

На даний момент залишається актуальним питання про заміну постачальника ядерного палива а також необхідність приділити увагу процедурі зберігання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) в межах України.

Однією з найважливіших умов забезпечення сталої та безпечної експлуатації АЕС України є безпечне поводження з ВЯП у короткостроковій та довгостроковій перспективі. Технологія поводження з ВЯП на АЕС з реакторами ВВЕР, розроблена при проектуванні АЕС, ґрунтувалася на щорічному вивезенні ВЯП для переробки на підприємствах, що знаходяться у російській федерації. Дана технологія поводження з ВЯП у сучасних умовах є економічно невиправданою та неможливою для компанії та України загалом.

У ЦСВЯП реалізується технологія сухого зберігання ВЯП реакторів ВВЕР-1000 і ВВЕР-440 компанії Holtec. У проекті ЦСВЯП, на додаток до нормативних критеріїв, встановлені проектні критерії, засновані на характеристиках ВЯП реакторів ВВЕР:

- допустима температура оболонок твелів при сухому зберіганні в середовищі інертного газу: 350 °С - протягом терміну зберігання і 450 °С протягом не більше 8-ми годин при перехідних і аварійних режимах одноразово (за весь період зберігання);
- максимально допустима глибина вигорання палива в середньому по касеті для ВВЕР-1000 - 55000 МВт×доб/тU;

- ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів (Кефф) для всіх ділянок обладнання поводження і зберігання ВЯП - не більше 0,95 в умовах нормальної експлуатації, порушень нормальної експлуатації та проектних аваріях.

Контейнер заповнений гелієм який забезпечує тепловідвід від палива, проте це обмежує використання контейнера по кількості касет, що можна встановити. При аварійних ситуаціях, таких як витік гелію, нестача цього теплоносія може виникати перегрів.

**Можливі шляхи вирішення проблеми.** З огляду на забезпечення компактності та надійності систем пасивного відводу тепла представляє інтерес розробка системи відводу теплоти на базі двофазних термосифонів. Принцип їх роботи забезпечує ефективну теплопередачу за рахунок значної теплоти пароутворення водного теплоносія і високих коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні та конденсації [1]. Аналіз особливостей теплових процесів і можливостей традиційних способів теплопередачі, тепловідведення і теплового захисту в енергетичних технологіях показує доцільність створення і впровадження в енергетичній галузі систем теплопередачі на основі пристроїв випаровувально-конденсаційного типу (ВКТ), або інакше – випаровувально-конденсаційних систем (ВКС). В цих системах передача тепла здійснюється за рахунок тепла фазового перетворення двофазного проміжного теплоносія, невелика кількість якого циркулює по замкнутому випаровувально-конденсаційному контуру. Такі системи можуть бути конструктивно оформлені в вигляді окремих або згрупованих в пакет автономних герметичних теплопередавальних пристроїв, які працюють за принципом замкнутого випаровувально-конденсаційного циклу і називаються двофазними термосифонами (ДТС) при здійсненні гравітаційної течії рідкого теплоносія.

Встановлення таких двофазних термосифонів дозволить утримувати температурний режим в контейнерах при аварійних ситуаціях.

**Висновки.** Підсумовуючи, двофазні термосифони допоможуть запровадити модифікації для існуючих та майбутніх контейнерів сховища ядерного палива сухого типу.

Дана модифікація є доцільною для збільшення габаритів контейнеру відповідно для більшої кількості касет в контейнерів та для забезпечення термічної стійкості при аварійних ситуаціях.

**Перелік посилань:**

1. Kravets V.Yu. Heat transfer processes in miniature evaporation-condensation cooling systems. – Kyiv: Interservice, 2023. – 204 p.

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Годунок Б.В.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Коньшин В.І.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=G8kKS2MAAAAJ&hl>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## СТРАТЕГІЯ ЗМЕНШЕННЯ РАДІАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА КОРПУС РЕАКТОРА ТА ВНУТРІШНЬОКОРПУСНІ ПРИСТРОЇ ВВЕР-1000

**Постановка проблеми та її актуальність.** Основна проблема полягає в тому, що довготривала експлуатація енергоблоків атомних електричних станцій (АЕС) призводить до зміни фізичних та хімічних властивостей матеріалів, з яких вони зроблені. Це має кілька критичних наслідків:

- під впливом нейтронного випромінювання, сталь корпусу реактора (КР) та внутрішньокорпусних пристроїв (ВКП) стає більш крихкою, так званий процес радіаційного окрихчування (старіння);
- збільшення розмірів і зміна форми металу внаслідок утворення в його структурі пор і скупчень міжвузлових атомів, які виникають і ростуть під впливом високих доз нейтронного опромінення, відбувається процес радіаційного розпухання.

Отже ці явища створюють низку серйозних проблем, які впливають на безпеку та надійність АЕС, а також набувають ключового значення для обґрунтування потрібного рівня безпеки експлуатації енергоблоку у надпроектний період. Тому завдання точного оцінювання флюенсу нейтронів та реалізації технічних заходів зі зниження радіаційного навантаження на корпус реактора є надзвичайно актуальним в рамках експлуатації АЕС України.

**Формулювання мети.** Проаналізувати поточний рівень флюенсу нейтронів на стінку реактора четвертого енергоблоку Рівненської АЕС ВВЕР-1000 та розробити стратегії зменшення радіаційного навантаження на КР та ВКП даного енергоблоку.

**Основна частина.** Безпечна експлуатація реакторної установки залежить від багатьох чинників і визначається надійністю фізичних бар'єрів, що утримують продукти ядерних реакцій від поширення в навколишнє середовище. Одним із найважливіших бар'єрів безпеки в реакторній установці (РУ) ВВЕР є корпус реактора (Рис. 1).

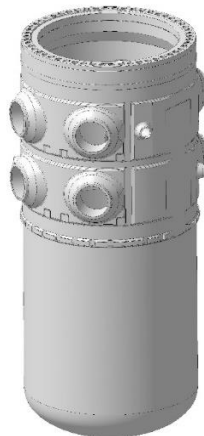


Рисунок 1 – Загальний вид корпусу реактора

Основною вимогою до КР є збереження цілісності під час нормальної експлуатації, під час порушення нормальної експлуатації та під час аварійних ситуацій упродовж усього терміну експлуатації.

Корпус реактора та внутрішньокорпусні пристрої під час експлуатації одночасно піддаються як впливу радіаційного опромінення, так і змінам температури. Зміни температури КР і ВКП пов'язані із підвищенням або зниженням потужності реактора. У результаті, змінюються вихідні властивості матеріалів, що в підсумку знижує опір матеріалів до одного з небезпечних видів руйнування - крихкого руйнування [1]. В свою чергу, ресурс енергоблока практично повністю визначається ресурсом корпусу реактора, який піддається сильному радіаційному опроміненню і, як наслідок цього, - окрихченню [2].

За несприятливих умов зміни температури і тиску теплоносія в перехідних і аварійних режимах може статися крихке руйнування КР. Крихке руйнування є найбільш небезпечним видом руйнування, оскільки воно відбувається миттєво без помітної контрольованої зміни розвитку деформацій і може призвести до повного руйнування корпусу. Тому дані про розвиток процесу радіаційного крихкого руйнування металу КР є важливими з точки зору безпечної експлуатації АЕС.

У світовій практиці прийнято такий підхід, за якого у випадку значного флюенсу нейтронів на стінку реактора застосовуються відповідні захисні заходи. На енергоблоках АЕС України як превентивний захід щодо мінімізації деградації металу КР за результатами його радіаційного окрихчення застосовуються паливні завантаження зі зниженим витоком нейтронів (застосовується для всіх енергоблоків), а також захисні касети-екрани (застосовується для енергоблоку № 1 Рівненської АЕС) [3].

Впровадження паливних завантажень, які забезпечують мінімальний витік нейтронів з активної зони, є одним з ключових заходів для зменшення радіаційного впливу на корпус реактора. Це досягається за рахунок розміщення вигорілого палива на периферії активної зони і свіжого палива в її центральній частині.

Паливні цикли зі зниженим витоком нейтронів дозволяють зменшити щільність потоку швидких нейтронів на внутрішній поверхні корпусу реактора, що сприяє збільшенню терміну служби реактора і зниженню вартості електроенергії.

**Висновки.** Підсумовуючи, аналіз поточного стану умов опромінення КР та ВКП РУ ВВЕР та розробка стратегій зі зменшення радіаційного навантаження є важливою частиною роботи з продовження терміну служби енергоблоку у надпроектний період.

Для зменшення радіаційного навантаження на КР наразі застосовуються такі методи як:

- використання захисних касет-екранів;
- застосування паливних завантажень зі зниженим витоком нейтронів (або ж різні варіанти компоновки активної зони).

Водночас, беручи до уваги плани експлуатуючої організації України щодо продовження терміну експлуатації існуючих енергоблоків АЕС і низьку ймовірність пуску, найближчим часом, нових, а також враховуючи поточні темпи накопичення радіаційного навантаження, поглиблене вивчення цієї проблеми та розробка нових методів та стратегій зі зменшення радіаційного навантаження на КР та ВКП ВВЕР є першочерговим завданням для забезпечення безпечної експлуатації АЕС.

#### **Перелік посилань:**

1. Yanovskiy, S., Ieremenko, M. і Ovdiienko, Y. 2011. Розробка підходів до аналізу чутливості моделі розрахунку флюенсу нейтронів на корпус реактора ВВЕР-1000 на базі комплексу кодів DOORS. Ядерна та радіаційна безпека. 3(51) (Вер 2011), 38-43.

2. Abdullaiev, A., Soldatov, S., Hann, V., & Chernitskiy, S. (2018). Розрахунок флюенса нейтронів і тепловиділення в конструкційних елементах реактора ВВЕР-1000 методом Монте-Карло. Ядерна та радіаційна безпека, (1(77)), 11-17.

3. Національний план дій з управління старінням (Україна). 25 верес. 2019 р.  
Державна інспекція ядерного регулювання

України. URL: <https://snriu.gov.ua/storage/app/uploads/public/5ed/0e1/54a/5ed0e154af30c027707902.pdf> (дата звернення: 28.02.2024).

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Гольонко О.В.

<sup>1</sup> Проф., д.т.н. Кравець В.Ю.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=18nJrv0AAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ЯДЕРНИМИ РЕАКТОРАМИ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Штучний інтелект (ШІ) стає все більш важливим інструментом у різних галузях технологій, включаючи ядерну енергетику. Управління ядерними реакторами є складним завданням, яке вимагає високої точності та швидкості в реагуванні на зміни у реакціях. Традиційні методи управління можуть мати обмеження у швидкості адаптації до непередбачуваних ситуацій. Використання штучного інтелекту для управління ядерними реакторами може вирішити ці обмеження та покращити ефективність та безпеку реакторів. ШІ може допомогти аналізувати величезні обсяги даних, прогнозувати реакції та реагувати на зміни у реакторах швидше, ніж це може зробити людина. При цьому важливо враховувати ризики та виклики, пов'язані з використанням ШІ в ядерних установках, такі як безпека, надійність та етика [1,2].

**Формулювання мети.** Мета дослідження полягає у визначенні потенціалу використання ШІ в системах управління ядерними реакторами, аналіз можливостей покращення безпеки та ефективності експлуатації атомних електростанцій.

**Основна частина.** Системи управління ядерними реакторами традиційно розраховані на забезпечення безпеки, надійності та ефективності експлуатації атомних електростанцій. Вони включають в себе широкий спектр технологій: від ручного контролю операторами до автоматизованих систем, які використовують передові алгоритми для моніторингу та управління роботою реактора. Ці системи здатні виявляти аномалії, реагувати на критичні ситуації та виконувати процедури аварійної зупинки реактора.

Однак, незважаючи на високий рівень розвитку, існуючі системи управління не є бездоганними і мають ряд обмежень та проблем:

- Залежність від людського фактора: Навіть у високоавтоматизованих системах необхідне рішення оператора в критичних ситуаціях, що може призводити до помилок через людський фактор.

- Реагування на непередбачені ситуації: Традиційні системи управління в основному розраховані на відомі сценарії та можуть не ефективно справлятися з рідкісними або непередбачуваними подіями.

- Обмеження в діагностиці та прогнозуванні: Існуючі системи можуть виявити несправності лише після того, як вони вже виникли, і часто не здатні прогнозувати потенційні несправності перед їхнім виникненням.

- Адаптивність та гнучкість: Стандартні системи мають обмежену здатність адаптуватися до змін у робочому середовищі або у вимогах до експлуатації реактора без втручання фахівців.

- Інтеграція даних: Ефективне управління реактором вимагає інтеграції величезного обсягу даних з різних джерел, що може бути складно забезпечити в умовах застарілих ІТ-систем.

Застосування технологій штучного інтелекту у ядерній енергетиці має потенціал радикально трансформувати підходи до управління безпекою, ефективністю та надійністю ядерних реакторів. ШІ може забезпечити важливі переваги в таких ключових аспектах:

- Аналіз даних

- Прогнозування аварійних ситуацій



- Автоматизація процесів управління

Технології машинного та поглибленого навчання дозволяють обробляти та аналізувати величезні обсяги даних, що генеруються в ядерних реакторах [1]. Це включає дані з датчиків, систем моніторингу та інших джерел. Алгоритми ШІ можуть ідентифікувати закономірності, які можуть бути непомітними для людського ока, та виявляти сигнали про можливі несправності або зміни у роботі реактора. Алгоритми можуть бути використані для прогнозування потенційних аварійних ситуацій, навіть перед тим, як вони стануть очевидними. Це дозволяє оперативно реагувати на попереджувальні сигнали, мінімізуючи ризик виникнення інцидентів та забезпечуючи вищий рівень безпеки. ШІ може автоматизувати багато процесів управління ядерними реакторами, від рутинних операцій до складних рішень в екстрених ситуаціях. Нейронні мережі та алгоритми глибокого навчання можуть бути навчені керувати реактором, оптимізувати його роботу та автоматично впроваджувати заходи безпеки за необхідності.

ШІ може обробляти та аналізувати дані в реальному часі, забезпечуючи операторам та інженерам докладну інформацію для прийняття обґрунтованих рішень. Здатність прогнозувати майбутні несправності та знос обладнання дозволяє планувати обслуговування до виникнення критичних проблем, знижуючи час простою. ШІ може швидко адаптуватися до змін умов експлуатації, оптимізуючи роботу реактора під різні режими роботи. Автоматизація процесів управління знижує ризик помилок, пов'язаних з людським фактором.

Інтеграція штучного інтелекту у системи управління ядерними реакторами відкриває нові можливості для підвищення безпеки, ефективності та автоматизації. Однак, цей процес супроводжується низкою викликів та обмежень, які потрібно враховувати для успішної інтеграції.

Для ефективної роботи алгоритмів ШІ необхідні високоякісні та точні дані. В контексті ядерних реакторів це означає потребу в точних вимірах з датчиків, надійному зборі та обробці даних. Якщо вхідні дані є неточними або неповними, це може призвести до некоректних висновків і рішень з боку систем ШІ, що може мати серйозні наслідки для безпеки реактора.

Інтеграція ШІ вимагає великої кількості даних для навчання та функціонування. Зберігання та обробка цих даних ставлять під загрозу конфіденційність і безпеку інформації, особливо в умовах зростаючих кіберзагроз. Забезпечення цілісності та захисту критичної інфраструктури вимагає передових методів кібербезпеки.

Успішна інтеграція ШІ також залежить від ефективної взаємодії між системами ШІ та операторами ядерних реакторів. Оператори повинні мати змогу легко інтерпретувати рекомендації ШІ, а також втручатися у рішення, прийняті алгоритмами. Це вимагає розробки інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів і забезпечення навчання персоналу для роботи з новими системами.

Більшість ядерних реакторів працюють на системах управління, розроблених декілька десятиліть тому. Інтеграція сучасних технологій ШІ в ці системи може виявитися складною задачею через архітектурні та технічні обмеження. Вирішення цього виклику може вимагати значних модифікацій існуючої інфраструктури або розробки адаптивних рішень.

Впровадження ШІ також ставить перед управлінням завдання підготовки персоналу для ефективної роботи з новими технологіями. Це означає потребу в організації додаткових тренінгів і курсів для розуміння принципів роботи ШІ та методів взаємодії з ним.

**Висновки.** Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) в системи управління ядерними реакторами відкриває перед ядерною енергетикою нові перспективи, які можуть радикально покращити безпеку, ефективність та надійність роботи атомних станцій. Розвиток та впровадження технологій машинного навчання, глибокого навчання та нейронних мереж дозволяють оптимізувати процеси моніторингу, аналізу даних, прогнозування потенційних аварійних ситуацій та автоматизувати прийняття рішень в

критичних умовах.

Однак, попри значні потенційні переваги, процес інтеграції ШІ супроводжується рядом викликів та обмежень. Вимоги до точності та якості даних, забезпечення безпеки інформації, ефективна взаємодія між ШІ та операторами, адаптація до існуючих систем управління та потреба у навчанні та розвитку навичок персоналу вимагають комплексного підходу та значних зусиль з боку організацій та розробників.

Реалізація потенціалу ШІ у ядерній енергетиці вимагає не лише технічних інновацій, але й глибокого розуміння специфіки роботи ядерних реакторів, розробки відповідних нормативних рамок, забезпечення високого рівня безпеки та ефективного діалогу між усіма зацікавленими сторонами.

Успішне впровадження ШІ у ядерній енергетиці відкриє нові можливості для забезпечення сталого розвитку атомної енергії, зробить атомні станції більш адаптивними до змінних умов експлуатації, підвищить рівень їхньої безпеки та зменшить ризики для довкілля та суспільства.

Таким чином, інтеграція ШІ в ядерній енергетиці є не лише технологічним викликом, але й важливим кроком на шляху до створення майбутнього, де ядерна енергія відіграватиме ключову роль у забезпеченні потреб людства в енергії при одночасному мінімізуванні впливу на довкілля.

**Перелік посилань:**

1. Kim, J., Lee, S., & Seong, P. H. (2023). Autonomous Nuclear Power Plants with Artificial Intelligence. Springer Nature Switzerland AG. ISSN 2195-1292. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-22386-0>
2. International Atomic Energy Agency, 2022. | Artificial intelligence for accelerating nuclear applications, science and technology, ISBN 978-92-0-131422-2 | Includes bibliographical references.

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Гупало М.Б.

<sup>1</sup> Проф., д.т.н. Кравець В.Ю.

<https://scholar.google.com/citations?user=l8nJrv0AAAAJ&hl>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ЗАСТОСУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕРМОСИФОНІВ ДЛЯ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

**Постановка проблеми та її актуальність.** До складу системи охолодження відпрацьованого ядерного палива на АЕС з реактором типу ВВЕР-1000 входять наступні складові:

- насоси розхолодження БВ TG11÷13D01;
- теплообмінники розхолодження БВ TG11÷13W01;
- відсіки зберігання відпрацьованого палива TG21B01÷03;
- перевантажувальний колодязь TG21B04;
- шахта ревізії ВКП TG21B05;
- шахта ревізії БЗТ TG21B06;
- трубопроводи;
- арматура;
- КВПтаА.

Дана система охолодження функціонує на усіх діючих блоках з ВВЕР-1000 в Україні. Система розхолодження басейнів витримки (БВ), згідно з класифікацією НП.306.2.141-2008, є системою нормальної експлуатації, важливою для безпеки, яку важливо покращувати [1]. Підвищення рівня безпеки – це фундаментальна складова будь-якої АЕС, активна розробка та впровадження нових технологій можуть поліпшити експлуатацію та підвищити рівень безпеки. Покращити систему охолодження відпрацьованого ядерного палива на сьогоднішній день важливо для впровадження останнього на нових блоках, які в скорішому майбутньому почнуть будувати на території України.

**Формулювання мети.** Розробка та оптимізація термосифонної системи (допоміжна система) для ефективного охолодження відпрацьованого ядерного палива у ВВЕР-1000 під час нормальної експлуатації та її порушеннях. Це передбачає аналіз поточних технологій, їх вдосконалення та адаптацію до специфіки відпрацьованого палива. Дана робота має на меті визначити найбільш ефективні методи використання термосифонів, їх інтеграцію у сучасні системи охолодження та оцінку їхньої роботи в реальних умовах.

**Основна частина.** Принципову схему системи зображено на рисунку 1. Басейн витримки відпрацьованого палива поділений на три відсіки TG21B01÷03 – це зменшує вірогідність відмови БВ одночасно для усіх ТВЗ і дозволяє здійснювати роботи з обстеження чи ремонту окремих відсіків без шкоди для інших. Кожен з відсіків має свій автономний канал охолодження, який складається з насоса TG11(12,13)D01, теплообмінника TG11(12,13)W01, трубопроводів зв'язку і арматури. Відведення залишкових виділень тепла від ТВЗ БВ здійснюється шляхом забору верхнього шару нагрітої у відповідному відсіку води, її охолодження в теплообміннику TG11(12,13)W01 технічною водою групи «А» з наступним поверненням до нижньої частини відсіку БВ працюючим насосом TG11(12,13)D01. Таким чином, вода в каналах циркулює замкненим колом. Температура води у відсіках БВ підтримується в межах 30÷40 °С регулюванням витрати технічної води групи «А» на відповідний теплообмінник розхолодження БВ.

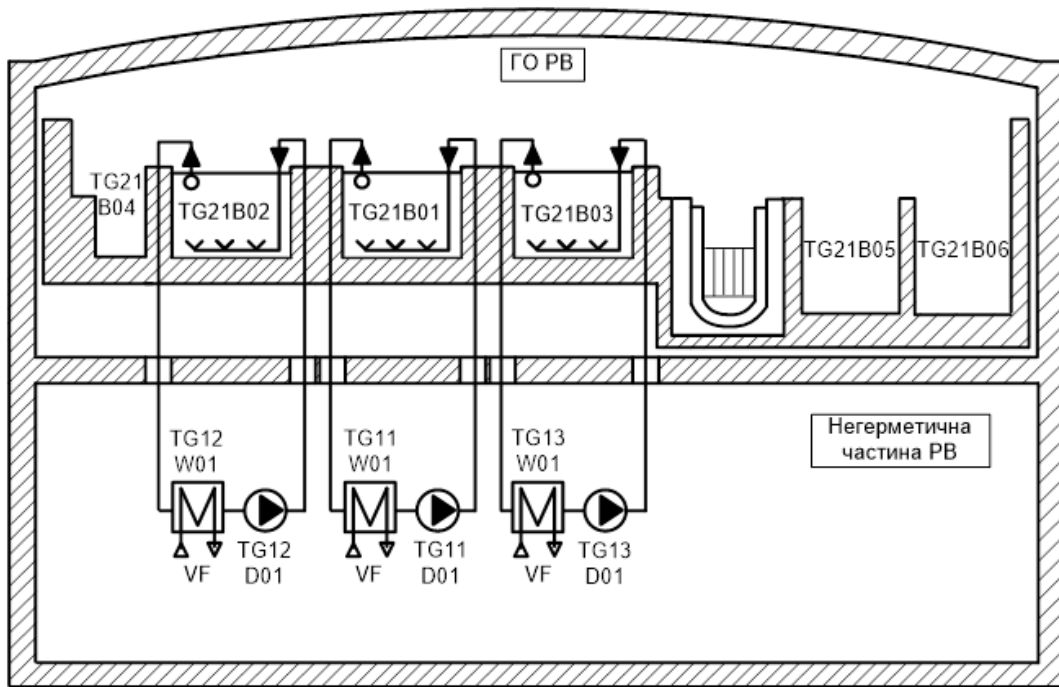


Рисунок 1 – Принципова схема системи розхолодження БВ

Щоб зменшити залежність охолодження відсіків БВ від працездатності конкретного каналу системи, між цими каналами передбачено трубопроводи зв'язку із запірною арматурою, що сполучають всмоктувальні й напірні трубопроводи насосів TG11÷13D01.

Біологічний захист персоналу від випромінювань елементів, що знаходяться в БВ, шахтах ревізії БЗТ, ВКП, реактора, забезпечується створенням над ними захисного шару води. Рівень води в БВ під час зберігання відпрацьованих ТВЗ має бути не нижчий за 803 см. Крім того, під час знаходження відпрацьованих ТВЗ у БВ мають виконуватись наступні вимоги:

- підкритичність не повинна бути нижчою за 0,05 за усіх можливих аварійних ситуацій;
- має бути виключена можливість потрапляння сторонніх предметів у ТВЗ;
- тепловідведення від відпрацьованих ТВЗ має виключати можливість їхнього перегрівання;
- має бути забезпечено захист персоналу від радіоактивності (газової, аерозольної, гама-випромінювання);
- періодично має здійснюватись очищення води БВ;
- має бути виключена можливість випадкового зниження рівня в БВ;
- має бути виключена можливість потрапляння до БВ неборованої води й води з концентрацією борної кислоти нижче за 16 г/дм<sup>3</sup>.

В аварійних ситуаціях, коли неможливо забезпечити відведення тепла від відсіків БВ штатними лініями TG11÷13 з локалізуючою арматурою, передбачено аварійне охолодження палива БВ шляхом подавання спринклерними насосами води з ГА-201 окремими лініями без локалізувальної арматури витратою близько 40 м<sup>3</sup>/год.

У випадку проектного знеструмлення енергоблоку насоси TG11÷13D01 отримують живлення від ДГ відповідного каналу СБ. За умови тривалого (до 72 годин) повного знеструмлення енергоблоку й втрати тепловідведення до кінцевого поглинача, з метою підживлення й охолодження БВ, передбачено подавання до нього за допомоги МНУ БВ води з баків ТВ10B01,02, ТВ30B01,02, ТQ10÷30B01 (ГА-201), 0ТМ50B01÷04, ТХ10÷30B01, ТВ40B01,02, водоприймального ковша БНС-2,3 в лінії аварійного підживлення БВ від спринклерної системи. Є також можливість використати для підживлення БВ напірні

трубопроводи насосів 0ТМ50D01,02,03, куди МНУ БВ може подати воду з баків 0ТМ50В01÷04 [2,3].

**Вдосконалення системи охолодження.** Термосифонна система охолодження розрахована на роботу при нормальній експлуатації та при її порушенні. Комбінована система термосифонів та вище згаданої діючої системи охолодження БВ дозволить розвантажити та поділити відведення теплоти між системами. Це дозволить зменшити витрату на теплообмінний апарат та легше коригувати температуру в БВ.

При ситуаціях, які унеможливають відведення тепла від БВ через несправність насосів, знеструмлені чи інших порушеннях нормальної експлуатації, усе тепло з БВ відводитиме термосифонна система охолодження. Система не потребує електропостачання, що у свою чергу дозволяє постійно охолоджувати БВ. Проєкт передбачає відведення тепла в атмосферу, провівши термосифонну систему за межі ГО.

**Висновки.** Безпека на АЕС – фундаментальна складова. Підвищення рівня безпеки змушує впроваджувати нові системи та технології. Покращення безпеки в свою чергу може покращити експлуатацію та режимність роботи. В даній доповіді було розглянуто систему охолодження відпрацьованого ядерного палива на АЕС з реактором типу ВВЕР-1000, покращення системи охолодження за рахунок впровадження допоміжної термосифонної системи для підвищення безпеки при порушеннях нормальної експлуатації та при нормальних режимах роботи основної системи охолодження.

**Перелік посилань:**

1. Загальні положення безпеки атомних станцій. НП 306.2.141-2008.
2. Інструкція з експлуатації. Система охолодження басейна витримки. Система нормальної експлуатації, важлива для безпеки. Блок №3. 121-3-09-Е-РЦ-2.
3. Інструкція з експлуатації. Система розхолодження басейну витримки. Система нормальної експлуатації, важлива для безпеки. Блок №4. 121-4-09-Е-РЦ-2.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ІНЦИДЕНТ НА АЕС ПАКШ В 2003 РОЦІ

**Постановка проблеми та її актуальність.** АЕС Пакш – єдина атомна електростанція, що експлуатується в Угорщині [1]. В експлуатації знаходяться, такі ж реактори як і на першому та другому енергоблоках РАЕС, з єдиною відмінністю в тому, що в процесі модернізації та модифікації потужність цих блоків була збільшена до 500 МВт [2]. Відповідно до національних нормативних вимог та стандартів МАГАТЕ, безпека АЕС забезпечується за рахунок послідовної реалізації стратегії глибокоешелонованого захисту і має забезпечити виконання функцій системою послідовних фізичних бар'єрів. Отже, будь-які події, що відбуваються з порушенням цілісності фізичних бар'єрів вимагають ретельного аналізу. Подію, що відбулася на АЕС Пакш варто розглянути, щоб зрозуміти технології, що застосовувалися для процесу промивки, які помилки були допущені в конструкції, і що зрештою призвело до втрати 30 паливних касет.

**Формулювання мети.** Проаналізувати наслідки та причини виникнення інциденту для недопущення подібних помилок в майбутньому та для покращення відповідних технологій поводження з ядерним паливом.

**Основна частина.** Однією з передумов інциденту були пошкоджені, під час ремонту парогенераторів, оксидні шари на трубах. Внаслідок цього магнетити, що утворилися, почали осідати на паливних касетах. Через це зменшилася швидкість потоку теплоносія через активну зону, погіршилася теплопровідність оболонки тепловиділяючих елементів (ТВЕЛ), збільшилась температура на виході з касет та знизилась потужність реактора. Для очищення пошкоджених касет на базі контейнера для зберігання палива ТК-6, компанією Siemens було розроблено контейнер для очистки 7 касет, проте від нього відмовилися, через повільність процесу. Був укладений договір з французькою компанією Framatome про створення баку для очистки відразу 30 касет.

Очистка палива відбувалася в двох режимах: В та С. Режим В - охолодження палива водою з колодязя №1 занурювальним насосом (20 т/год), режим С - очищення палива системою АМДА, потужність насосу 250 т/год. Режим В використовувався для перевантаження касет, режим С був основний для очистки (Рис.1).

Слід визначити недоліки конструкції, що призвели до інциденту:

- за такої будови трубопроводів неможлива природна циркуляція, так як хід охолоджуючого середовища дуже складний;
- кришка, одягалася на дві напрямні внаслідок чого існувала імовірність її перекосу під дією тиску;
- бак мав лише одну направляючу плиту, внаслідок чого при встановленні касети та невлучанні в гніздо знизу баку виникали протічки;
- низька кількість вимірювальної техніки в баку не давала точної інформації про те, що відбувалося всередині очисного агрегату;
- також не було враховано отвори, які були передбачені конструкцією паливних касет, внаслідок цього виникали байпасні протічки.

Події відбувалися за такою хронологією. 15 березня 2003 року пристрій був встановлений. Спочатку було очищено паливо, що відстояло певний час в басейні витримки. Далі на ППР був зупинений другий енергоблок, відповідно залишкове тепловиділення касет, що були вийняті з активної зони, було суттєво більше ніж в тих, що

відстояли в басейні, проте їх відразу помістили в бак. Перші три партії палива були очищені вдало. Після завершення очистки четвертої партії палива установка AMDA була переведена в режим експлуатації В.

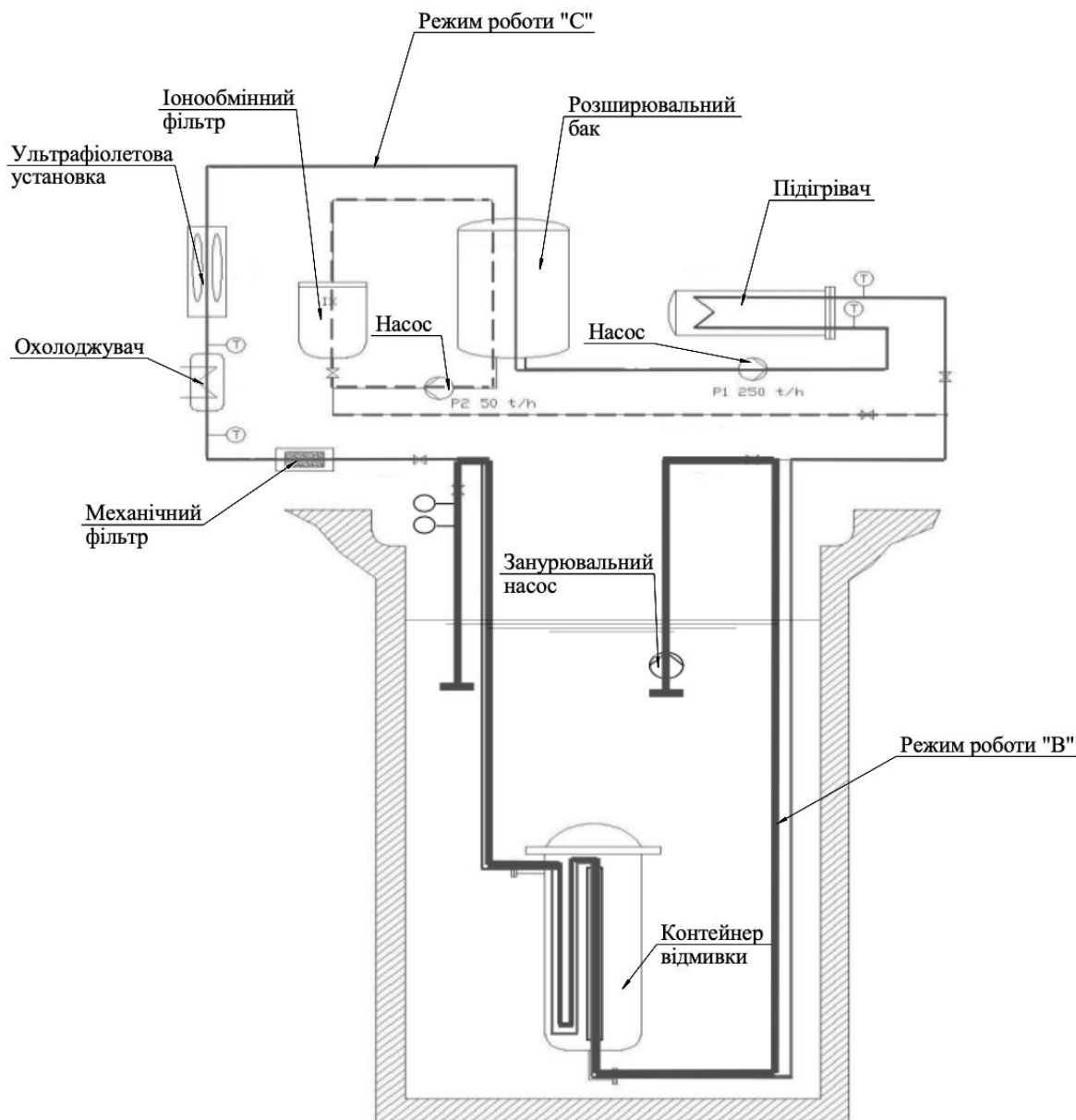


Рисунок 1 – Функціональна схема системи

Через ППР перевантажувальна машина була зайнята і зняти кришку не було змоги. Низька витрата в режимі В сприяла утворенню значного байпасного потоку через отвори, внаслідок чого вода почала кипіти. Персонал про це не знав. Це виявили лише тоді коли почав спрацьовувати аварійний клапан і було зафіксовано забруднення в центральному залі. Далі персонал евакуювали та почалося провітрювання за допомогою систем вентиляції. За підрахунками добовий (10 квітня) викид інертних газів на вентиляційній трубі склав 12,4 ТБк.

Вже 11 квітня о 00:30 був поінформований Регулюючий орган з атомної енергетики Угорщини (НАЕА). Передбачалося, що погіршення радіаційної обстановки було викликане нещільністю ТВЕЛів. Була проведена нарада, на якій прийняли рішення зняти кришку контейнера та видалити дефектну збірку. О 04:20 кришку спробували підняти, проте безуспішно так як один з підйомних тросів пошкодився - кришка перекосилася.

За шкалою INES цій події спочатку був наданий статус інциденту, проте коли все ж зняли кришку виявили серйозні пошкодження паливних касет. Зрештою, події було надано третій рівень небезпеки, а саме серйозний інцидент.

Статус аварії не був наданий, так як не були перевищені межі викидів на вентиляційній трубі. Варто також зазначити, що при піднятті кришки, на 9 найближчих підстанціях, що знаходяться біля АЕС було проведено заміри активності і максимальне значення сягнуло 100 нЗв/год, що засвідчувало, що норму перевищено не було. Після того як все було врегульовано на майданчик приїхали експерти МАГАТЕ і провели свої дослідження, що стосувалися інциденту і зробили такі висновки:

- межі річної норми професійного опромінення, що визначені базовими стандартами МАГАТЕ перевищені не були;

- межі річної дози для населення згідно базових стандартів МАГАТЕ перевищені не були [3].

Таким чином за результатами інциденту було пошкоджено 30 паливних касет.

**Можливі шляхи вирішення проблеми.** Перш за все, слід визначити необхідність перегляду підходів до обґрунтування безпеки в частині забезпечення тепломеханічної надійності паливних касет, які були переміщені з активної зони, зокрема в частині розрахунку залишкового енерговиділення. Необхідно також виконати переоцінку роботи системи пасивного тепловідведення, для забезпечення ефективного охолодження в умовах роботи насоса малої потужності. Змінити геометрію та розміщення труб ходу теплоносія, для реалізації природної циркуляції.

**Висновки.** Підсумовуючи, серед всіх помилок, що були допущені при проектуванні можна виділити наступні:

- відсутність можливості природної циркуляції;
- не прийняття до уваги отворів в чохлі паливної касети;
- була передбачена лише одна трубна дошка;
- мала кількість вимірювальної техніки в контейнері.

Окрім недоліків в проектуванні, виявлені певні прогалини у організаційно-технічних заходах реалізації промивки. Так, наприклад, всі роботи, що стосувалися очистки палива були передані працівникам Framatome, які не розумілися на специфіці палива ВВЕР. Відповідно до цього рекомендується переглянути як відповідну експлуатаційну документацію, так і підходи до розробки програми проведення ядерно-небезпечних робіт.

**Перелік посилань:**

1. АЕС Пакш [Електронний ресурс] // Вікіпедія. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/АЕС\\_Пакш](https://uk.wikipedia.org/wiki/АЕС_Пакш) (дата звернення: 25.04.2023)

2. International Atomic Energy Agency, 2018. | Series: Proceedings series (International Atomic Energy Agency), Topical issues in nuclear installation safety, ISSN 0074–1884 | Includes bibliographical references. [p. 251]

3. IAEA Agrees to Undertake Independent Review of April 10, 2003, Paks, Hungary, NPP Incident | IAEA. International Atomic Energy Agency | Atoms for Peace and Development. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-agrees-undertake-independent-review-april-10-2003-paks-hungary-npp-incident>(date of access: 25.02.2024).



<sup>1</sup> Аспірант 1 курсу Колодій Н.О.

<sup>1</sup> Проф., к.т.н. Воропаєв Г.О.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ В УМОВАХ НАДЗВУКОВИХ ТЕЧІЙ

Інтенсифікація конвективного теплообміну у надзвукових умовах відкриває безліч перспектив для розвитку нових підходів до технологій, що є критичними для сучасного технічного прогресу. Подальші дослідження в цій області матимуть важливе значення для створення інноваційних систем та технологій, які базуються на вдосконаленні теплообміну в умовах надзвука.

Конвективний теплообмін у надзвукових умовах відіграє ключову роль у великій кількості технологічних процесів. Надзвукові течії, що виникають у деяких умовах, мають складну структуру та потребують глибокого розуміння в контексті їх впливу на теплообмін. Ці дослідження стають актуальними у контексті сучасних вимог до підвищення ефективності систем енергозабезпечення та інших технологічних процесів.

Надзвукові течії газу в обмежених об'ємах продовжують інтенсивно досліджувати для вирішення ряду важливих практичних проблем в різних галузях енергетичній промисловості, авіа-, машино-, ракетобудуванні, оскільки термодинамічні властивості надзвукових течій газу визначають домінуючі характеристики високонапірних компресорів, системах охолодження, високошвидкісних літальних апаратів, реактивних двигунів. Так, шляхом успішного застосування різних термодинамічних властивості надзвукових течій вирішено багато важливих практичних задач: термодинамічний ефект суттєвого падіння температури надзвукового струменя застосовується в системах динамічного охолодження [1-4].

Добре відомою технологією отримання охолодженого газового потоку є генерація надзвукової течії при розширенні газу через сопло Лавалю. Проте, такий підхід має ряд недоліків, пов'язаних в першу чергу з його низькою енергоефективністю, а також із проблемою утилізації отриманого холодного потоку, оскільки надзвуковий струмінь досить швидко відновлює вниз за потоком вихідні термодинамічні властивості та приймає температуру гальмування при взаємодії з будь-якими перешкодами. Для підвищення ККД таких технологій та ефективної утилізації холоду надзвукового струменя необхідно використовувати ежекторні системи, які реалізують теплообмін між активним і пасивним потоками газу та дозволяють суттєво збільшити масову витрату охолодженого потоку [5].

Вдосконалюється технологія динамічного охолодження, яка реалізується шляхом генерації інтенсивного вихрового руху газу у так званих вихрових трубках Ранка-Хілша [6]. Механізм утилізації холоду у вихровій трубці реалізується шляхом розділення генерованого вихрового потоку на охолоджений осьовий і гарячий периферійний потоки під дією відцентрових сил і процесів теплообміну між вихровими потоками. Основна проблема вихрових трубок полягає у значних гідравлічних втратах при проходженні активного газу через тангенціальний вхід і спіралеподібний тракт або систему косих дискретних сопел для реалізації закрутки первинного потоку, що значно знижує загальну енергоефективність системи. Для підвищення ККД системи використовують різноманітні геометричні модифікації вихрових трубок та додаткові газодинамічні ефекти, зокрема, конусне звуження трубки по типу сопла Лавалю для інтенсифікації закрутки потоку, ефекти ежекції для залучення приєднаних мас газу та ін. [7,8].

Справжній прогрес у сфері конвективного теплообміну в надзвукових умовах

передбачає вивчення складних фізичних явищ. Надзвукові течії мають унікальну структуру, що вимагає вдосконалених методів аналізу та прогнозування їх впливу на процеси теплообміну. Це вирішально важливо для розвитку ефективних систем у сферах, де критичне значення має якість та швидкість процесів.

Методологія досліджень включає комплексний підхід, в якому експериментальна складова передбачає створення модельних умов для надзвукових течій для подальшого аналізу їх впливу на теплообмін. Застосування математичних моделей, що базуються на основах флюїдинамики та теплопередачі, дозволяє вивчити та передбачити різноманітні аспекти цих процесів з високою точністю.

**Перелік посилань:**

1. Chen J., Li Y., Chen W., Luo X., Chen Y., Yang Z., Eames I.W. Investigation of the ejector nozzle in refrigeration system // *Energy*, 2018, V. 157, P. 571–587.
2. Besagni G., Mereu R., Inzoli F. Ejector refrigeration: a comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, V. 53, P. 373–407.
3. Liu F., Groll E.A., Study of ejector efficiencies in refrigeration cycles // *Applied Thermal Engineering*, 2013, V. 52(2), P. 360–370.
4. Yang X., Long X., Yao X. Numerical investigation on the mixing process in a steam ejector with different nozzle structures // *International Journal of Thermal Sciences*, 2012, V. 56, P. 95–106.
5. Chong D., Hu M., Chen W., Wang J., Liu J., Yan J. Experimental and numerical analysis of supersonic air ejector // *Applied Energy*, 2014, V. 130, P. 679–684.
6. Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. М.: Энергомаш, 2000, 414 с.
7. Вагнер В.В., Курилов В.Е., Новиков М.И. Вихревой эжектор // Патент № 2014124945/02, 19.06.2014.
8. Мияссаров Р.Ф., Ишмурзин А.А., Махмутов Р.А. Метод извлечения этана в смеси с метаном в промышленных условиях путем совмещения трубки Ранка-Хилша и сопла Лавалья // *Разработка и эксплуатация месторождений*. 2017. № 5, с. 44–47.

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Корнілов О.М.

<sup>1</sup> Ст.викл., к.т.н. Сахно О.В.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ПРОБЛЕМАТИКА МОДЕЛЮВАННЯ ПАСИВНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИХ КОДІВ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Малі модульні реактори (ММР), які застосовують пасивні стратегії зменшення впливу на навколишнє середовище, на сьогодні є найбільш перспективною технологією для розгортання ядерної енергетики в найближчому майбутньому. Наразі розробка таких проектів знаходиться на етапі експлуатування тестових та експериментальних установок, а також ліцензування і будування прототипів окремих проектів [1]. Загалом, вони характеризуються деякими спільними рисами з існуючими реакторами, а також іншими особливостями, характерними для їхніх конструкцій. Тому, незважаючи на те, що для великомасштабних реакторів були проведені численні дослідження з валідації теплогідравлічних кодів на основі природної циркуляції, необхідні подальші аналізи, щоб охарактеризувати їх можливості на основі наявних експериментальних даних і виявити основні шляхи спотворення результатів розрахункового аналізу.

**Аналіз сучасних досліджень.** Дослідження, що стосуються чисельних оцінок результатів розрахунків тих чи інших моделей і методів їх покращення, в основному, використовують теплогідравлічні коди TRACE, RELAP5 та CATHRAN. Об'єктами досліджень є процеси, що виникають при природній циркуляції в реакторах NuScale, CAREN-25 та тестовій установці OSU-MASLWR – через достатню кількість отриманих експериментальних даних і технічної інформації.

**Основна частина.** У дослідженні [2] було проведено порівняльний аналіз вихідних даних моделювання установки OSU-MASLWR за допомогою коду TRACE та результатів практичного експерименту. В результаті було визначено, що обраний засіб добре передбачає більшість процесів в установці в межах 2500 секунд, після чого оцінка почала відхилятися в бік перебільшення. Водночас було відзначено, що спостерігаються певні проблеми з досягненням стійкого перегрітого стану, наявного в експерименті, що призводило до осциляції параметрів другого контуру. Незважаючи на наявність в кодї розвинених моделей кипіння та конденсації води [3], дослідники штучно регулювали коефіцієнти теплопередачі до поверхонь, не вказавши, нажаль, конкретну величину. Загалом, автори доходять висновку, що результати «показують якісне узгодження основних теплогідравлічних експериментальних параметрів», однак, до певних часових меж.

В висновках роботи фінського дослідника Джона Бертрана, яка фокусується на валідації коду TRACE за допомогою експериментальних даних установки PACTEL, відзначається, що «Просторова та часова збіжність TRACE показала, що запропоновані моделі дають чисельно збіжні розв'язки, і вони є повністю надійними та коректними» [4], але також зазначає, що «при найбільшому максимальному часовому кроці розрахунку (100 мілісекунд) температура суміші на виході з активної зони має іншу поведінку». Як видно з дослідження, завеликий часовий крок спотворює вихідні дані так само, як і замалий, відповідно, існує потреба визначення ідеального діапазону для забезпечення якості результатів. Так само на вихідні дані впливає надмірна або недостатня кількість нодів. Окремо зроблено наголос на необхідності оцінки впливу інших функцій, наприклад, CCFL.

Наявні невизначеності висвітлені також у проведеному МАГАТЕ дослідженні International Collaborative Standard Problem [5], у якому прийняли участь 16 команд

розробників з 6 країн. Воно було спрямоване на пошук сильних та слабких місць кодів-учасників: TRACE, MARS, RELAP5 та CATHRAN. Дослідження проводилося за допомогою валідації створених розробниками моделей на експериментальних даних перехідного процесу у OSU-MASLWR і виявило широкі розбіжності як в отриманих результатах, так і в підходах до моделювання (Рис. 1).

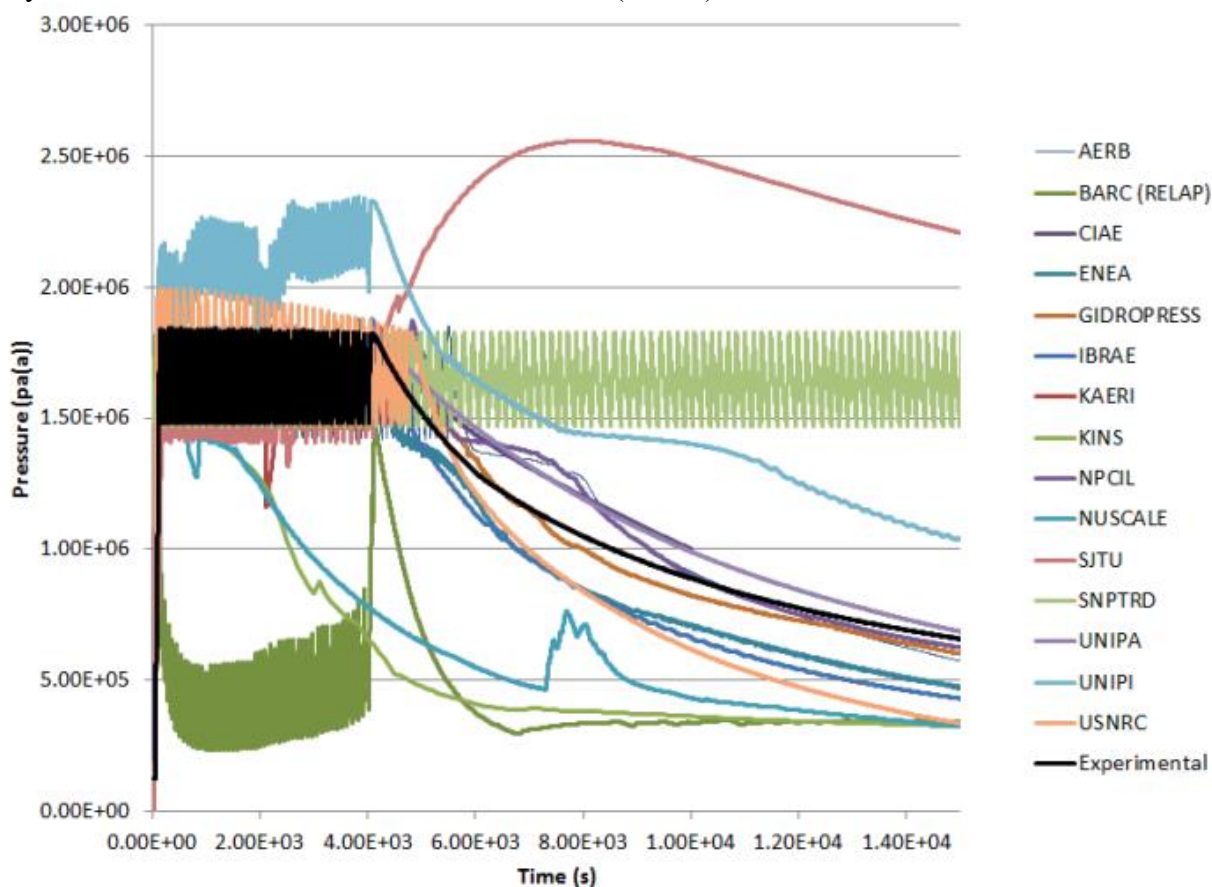


Рисунок 1 – Результати розрахунку тиску у захисній оболонці установки OSU-MASLWR порівняно з експериментальними даними.

Однією з причин розбіжностей зазначається проблема з передбаченням поведінки перегрітого пару і двофазного потоку та в цілому складність процесів, що мають місце біля поверхні змійовиків парогенератора. Для відповідності результатам експерименту, більшість учасників ICSP штучно збільшували тепловіддачу в змійовику на 20-100%. Також вагомий внесок роблять геометричні спрощення (через відсутність у наявних кодах засобу для точного відтворення змійовиків) та неоптимальна сітка розбиття. Останнє має обмежений потенціал покращення через одномірність обраних кодів.

Слід зазначити, що, попри описані недоліки, розроблені за допомогою вищезгаданих кодів моделі демонструють прийнятну кількість помилок при порівнянні з практичними даними [6] та вже використовуються для вирішення задач оцінки [7] точності розрахунків теплогідравлічних кодів. Деякі аспекти, що можуть бути джерелом невизначеностей, наприклад, масштабування [8] або часовий крок [4], є об'єктом досліджень.

**Висновки.** Підсумовуючи, можна виокремити декілька завдань, опрацювання яких під час моделювання процесів природної циркуляції теплогідравлічними кодами повинно бути покращене, а саме: розробка моделі змійовикового парогенератора, в термодинамічному та геометричному сенсі, оптимізація сітки розбиття та часового кроку, вибору оптимальних кореляцій та функцій. Для цього пропонується розроблення загальних рекомендацій і принципів моделювання систем з натуральною циркуляцією теплоносія за допомогою одновимірних теплогідравлічних кодів.

### **Перелік посилань:**

1. Jose Reyes. Natural circulation in water cooled nuclear power plants phenomena, models, and methodology for system reliability assessments. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2005. URL: <https://doi.org/10.2172/836896>.
2. Mascari F., Woods B., Adorni M. Analysis, by TRACE code, of natural circulation phenomena in the MASLWR-OSU-002 test. Nuclear energy for new europe 2008 : матеріали Міжнар. конф., Ljubljana, 8–11 September 2008.
3. TRACE V5.0 THEORY MANUAL. Washington, DC : Division of Risk Assessment and Special Projects Office of Nuclear Regulatory Research U. S. Nuclear Regulatory Commission. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1200/ML120060218.pdf>.
4. Bertran J. TRACE Code Validation for Natural Circulation During Small Break LOCA in EPR-Type Reactor : thesis. 2011. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-42475>.
5. IAEA. Evaluation of Advanced Thermohydraulic System Codes for Design and Safety Analysis of Integral Type Reactors. International Atomic Energy Agency, 2013.
6. Phenomenology involved in self-pressurized, natural circulation, low thermo-dynamic quality, nuclear reactors: The thermal-hydraulics of the CAREM-25 reactor / C. P. Marcel et al. Nuclear Engineering and Design. 2013. Vol. 254. P. 218–227. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.09.005>.
7. Safety analysis of an advanced passively-cooled small modular reactor during station blackout scenarios and normal operation with RELAP5/SCDAP / A. Fakhraei et al. Annals of Nuclear Energy. 2020. Vol. 143. P. 107470. URL: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107470>.
8. Scaling-up assessment of natural circulation phenomena in integral Small Modular Reactor by TRACE code / F. Mascari et al. Nuclear Engineering and Design. 2024. Vol. 420. P. 113018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113018>.

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Круковський Г.П.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Шевель Є.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=zNMzfwAAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## АНАЛІЗ ПОВІТРООБМІНУ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТУ З ОТОЧУЮЧИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Новий Безпечний Конфайнмент (НБК) є захисною спорудою, що включає в себе обладнання для вилучення із зруйнованого 4-го енергоблоку ЧАЕС матеріалів, які містять ядерне паливо, забезпечення безпеки персоналу, населення і оточуючого середовища. Нажаль НБК не є повністю герметичним в місцях ущільнення між західною та східною стінами НБК і поверхнями будівельні конструкцій (рис1), що приводить до неорганізованого і не контрольованого повітрообміну внутрішнього об'єму НБК з оточуючим середовищем.

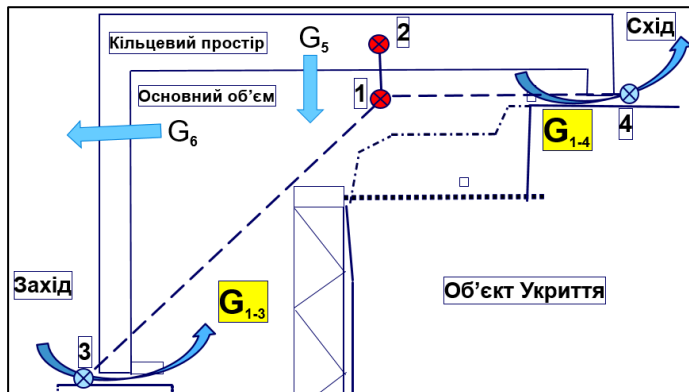


Рисунок 1 – Схема негерметичних місць під західною та східною стінами НБК і поверхнями будівельних конструкцій.

Таким чином наявність неорганізованого і не контрольованого повітрообміну НБК з оточуючим середовищем через негерметичні місця протікань під стінами НБК є проблемою, яка тягне за собою необхідність постійного контролю і моніторингу визначення кількісного витоку витрат повітря з радіоактивним пилом за межі НБК. Для цього розроблена модель гідравлічного стану НБК (Рис.1), в якій площа протічки і витрати  $G_5$  із кільцевого простору 2 в основний об'єм 1, а також із основного об'єму 1 в оточуюче середовище 6 задані і забезпечуються спеціальною системою вентиляції. Вимірюються перепади тиску між точками 1 і 2, а також перепади між точкою 1 і зовнішнім тиском в точці 3 та 4.

**Аналіз останніх досліджень.** Приклади визначення кількісного витоку повітря з радіоактивним пилом за межі НБК наведені в роботах [1,2] для обмеженої кількості вимірювань і достатньо складної моделі, для якої необхідно додатково вимірювати статичні тиски в точках 3 і 4, значення яких одержуються з значними похибками до 50%, в наслідок поривів вітру.

**Формулювання мети.** Розробка спрощеної моделі аналізу неорганізованого і не контрольованого повітрообміну НБК з оточуючим середовищем для постійного контролю і моніторингу визначення кількісного витоку повітря з радіоактивним пилом за межі НБК.

**Основна частина.** Основу моделі складає рівняння Бернуллі [3], яке дозволяє розрахувати витрату  $G_{1-3}$  між основним об'ємом і Західною протчкою НБК у вигляді (1):

$$G_{1-3} = \mu \cdot S_{1-3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{1-3}}{\rho}}, \quad (1)$$

де:  $\Delta P_{1-3}$  – перепад тисків між між основним об'ємом і Західною протчкою НБК  $\mu = 0,6$  – коефіцієнт витрати [4];  $S_{1-3} = 7,9 \text{ м}^2$  – умовна площа протічки між основним об'ємом

і Західною протічкою НБК, що знайдена спеціальним методом обернених задач [1];  $\rho$  – густина повітря.

Витрата  $G_{1-4}$  розраховується із рівняння балансу витрат (2),

$$G_{1-4} = G_{1-3} + G_5 - G_6, \quad (2)$$

де витрати повітря  $G_5$ , що нагнітається в кільцевий простір і витрати  $G_6$ , що витягується із основного об'єму назовні. Вони вимірюються приладами вентиляційних установок.

Таким чином, розрахунок витрат  $G_{1-3}$  і  $G_{1-4}$  виконується для кожного вимірювання  $\Delta P_{1-3}$  (Рис.2) і витрат повітря  $G_5$  і  $G_6$  в рівняннях (1) і (2) для низки вимірювань в часі на протязі 672 годин, що наведені на Рис. 2 і 3.

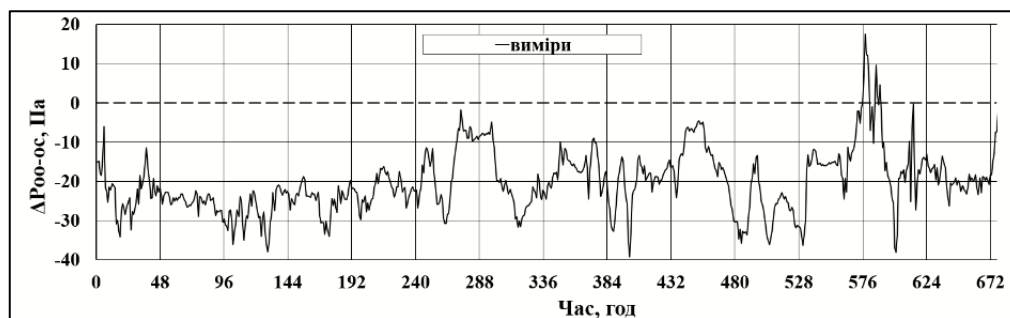


Рисунок 2 – Зміна перепадів тиску  $\Delta P_{1-3}$  від часу

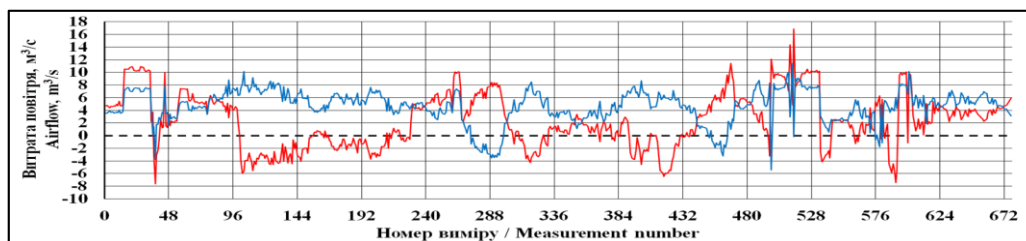


Рисунок 3 – Залежність витрат повітря НБК через західний (синя лінія) та східний (червона лінія) зазори від номеру виміру

На Рис.3 позитивні за знаком витрати означають напрямок витрат повітря в середину основного об'єму НБК, а негативні – назовні, які і є неорганізованим і не контрольованим повітрообміном НБК з оточуючим середовищем.

**Висновок.** Підсумовуючи можна сказати, що розробка спрощеної моделі аналізу неорганізованого і неконтрольованого повітрообміну НБК з оточуючим середовищем дозволяє проводити контроль кількісного витоку повітря з радіоактивним пилом за межі НБК.

#### Перелік посилань:

1. Міжнародна конференція «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища» INUDECО 22017-2023, Славутич, Україна, <https://inudeco.pro/>
2. Круковский П.Г., Метель М.А., Скляренко Д.И., Краснов В.А., Сулимов В.П., Бороздин В.Г., Поклонский В.Г. Новый безопасный конфайнмент Чернобыльской АЭС (расчетно-экспериментальный анализ при проектировании и эксплуатации). // Институт технической теплофизики НАН Украины. – Киев: изд-во ООО «Франко Пак». – 2019. – 300с. (19 ум. друк. зн.). – 200 экз..
3. Т.М. Башта. Гидропривод и гидропневмоавтоматика // книга по требованию.– М: изд-во «ЁЁ Медиа». – 2012. – 317с
4. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ Под ред. М. О. Штейнберга.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.; Машиностроение, 1992.— 672 с: ил.

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Петровський М.Є.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Філатов В.І.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АРМАТУРИ АЕС, ПЕРЕВЕДЕНОЇ В РЕМОНТ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Традиційний підхід до ремонту обладнання на атомних електростанціях (АЕС) в Україні, який ґрунтується на регламентованих системах планово-попереджувальних ремонтів, часто виявляється неоптимальним з точки зору ефективності економії ресурсів та часу, витраченого на ремонт обладнання. Цей традиційний методологічний підхід орієнтований на календарні терміни та заздалегідь визначені інтервали між ремонтами. Обладнання, яке все ще знаходиться в задовільному стані, може підлягати ремонту раніше за потребу, тоді як обладнання, що вимагає негайного втручання, може залишатися без уваги до наступного запланованого періоду обслуговування. Вивчення та адаптація методики переведення арматури в ремонт за технічним станом дозволить підвищити ефективність ремонтних робіт на АЕС, точніше визначити реальний стан арматури та приймати обґрунтовані рішення щодо необхідності її ремонту. Такий підхід може значно підвищити безпеку експлуатації АЕС, зменшуючи ризик відмов обладнання, а також сприяє оптимізації витрат на утримання арматури.

**Формулювання мети.** оцінити технічний стан арматури АЕС, переведеної в ремонт за технічним станом.

**Основна частина.** Значними несправностями, критичними дефектами арматури, що приводять її в стан, при якому вона не здатна виконувати хоч би одну з основних (необхідних) функцій, є ефекти деградації, що проявляються у вигляді дефекту або несправності, які можна кількісно виміряти або якісно оцінити [1]. Цілями проведення моніторингу технічного стану арматури є: прогнозування досягнення домінуючих визначних параметрів технічного стану (ВПТС) і контрольованих ефектів деградації (КЕД), що свідчать про необхідність виведення арматури в ремонт за встановленими граничними значеннями.

Моніторинг технічного стану арматури виконується в процесі експлуатації, випробувань (функціональних, передремонтних і післяремонтних), діагностики арматури або обстеження контрольованого зразка, обраного з групи однотипної арматури, обраної за результатами оцінки, як найбільш схильної до дії деградацій, властивих цій групі однотипної арматури, з виведенням її в ремонт для розбирання і обстеження [2]. Кількісні порогові значення ВПТС і КЕД визначаються за проектно-конструкторською, ремонтною та експлуатаційною документацією на відповідну арматуру, нормативною документацією, досвідом експлуатації. В якості домінуючих ВПТС або КЕД повинні вибиратися параметри, які свідчать про початок порушення функції працездатності арматури (симптоми відмов). Такими симптомами відмов можуть бути: поява крапельних протікань по фланцевому роз'єму арматури «кришка-корпус», по рухомому роз'єму «штук-сальник», поява витoku в запірному органі, зміна часу спрацьовування арматури, виявлення несучільностей з розмірами, близькими до порогово допустимих тощо.

Вивід арматури АЕС за технічним станом відбувається на основі граничних значень домінуючих ВПТС. Граничні значення ВПТС і КЕД повинні визначатися таким чином, щоб залишався запас часу на підготовку до ремонту, коли встановлено, що через певний (розрахунковий) час арматура перейде в непрацездатний стан. Для цього від



дати вірогідної відмови віднімається час, необхідний на підготовку до ремонту, визначений для кожної арматури [3], тобто визначається дата початку виконання ремонту до виникнення відмови (порушення функції працездатності).

**Можливі шляхи вирішення проблеми.** Перш за все, визначити ВПТС або сукупність ВПТС цієї арматури та з них обрати домінуючі. Визначити порогове та граничне значення домінуючих ВПТС. Провести розрахунок дати передбачуваного виведення в ремонт за технічним станом.

**Висновки.** Підсумовуючи, визначивши дату передбачуваного виведення в ремонт за технічним станом необхідно порівняти її з датою планово-попереджувального ремонту для розрахованої арматури. Оцінити доцільність переходу від регламентованої системи планово-попереджувальних ремонтів до оцінки стану технічної арматури АЕС за технічним станом.

**Перелік посилань:**

1. НП 306.2.210-2017 «Загальні вимоги до управління старінням елементів і конструкцій та довгострокової експлуатації енергоблоків атомних станцій.
2. СОУ НАЕК 043:2016 «Технічне обслуговування та ремонт. Трубопровідна арматура. Критерії працездатного функціонального стану»
3. СОУ-Н ЯЕК 1.014-8:2008, Норми часу на ремонт та технічне обслуговування основного та допоміжного обладнання АЕС з реакторами ВВЕР-1000

<sup>1</sup> Аспірант 1 курсу Печериця І.О.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Клевцов С.В.

<https://orcid.org/0000-0003-1405-5048>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ОГЛЯД ЗВІТУ З АНАЛІЗУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОДІЙ НА УКРАЇНСЬКИХ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ ЗА 2022 РІК

### Огляд звіту з аналізу експлуатаційних подій на українських атомних електростанціях за 2022 рік

У 2022 році українські атомні електростанції стикалися з низкою експлуатаційних подій, що вимагають глибокого аналізу через те, що вони були викликані ракетними обстрілами. Важливим інтегрованим джерелом зі стислим описом, характеристикою та аналізом експлуатаційних подій є звіт про аналіз експлуатаційних подій на українських атомних електростанціях [1]. Звіт складається з двох частин, в яких проаналізовані експлуатаційні події першого та другого півріччя 2022 року.

Аналіз експлуатаційних подій охоплює наступні області:

- 1) аналіз попередніх звітів та звітів про розслідування (додаткові та оновлені звіти) експлуатаційних подій на атомних електростанціях України;
- 2) статистична оцінка та аналіз інформації щодо експлуатаційних подій на атомних електростанціях України;
- 3) аналіз інформації про невеликі події на атомних електростанціях України;
- 4) глибинний аналіз подій, важливих для безпеки, що відбулися на атомних електростанціях України.

Взагалі, звіт виконує три завдання:

Завдання 1 – аналіз попередніх/додаткових повідомлень та звітів про розслідування експлуатаційних подій на атомних електростанціях України та визначення тих, що пов'язані або вплинуті воєнними умовами.

Завдання 2 – систематизація даних про експлуатаційні події та розробка звіту з переліком рекомендацій для підтримки наглядової діяльності та покращення зворотного зв'язку з експлуатаційного досвіду.

Завдання 3 – проведення технічних зустрічей для обміну інформацією про системи досвіду експлуатації та обговорення результатів аналізу експлуатаційних подій і розробка кінцевого переліку рекомендацій.

З урахуванням того, що у 2022 році на АЕС сталося значна кількість подій через російську військову агресію, а їх причини не пов'язані з експлуатаційними факторами, події були розділені на два типи відповідно до факторів, що їх викликали:

Тип I – експлуатаційні події, що сталися через традиційні експлуатаційні фактори (пов'язані з експлуатацією АЕС), а саме: відмова обладнання АЕС, помилки персоналу АЕС та/або підрядників на території АЕС, організаційні фактори і т.д.

Тип II – експлуатаційні події, що сталися через (або були під впливом) російської агресії, а саме: захоплення АЕС, обстріл території АЕС та території, прилеглої до АЕС, обстріл та пошкодження критичної інфраструктури України, яке вплинуло на режим роботи та призвело до експлуатаційних подій або має опосередкований вплив воєнних умов.

Дослідження особливостей електроживлення АЕС України при збуреннях в ОЕС України показали, що в ОЕС України виникали експлуатаційні події через пошкодження об'єктів енергетичної інфраструктури внаслідок ракетних обстрілів [2 - 7], які призвели до знеструмлення повітряних ліній електропередачі 750/330/150-110 кВ та значних електричних коливань напруги та частоти в енергосистемі, що мали при цьому такі

характерні ознаки:

– зниження частоти та спрацювання дистанційних захистів від симетричних КЗ у зовнішній мережі турбогенераторів через зростання електричного навантаження на цих АЕС в момент розвитку аварійної події;

– збільшення частоти, що вказує на зменшення електричного навантаження на цій АЕС в момент розвитку аварійної події.

– електричні хитання в мережі (коливання частоти та напруги мережі), що супроводжувались появою гармонічних складових 3-го та 5-го порядку;

– зростання до аварійних значень рівнів напруги на шинах ВРП-330 кВ/750 кВ АЕС та шинах власних потреб АЕС під час відновлення роботи ОЕС внаслідок вмикання високовольтних ПЛ-330 кВ та/або 750 кВ на холостий хід.

За результатами огляду був зроблений висновок, що необхідно розробити та впровадити ефективне блокування швидкодіючих електричних захистів обладнання головної схеми АЕС від дій гармонічних складових 3-го і 5-го порядку з метою їх зайвого спрацювання та вимкнення енергоблоків від мережі. Необхідна розробка додаткових заходів, що забезпечуватимуть:

- оснащення всіх енергоблоків АЕС частотною автоматикою;

- більш ефективну роботу частотної автоматики АЕС з метою недопущення спрацювання АЗ за фактором зниження частоти в мережі шляхом упередженого вимкнення енергоблоків АЕС від мережі та переведення їх роботи на власні потреби та впровадження спеціальної автоматики виділення енергоблоків АЕС на окремий район навантаження.

З'ясовано, що важливим являється успішна робота обладнання САЕ кожного енергоблока на всіх АЕС після повного знеструмлення енергоблоку та запуски ЗРДЕС на тих енергоблоках АЕС, де вони передбачені проектом, що свідчить про правильність організації робіт під час експлуатації обладнання САЕ та ЗРДЕС АЕС, включаючи проектні рішення щодо вибору та компоновки обладнання, а також щодо обсягів перевірок, технічного обслуговування і ремонтів обладнання САЕ.

#### **Перелік посилань:**

1. Provisions on the Procedure for Investigation and Accounting of NPP Operational Events (NP 306.2.235-2021), approved by SNRIU Order No. 411 dated 12 July 2021, registered in the Ministry of Justice of Ukraine under No. 38 of 8 September 2022.

2. Н.0.0000.0044 Действия оперативного персонала ОП ЮУАЭС при системной аварии в энергосистеме Украины. Инструкция.

3. НП 306.2.205-2016 Вимоги до систем електропостачання, важливих для безпеки атомних станцій.

4. Звіт ОРОВ-П23-06-11-22. Відключення від мережі енергоблоків № 1, 2, 3, 4 зі спрацюванням АЗ, внаслідок повного знеструмлення ліній електропередач ВРУ-750/330/110 кВ, яке зумовлене ракетними обстрілами військами російської федерації об'єктів енергетичної інфраструктури України.

5. Звіт № 1ХМЕ-П23-10-11-22. Переведення реакторної установки енергоблоку №1 в підкритичний стан дією аварійного захисту через знеструмлення власних потреб, викликаного терористичними діями російської федерації (рф) з обстрілу об'єктів енергетичної інфраструктури України.

6. Звіт № 2ХМЕ-П23-11-11-22. Переведення реакторної установки енергоблоку №2 в підкритичний стан дією аварійного захисту через знеструмлення власних потреб, викликаного терористичними діями російської федерації (рф) з обстрілу об'єктів енергетичної інфраструктури України.

7. Звіт ПАЕС № 1ЮУК-П23-07-11-22. Знеструмлення власних потреб енергоблоку з запуском АСП 1-го та 3-го каналів систем безпеки через втрату напруги на шинах ВРП-150 кВ, ВРП-330 кВ внаслідок ракетних обстрілів російською федерацією енергосистеми України

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Пригода Н.А.

<sup>1</sup> Ст.викл., к.т.н. Сахно О.В.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## **АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗНИЖЕННЯ КОНСЕРВАТИЗМУ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ СТАРІННЯ ДЛЯ ПЕРЕОЦІНКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОГО ТЕРМІНУ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

У зв'язку з постійним розвитком енергетичного сектора та посиленням вимог щодо експлуатації атомних електростанцій (АЕС), зростає потреба у пошуку нових шляхів посилення контролю та вдосконалення стандартів безпеки. Основоположним для цього є необхідність гарантувати, що системи безпеки та обладнання можуть виконувати призначені функції під час нормальної експлуатації, землетрусів та потенційних аварій. Важливо зазначити, що експлуатуюча організація вживає низку заходів, щоб гарантувати, що обладнання, важливе для безпеки, відповідає вимогам, які на нього покладені. Одним із них є кваліфікація обладнання. В процесі розвитку, загальні вимоги до кваліфікації були деталізовані стосовно умов навколишнього середовища. Ці стандарти визначають більш конкретні критерії та методи, які можна використовувати для кваліфікації обладнання.

Згідно з вимогами норм, правил та стандартів з ядерної та радіаційної безпеки [1 – 3], обладнання, яке є важливими для безпеки та виконує основні функції безпеки, повинно бути кваліфіковане для роботи в "жорстких" умовах навколишнього середовища та під час сейсмічних впливів протягом усього терміну експлуатації енергоблока. У кваліфікації на умови навколишнього середовища розглядаються як нормальні, так і екстремальні умови, які впливають на стан та функціональність обладнання. Ці умови можуть включати такі елементи, як температура, випромінювання, вологість, хімічні або водяні впливи, тиск, вібрація та сейсмічний рух. Слід зазначити, що вплив параметрів навколишнього середовища на технічний стан є суттєвим для електротехнічного обладнання, обладнання систем контролю та управління, та критичних компонентів тепломеханічного обладнання через наявність у цих елементах електричних ланцюгів та/або використання полімерних і органічних матеріалів, які є чутливими до деградації та, відповідно, старіння під дією цих параметрів. Необхідно передбачити можливі прояви старіння обладнання АЕС, оскільки це може мати серйозні наслідки для безпеки експлуатації атомної електростанції. Продовження роботи в цьому напрямі дозволить своєчасно виявляти ознаки зношеності, деградації та можливих вад обладнання, що допоможе уникнути аварійних ситуацій та забезпечити безпеку персоналу та населення.

Для можливості експлуатації обладнання в понадпроектний термін енергоблока необхідним є виконання заходів зі збереження досягнутого рівня кваліфікації [4 – 7]. Згідно з вимогами нормативної бази України у разі завершення кваліфікаційного терміну обладнання втрачає свій статус кваліфікації, тобто – гарантії працездатності в умовах можливої аварії. Проблема постає в тому, що для низки обладнання АЕС України, кваліфікаційний термін завершується раніше, ніж передбачуваний термін довгострокової експлуатації відповідних енергоблоків. До того ж, наявні програмні документи та стандарти експлуатуючої організації не містять детальних підходів до збереження кваліфікації, зокрема, питань продовження кваліфікаційного терміну. Слід зазначити, що під час визначення в межах установлення кваліфікації кваліфікаційного терміну обладнання енергоблоків АЕС України застосовувалися консервативні проєктні вихідні дані, які не враховують фактичні параметри експлуатації, що були досягнуті за результатами реалізації організаційно-технічних заходів з модернізації обладнання енергоблоків АЕС України за період експлуатації. Фактичні параметри умов нормальної

експлуатації обладнання енергоблоків АЕС України є нижчими за відповідні проєктні вихідні дані, що були застосовані під час моделювання старіння в межах установлення кваліфікації [8].

З метою уникнення надмірного консерватизму пропонується виконати переоцінку результатів моделювання старіння обладнання, що може забезпечити продовження його ресурсу та запобігти передчасній заміні у зв'язку із закінченням кваліфікаційного терміну.

Запропоновані підходи можуть створити додаткову мотивацію для подальших удосконалень програм кваліфікації обладнання, тому що вони можуть принести значні переваги, а саме: підвищення надійності обладнання та зменшення експлуатаційних витрат (в разі виявлення можливості продовження кваліфікаційного терміну певного обладнання, що дозволяє зменшити витрати на заміну).

Враховуючи зазначені проблеми та можливі переваги, які були описані раніше, в роботі буде розглянуто можливі фактори впливу, які призводять до старіння обладнання та, відповідно, мають бути враховані під час прогнозування його кваліфікаційного терміну. Ключовим джерелом для проведення аналізу будуть слугувати існуючі теоретичні концепції та дослідження, пов'язані із моделюванням фізичного старіння обладнання АЕС в межах діяльності з його кваліфікації. Це охоплює методи оцінки та управління кваліфікаційним терміном, а також вплив на безпеку об'єктів. Для забезпечення працездатності обладнання протягом усього терміну довгострокової експлуатації, дослідження передбачає розробку підходів до продовження кваліфікаційного терміну обладнання. Обґрунтування буде зосереджене на методах вдосконалення процесу кваліфікації (стосовно етапу збереження кваліфікації) та оптимізації використання моделей старіння під час визначення кваліфікаційного терміну. Результати цього дослідження можна буде використовувати в процесі експлуатації діючих АЕС, серед іншого – з метою обґрунтування та підтримки їх довгострокової експлуатації. Удосконалення процесу кваліфікації обладнання та оптимізація кваліфікаційного терміну дозволить підвищити безпеку та надійність роботи АЕС, що є важливим завданням для енергетичної галузі в цілому.

#### **Перелік посилань:**

1. Загальні положення безпеки атомних станцій, НП 306.2.141-2008, затверджені наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 19 листопада 2007 року № 162, зареєстровані у Міністерстві юстиції України 25 січня 2008 року за № 56/14747.
2. Загальні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації обладнання й трубопроводів атомних станцій, НП 306.2.227-2020, затверджені наказом Державної інспекції ядерного регулювання України від 04 серпня 2020 року № 319, зареєстровані у Міністерстві юстиції України 30 вересня 2020 року за № 955/35238.
3. Вимоги до періодичної переоцінки безпеки енергоблоків атомних станцій, НП 306.2.214-2017, затверджені наказом Державної інспекції ядерного регулювання України від 30 липня 2017 року № 313, зареєстровані у Міністерстві юстиції України 20 вересня 2017 року за № 1158/31026.
4. Програма работ по квалификации оборудования энергоблоков АЭС ГП «НАЭК «Энергоатом», ПМ-Д.0.03.476-18, погоджена листом Державної інспекції ядерного регулювання України від 22.04.2020 № 15-23/5548-4160.
5. Инженерная, научная и техническая поддержка. Квалификация оборудования энергоблоков АЭС ГП «НАЭК «Энергоатом». Общие требования, СОУ НАЕК 179:2019, затверджені наказом ДП «НАЕК «Енергоатом» від 17 січня 2019 року № 38.
6. Инженерная, научная и техническая поддержка. Квалификация оборудования, важного для безопасности, на условия окружающей среды. Общие требования, СОУ НАЕК 181:2019, затверджені наказом ДП «НАЕК «Енергоатом» від 22 березня 2019 року № 273.
7. Инженерная, научная и техническая поддержка. Квалификация оборудования, важного для безопасности, на сейсмические воздействия. Общие требования, СОУ НАЕК 182:2019, затверджені наказом ДП «НАЕК «Енергоатом» від 22 березня 2019 року № 273.
8. Holzman P. M., Sliter G. E., Carfagno S. P. EQUIPMENT QUALIFICATION REFERENCE MANUAL. Electric Power Research Institute, 1992.

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Самчук М.Б.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Філатов В.І.

[https://scholar.google.com.ua/citations?view\\_op=new-article&hl=ru&imq=](https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=new-article&hl=ru&imq=)

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ОБГРУНТУВАННЯ ЗНЯТТЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ АЕС З ВВЕР

**Постановка проблеми та її актуальність.** Багато ядерних електростанцій з ВВЕР побудовані десятиліття тому і наближаються до кінця свого експлуатаційного терміну. Обґрунтування варіанту зняття з експлуатації є важливим етапом у забезпеченні безпеки під час закриття станції. Багато країн розглядають зменшення використання атомної енергії через підвищення усвідомлення щодо ризиків та створення більш сталого енергетичного майбутнього. Вибір варіанту зняття з експлуатації АЕС потребує ретельного аналізу впливу на довкілля, а також врахування всіх аспектів безпеки під час процедури виведення з експлуатації.

Актуальність теми проявляється в зростанні ризиків, пов'язаних з експлуатацією АЕС з ВВЕР, необхідності прийняття обґрунтованих рішень щодо зняття з експлуатації, відсутність комплексного підходу до зняття з експлуатації, висока вартість зняття з експлуатації, необхідність забезпечення безпечного поводження з радіоактивними відходами.

**Аналіз останніх досліджень.** Дослідження сучасної проблематики з питань обґрунтування варіанту зняття з експлуатації АЕС з ВВЕР висвітлюють такі провідні науковці, як: В.І. Філатов, Ю.М. Лобач, М.В. Лисенко, В.М. Макаровський, Є.М. Письменний, Н.Г. Бойко.

**Формулювання мети.** Метою даного дослідження є розробка комплексного обґрунтування варіанту зняття з експлуатації АЕС з ВВЕР, який би враховував всі аспекти цього процесу.

**Основна частина.** Процедура виведення з експлуатації атомних електростанцій охоплює комплекс заходів, які мають гарантувати безпеку та захист персоналу, населення та довкілля від можливого випромінювання, що виникло та накопичилося в системах та обладнанні протягом експлуатації реакторної станції [1].

Виведення з експлуатації атомної електростанції чи її енергоблоку передбачає поетапне виконання заходів. Зміст, тривалість і кінцева мета кожного етапу, а також всього процесу, визначаються міжнародною практикою на національному рівні і залежать від різноманітних факторів. Ці фактори можуть включати причини виведення з експлуатації, подальше призначення території, тип реакторної установки, наявність необхідної фінансової підтримки, наявність необхідної інфраструктури, технологій і технічних ресурсів тощо [2].

Головна мета відключення АЕС від мережі полягає в досягненні «зеленого луку», що визначається як можливість використання території для будь-яких господарських потреб. Це передбачає демонтаж будівель і споруд АЕС, а також обробку та зберігання радіоактивних відходів, які виникають під час цього процесу, у спеціальних сховищах.

Необхідно також видалити будівлі та інфраструктуру, які використовувалися для обробки радіоактивних відходів. Вторинні відходи повинні бути оброблені та віднесені до спеціальних сховищ. Після цього територію слід відновити, знизивши рівень забруднення до безпечного рівня використання. Досягнення цієї мети займе значно більше часу, ніж саме будівництво АЕС, а у деяких сценаріях час виведення з експлуатації може перевищити час експлуатації самого об'єкта [1].

Вимкнення енергоблоку АЕС може бути плановим або позаплановим, включаючи

аварійну зупинку у випадку серйозного пошкодження активної зони реактора, що призводить до неможливості продовження його роботи.

Якщо витрати та ресурси, спрямовані на забезпечення безпеки АЕС, перевищують прибуток від виробництва електроенергії протягом визначеного терміну, що передбачений проектом, енергоблок може бути зупинений. Процес виведення з експлуатації повинен відповідати вимогам законодавства та нормативних документів, що регулюють цей процес. Крім того, йому слід передувати організаційно-технічна підготовка, включаючи накопичення фінансових ресурсів, необхідних для промислового використання.

Виведення з експлуатації АЕС загалом регулюється низкою законодавчих актів. Так, Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [3] визначає порядок прийняття рішення про зняття з експлуатації ядерних установок, відповідальність за здійснення процесу та фінансування. Закон України «Про поводження з радіоактивними відходами» [4] безпосередньо стосується виведення з експлуатації ядерної установки в частині діяльності з поводження з радіоактивними відходами. Закон України «Про регулювання питань забезпечення ядерної безпеки» [5] визначив нові підходи до здійснення та планування зняття з експлуатації. Так, відповідно до цього закону [5] припинення експлуатації та зняття з експлуатації ядерної установки здійснюється відповідно до проекту зняття ядерної установки з експлуатації.

Отже, включення стратегії виведення з експлуатації українських АЕС може стати однією із складових стратегії розвитку атомної енергетики України. Ця стратегія, з іншого боку, може бути розроблена на державному рівні аналогічно до «Енергетичної стратегії України до 2035 року» [6].

Стратегія виведення з експлуатації АЕС України повинна чітко визначати мету та основні цілі цього процесу. Важливі аспекти включають можливість виведення з експлуатації, розрахункову тривалість реалізації, попередній план подальшого використання території, критерії кінцевого стану майданчика після зняття з експлуатації, а також основні критерії для кожного етапу виведення з експлуатації.

Вносити з експлуатації та виводити з експлуатації ядерного реактора слід у відповідності до розробленого проекту зняття з експлуатації. Для цього необхідно розробити техніко-економічне обґрунтування та визначити відповідний порядок. Цей порядок повинен визначати послідовність, тривалість та основний зміст кожного етапу виведення з експлуатації, а також умови для стану ядерної установки після кожного етапу.

Отже, щодо вказаної теми можемо зазначити такі рекомендації:

1. При знятті з експлуатації АЕС з ВВЕР рекомендується використовувати комплексний підхід, який враховує всі аспекти цього процесу.
2. Для зменшення ризиків, пов'язаних з зняттям з експлуатації, рекомендується використовувати передові методи та технології, а також ретельно планувати та виконувати роботи.
3. Для мінімізації вартості зняття з експлуатації рекомендується використовувати оптимальні методи та технології, а також залучати до роботи кваліфікованих фахівців.
4. Для згладжування негативних соціальних наслідків зняття з експлуатації рекомендується заздалегідь проводити інформаційну роботу та реалізувати соціальні програми.

**Висновки.** Зняття з експлуатації АЕС з ВВЕР є складним і багатограним завданням, яке потребує комплексного підходу. Це дослідження дозволило розробити таке обґрунтування, яке враховує всі аспекти цього процесу, включаючи технічні, економічні, екологічні та соціальні аспекти.

Планована остаточна зупинка першого енергоблоку АЕС України, який наразі знаходиться в експлуатації, а також інших енергоблоків з реакторами ВВЕР або енергоблоків Атомних електростанцій, вказаних у статті, може відбутися приблизно до 2030 року. Протягом наступних 5 років ще 5 енергоблоків можуть бути остаточно зупинені.

Для цілеспрямованої підготовки до цього виконуються комплексні інженерні та радіаційні дослідження, а також розробляються проекти. Процес підготовки до зняття з експлуатації повинен розпочатися за 3-4 роки до запланованої зупинки. Таким чином, передбачена діяльність з законодавчого та нормативного забезпечення, насамперед, включає всі необхідні заходи для підтримання аварійного статусу АЕС.

**Перелік посилань:**

1. Pysmennyu, Y., Filatov, V., & Boyko, N. (2022). Аналіз питань нормативного забезпечення діяльності з підготовки до зняття АЕС з експлуатації. *Ядерна та радіаційна безпека*, (1(93)), 40-45.
2. Філатов В. І., Бойко Н. Г. Щодо мети та змісту діяльності на початкових стадіях зняття АЕС з експлуатації. *Электрические сети и системы*. 2020. № 5-6. С. 22-24
3. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України від 08.02.1995 № 39/95-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80#Text>.
4. Про поводження з радіоактивними відходами: Закон України від 30.06.1995 № 255/95-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/255/95-%D0%B2%D1%80#Text>.
5. Про впорядкування питань, пов'язаних із забезпеченням ядерної безпеки : Закон України від 24.06.2004 № 1868-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1868-15#Text>
6. Енергетична стратегія України до 2035 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605-р. URL: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art\\_id=245239564](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245239564).



<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Стецюк А.Б.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Сахно О.В.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ МАЙДАНЧИКІВ АЕС

**Постановка проблеми та її актуальність.** Згідно з вимогами нормативно правового акту “Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій. НП 306.2.208-2016” [1] при обґрунтуваннях безпеки необхідно використовувати не тільки детерміністичний, але й імовірнісний підхід. Наразі у експлуатуючої організації (АТ “НАЕК “Енергоатом”) відсутній досвід організації та виконання досліджень сейсмічної небезпеки на майданчиках АЕС України. Виконання такої оцінки дозволить отримати чіткішу картину щодо рівня сейсмічної небезпеки на майданчиках АЕС, що, в свою чергу, дозволить підвищити рівень забезпечення безпеки АЕС України до передової міжнародної практики у сфері атомної енергетики.

**Аналіз останніх досліджень.** Наразі існує низка закордонних наукових досліджень стосовно застосування імовірнісного аналізу до оцінки сейсмічної небезпеки, наприклад [2, 3]. Автори даних робіт пропонують різні підходи та використовують різні програмні засоби для обрахунку сейсмічної небезпеки імовірнісним шляхом. В роботі наведено результати порівняльного аналізу на основі якого було прийнято рішення, що для розрахунку сейсмічної небезпеки на майданчиках АЕС найбільше підходить саме R-CRISIS.

**Формування мети.** Мета даної роботи полягає в оцінці ефективності розрахункового коду R-CRISIS та перевірці його підходів до оцінки сейсмічної небезпеки на майданчиках АЕС. Планується ретельне вивчення програмного засобу з метою з'ясування його можливостей та обмежень. Це дозволить сформуванню ефективні підходи і процедури для використання цього інструменту на всіх майданчиках АЕС України.

**Основна частина.** Для початку у даній роботі було розглянуто ймовірність виникнення землетрусів вказаної магнітуди у вказаному місці протягом наступні N років і це було найбільшим загальним описом сейсмічності. Після цього був проведений розрахунок за модифікованою моделлю Гутенберга-Ріхтера. За результатами даного розрахунку можна оцінити потенційні загрози для заданої місцевості. Розрахунок проводився на основі історичних даних та імовірних сценаріїв. Після цього у роботі використовувалась модель характеристичного руху ґрунту. Дана модель дала можливість визначити потенційні ризики для даної місцевості, а також дозволила оцінити ймовірність та можливі наслідки майбутніх землетрусів. Відповідно до отриманих даних були запропоновані розроблені стратегії з управління ризиками, плани евакуації та заходи з підвищення рівня стійкості до землетрусів. В подальшому розрахунку використовувалась узагальнена непуассонівська модель, яка є математичною моделлю для аналізу та моделюванню подій, які відбуваються в часі або просторі і не підпорядковуються класичному процесу Пуассона. Наступним пунктом була розробка загальної моделі Пуассона. Події, які підпорядковувалися такому розрахунку відбувались незалежно одна від одної в часі та просторі. Після було проведено геометричне моделювання за допомогою джерела площ, які моделювались як площини за заданими вершинам, що відповідають трьох вимірному представленні. Лінійні джерела, що будуть моделюватись, як полі лінія з постійною або змінною глибиною та точковими джерелами. Наступним кроком було вимірювання відстані від місця до джерела землетрусу і у даному розрахунковому коді для цього було використано: фокусну відстань, епіцентрально відстань, відстань Джойнера та

Бура і найбільшу відстань до зони розриву. Подальшими кроками даного дослідження була розробка моделі затухань рухів Землі, процедури просторової інтеграції, використання цифрової моделі рельєфу, поєднання моделей сейсмічності, геометричної та моделі затухання. Останніми пунктами дослідження були розроблені алгоритми розрахунку небезпеки, логічні дерева, а також були проведені підтверджувальні тести [4, 5].

**Висновки.** Загалом у даній роботі висвітлено, як за допомогою розрахунково коду R-CRISIS можна використовувати імовірнісний підхід, який безумовно доповнить детерміністичний підхід, яким ми користуємось зараз, а також, як використання даного імовірнісного підходу допоможе отримати чіткішу картину щодо сейсмічної небезпеки на майданчиках АЕС, та покращить загальне розуміння процесів, які можуть становити небезпеку для безпечної експлуатації АЕС.

**Перелік посилань:**

1. НП 306.2.208-2016 “Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій.”.
2. Probabilistic Risk Assessment in Central America.pdf.
3. R-CRISIS v20 Validation and Verification Document.pdf.
4. PEER 2010-106\_Verification of probabilistic seismic hazard analysis computer programs.pdf.
5. PEER 2018-03\_Probabilistic seismic hazard analysis code verification.pdf.

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Фоміна І.С.

<sup>1</sup> Проф., д.т.н. Носовський А.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=TnzOpWUAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВПЛИВ ЕНЕРГОНАВАНТАЖЕННЯ ТВЗ ВВЕР НА ЇЇ РАДІАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Вплив режиму енергонавантаження ТВЗ ВВЕР-1000 на її радіаційні характеристики є важливою темою дослідження, оскільки активність і залишкове енерговиділення ядерного палива безпосередньо впливає на безпеку та ефективність роботи ядерного реактора.

Радіаційні характеристики ВЯП – значною мірою визначають як можливий перебіг аварійних сценаріїв, так і можливі радіаційні наслідки аварій на ядерних установках [1].

**Наукова новизна.** Полягає у дослідженні комплексного впливу режиму енергонавантаження, історії експлуатації та вигорання палива на радіаційні характеристики ТВЗ ВВЕР-1000 [2]. Розробка нової моделі для розрахунку радіаційних характеристик ТВЗ за допомогою коду SCALE. Отримання рекомендації щодо оптимізації режимів роботи реактора.

**Аналіз останніх досліджень.** Розвиваються нові моделі та методи для кращого розуміння термомеханічних, теплогідролічних, корозійно-хімічних, дифузійних процесів, а також процесів, пов'язаних з перебудовою мікроструктури палива та газовиділенням з нього. Ці моделі використовуються для прогнозування поведінки ТВЕЛ в різних режимах роботи, включаючи нормальні, аварійні та перехідні [3].

Існуючі дослідження впливу енергонавантаження на радіаційні характеристики ТВЗ ВВЕР-1000 показали [4], що енергонавантаження має значний вплив на радіаційні характеристики ТВЕЛ. Збільшення енергонавантаження може призвести до:

- збільшення температури та теплового напруження в оболонці ТВЕЛ;
- збільшення газовиділення з палива;
- збільшення радіаційного розпухання та деформації оболонки;
- зниження механічної міцності оболонки;
- збільшення ймовірності пошкодження оболонки [5].

**Формулювання мети.** Метою роботи є дослідження:

- впливу режиму навантаження ядерного палива під час експлуатації у активній зоні ВВЕР-1000 на його активність і залишкове енерговиділення;
- впливу вигорання палива на параметри міцності твелів.

**Методи дослідження:**

- метод узагальнення результатів аналізу вимог нормативно-правових документів щодо системи поводження з ВЯП;
- методи математичного та обчислювального моделювання з використанням коду SCALE;
- методи експертних оцінок на основі фізики ядерних реакторів та проектних даних реакторів типу ВВЕР.

**Огляд літературних джерел.** Під час обґрунтування безпеки обігу відпрацьованого ядерного палива реакторів ВВЕР на кожному етапі виникає необхідність у оцінці радіаційних та теплофізичних характеристик ядерного палива, таких як активність/концентрація джерела випромінювання, потужність дози, залишкове тепловиділення. Для розрахунку цих характеристик існує багато програмних засобів (ПЗ) та довідкових матеріалів.

Існуючі довідники з радіаційних характеристик ВЯП застаріли через зміну

характеристик використовуваних в даний час тепловиділяючих збірок [4]. Наприклад, у довіднику "Радіаційні характеристики опроміненого ядерного палива" [1] наведені дані про характеристики палива реакторів ВВЕР-440 з обмеженням за глибиною вигорання 30 ГВт·діб/тU. Проте глибина вигорання існуючих відпрацьованих тепловиділяючих збірок реакторів ВВЕР-440 досягає значень 60 ГВт·діб/тU.

На атомних електростанціях під час зупинки реактора для проведення планово-попереджувальних робіт виконується ряд операцій з контролю стану ТВЗ. Це включає візуальний огляд та зйомку на відеокамеру, контроль герметичності ТВЗ в цілому.

Крім того, за допомогою стендів інспекції проводиться потвельний ультразвуковий контроль герметичності оболонок, вимірювання деяких геометричних параметрів ТВЗ, а в перспективі після вилучення ТВЕЛів є можливість вимірювання їх довжини та діаметра, проведення вихретокового контролю, гамма-сканування, вимірювання товщини оксидної плівки на поверхні оболонок.

Такий контроль необхідний для оцінки стану ТВЗ, ТВЕЛів і відповідає вимогам МАГАТЕ. Тому логічним є порівняння отриманих на АЕС результатів з результатами більш детальних досліджень, проведених у захисних камерах, що дозволяє дати об'єктивний висновок про стан виробів.

У атласі "Стан оболонок відпрацьованих твелів ВВЕР" [2] представлені матеріали післяреакторних досліджень твелів ВВЕР-1000 і ВВЕР-440 з тривалістю експлуатації до 4 і 5 років відповідно (головним чином за корозійним станом оболонок). Накопичено значний обсяг даних за післяреакторними дослідженнями ТВЗ, які експлуатувалися протягом більш тривалого часу (до 6 років) та за вищих вигорань палива.

Крім того, представлені результати, які можна отримати на стендах інспекції. Це геометричні параметри ТВЗ та ТВЕЛів, характеристики пружинних блоків і пружин, дані щодо деформованого стану оболонок, а також деякі дані щодо негерметичних твелів.

Використовуваний в даний час в якості оболонок твелів ВВЕР сплав Zr+1%Nb характеризується високою корозійною стійкістю. У стандартних режимах експлуатації корозія, як правило, має фронтальний характер. Зазвичай спостерігана окисна плівка на зовнішній поверхні оболонок має рівномірну товщину 4-7 мкм, а в зоні зварних з'єднань заглушок ТВЕЛів близько 10 мкм. У деяких випадках, які відбувалися у практиці експлуатації ВВЕР-1000 і ВВЕР-440, корозійний стан оболонок відрізняється від описаного.

**Висновки.** Дослідження впливу енергонавантаження на радіаційні характеристики ТВЗ ВВЕР-1000 є складним завданням, яке потребує комплексного підходу. Для отримання достовірних результатів необхідно використовувати математичне та обчислювальне моделювання з використанням коду SCALE, експлуатаційні дані, такі як

історія режимів роботи реактора (рівні потужності, тривалість роботи на різних рівнях потужності, аварійні режими), характеристики ТВЗ (тип ТВЗ, геометричні розміри, матеріали), дані про радіаційні характеристики ТВЗ (активність, залишкове енерговиділення). Дане дослідження дозволить збільшити об'єм знань про фізичні процеси, що відбуваються в активній зоні реактора.

#### **Перелік посилань:**

1. Колобашкин В.М. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник.– М., Энергоатомиздат, 1983.
2. Звир Е.А., Конов В.Б., Молчанов В.Л., Павлов С.В., Поленок В.С., Шишкин А.А. После реакторное состояние твэлов и ТВС ВВЭР 2013р., 201 с.
3. Оценка развития атомной энергетики Украины на долгосрочную перспективу / [Власенко Н.И., Кухарчук Н.П., Годун О.В. и др.] // Тр. XX межд. конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. – Алушта: ННЦ "Харьковский физико-технический институт", 10-15 сент. 2012.– С. 7–8.
4. "Калькулятор радіаційних і теплофізичних характеристик ОЯТ", що реалізує методи і підходи РБ-093-14.
5. Посібник з безпеки при використанні атомної енергії "Радіаційні та теплофізичні характеристики відпрацьованого ядерного палива водо-водяних енергетичних реакторів і реакторів великої потужності каналних" (РБ-093-20).

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Шеванов А.Р.

<sup>1</sup> Проф., д.т.н. Носовський А.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=TnzOpWUAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## АКТИВНІСТЬ І ЗАЛИШКОВЕ ЕНЕРГОВИДІЛЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ВВЕР-1000

**Постановка проблеми.** ВВЕР–1000 (водно-водяний енергетичний реактор), який є другим поколінням легководних реакторів великої потужності, має електричну потужність енергоблоків на рівні 1000 МВт та теплову потужність 3000 МВт. Ці ядерні реактори встановлені на Запорізькій, Рівненській, Хмельницькій та Південноукраїнській атомних електростанціях. У ВВЕР–1000 міститься 163 тепловидільних збірки (ТВЗ) з тепловидільними елементами (твелями), розміщеними в середині активної зони з кроком 20–25 см. Всі ТВЗ монтується у вигородці шахти внутрішньо-корпусної (ШВК). Нижній кінець ТВЗ опирається на стакан ШВК, а верхній кінець (головка) притискається до БЗТ. Стакани ШВК, вигородка і БЗТ забезпечують утримання ТВЗ в потрібному положенні [1].

**Виділення невирішеного раніше завдання.** Військова агресія РФ в Україні викликала силове захоплення Запорізької АЕС і створення радіоактивної загрози для навколишнього середовища. Тому правильна оцінка активності та залишкового енерговиділення відпрацьованого ядерного палива є актуальною задачею.

**Мета дослідження.** Аналіз зміни активності і залишкового енерговиділення відпрацьованого ядерного палива ВВЕР–1000.

**Результати дослідження.** У рамках енергетичного циклу АЕС, важливим елементом є відпрацьоване ядерне паливо (ВЯП), що утворюється під час генерації енергії у ядерних реакторах. Термін використання ядерного палива у реакторах визначається ступенем вигорання ізотопів, що розділяються. Після досягнення встановленого рівня вигорання ядерне паливо вилучається з реактора та вважається відпрацьованим, оскільки не може бути безпосередньо використане для генерації енергії.

Після завершення роботи в активних зонах реакторів відпрацьоване ядерне паливо переміщується у басейни для зберігання перед реактором, де воно залишається протягом 4–5 років для зменшення залишкового виділення енергії. Залишкове виділення енергії – це процес, спричинений радіоактивним розпадом продуктів поділу [2].

Держатомрегулювання України спільно з Держтехногенбезпеки та НАЕК «Енергоатом» розробили План дій щодо виконання цільової позачергової оцінки стану безпеки та подальшого підвищення безпеки енергоблоків АЕС України, який складається з короткострокових та довгострокових заходів. До короткострокових заходів віднесено: – цільова позачергова оцінка стану безпеки енергоблоків АЕС (стрес-тести) та аварійної готовності; – перегляд та доповнення «Комплексної (зведеної) програми підвищення безпеки енергоблоків АЕС України»; – аналіз нормативно-правової бази з ядерної та радіаційної безпеки та розробка пропозицій щодо її вдосконалення, а також підвищення вимог з безпеки для діючих і нових енергоблоків АЕС.

До довгострокових заходів віднесено: – реалізація заходів з підвищення безпеки, які визначені за результатами виконання переоцінки; – оцінка сейсмічності майданчиків АЕС і сейсмостійкості обладнання, трубопроводів, конструкцій та споруджень АЕС; – реалізація заходів з удосконалення нормативно-правової бази з ядерної та радіаційної безпеки; – реалізація заходів з удосконалення системи аварійної готовності та реагування.

Активність і залишкове енерговиділення ядерного палива визначають як можливий перебіг аварійних сценаріїв і можливі радіаційні наслідки аварій на ядерних установках.

Активність і залишкове енерговиділення ядерного палива на момент зупинки ядерного реактора на чергове перевантаження визначаються такими показниками, як вигорання ядерного палива в окремих ТВЗ, а також графіком навантаження ТВЗ, особливо за останній рік експлуатації. У наукових дослідженнях з оцінки зміни активності й залишкового енерговиділення ВЯП як параметра, який характеризує ВЯП, використовують значення вигорання палива ( $\text{МВт} \cdot \text{д/кгU}$ ) або питомого енерговиділення ( $\text{МВт} \cdot \text{д/кгU}$ ). Для ВВЕР–1000 встановлено, що для режимів опромінення ядерного палива протягом 1, 2 і 3 паливних кампаній становить питомій потужності  $\sim 44 \text{ МВт} / \text{тU}$ , тривалості кожної паливної кампанії  $\sim 306$  діб, зупинка на перевантаження палива рівна  $\sim 48$  діб, а сумарне вигорання становить  $40,48 \text{ ГВт} \cdot \text{д} / \text{тU}$ . Зазвичай потужність ТВЗ в останній рік експлуатації в 1,5–2 рази менше, ніж на перших паливних завантаженнях.

Розрахунок вигорання ядерного палива в модулі TRITON складається з трьох частин: розрахунок перерізів (CENTRM / PMC або NITAWL), розрахунок перенесення нейтронів (NEWT або KENO) і розрахунок вигорання (COUPLE / ORIGENS). ORIGENS моделює вигорання палива: передбачає на задані моменти часу концентрації нуклідів, джерела нейтронів та гамма-квантів, активність, залишкове енерговиділення. OPUS – утиліта, що дає можливість вивести дані з вихідних файлів ORIGENS, а також дозволяє вивести результат у вигляді залежності певної величини від часу та створює на основі цього таблицю результатів.

На Рис. 1 а представлено зміну протягом 200 діб, а на Рис. 1 в представлено зміну протягом 30 років питомої активності ядерного палива ВВЕР–1000, яке знаходиться в активній зоні на момент завершення паливної кампанії (для режимів S, Q) і з різних причин не може бути вивантажено в БВ, або у випадку аварійного вивантаження ядерного палива в БВ. На Рис. 1 б представлено зміну протягом 200 діб. На Рис. 1а-в також представлено значення (права вісь) відношення активності палива в режимі S (маркер кружечок) до активності палива в режимі Q (маркер трикутник).

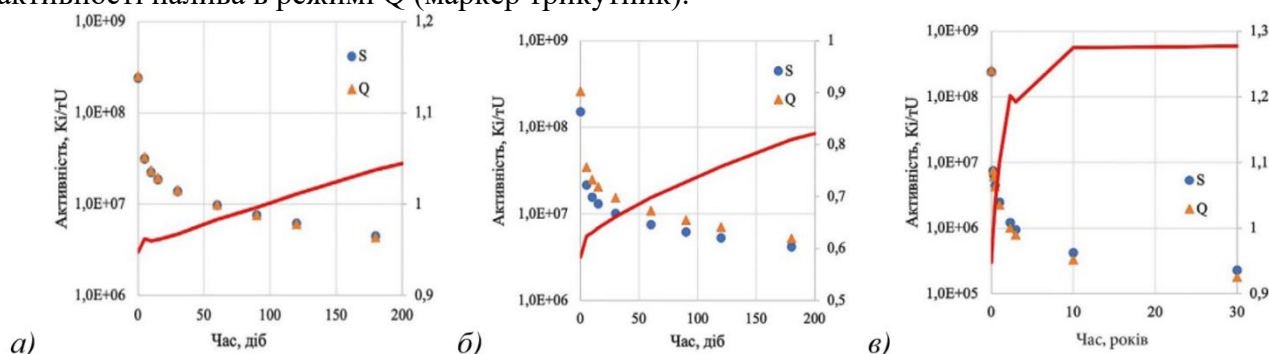


Рисунок 1 - Активність ядерного палива в активній зоні ВВЕР–1000 після зупину протягом 200 діб – а), активність ВЯП ВВЕР–1000 після зупину протягом 200 діб – б) та активність ядерного палива в активній зоні ВВЕР–1000 після зупину протягом 30 років – в

Проведений аналіз результатів моделювання демонструє, що за однакового вигорання питома активність: на кінець паливної кампанії ТВЗ–2 майже у 2 рази більша, ніж у ТВЗ–1; на 50-ту добу більше у 1,5 рази; через 1 рік більше у 1,15 рази; на сьомий рік більше тільки на  $\sim 1\%$ . Тільки з 8–10 року зберігання ВЯП активності і залишкові енерговиділення ТВЗ з однаковим вигоранням –  $10,7 \text{ ГВт} \cdot \text{д} / \text{тU}$ , але різним графіком навантаження під час експлуатації можна вважати однаковими. Тому під час проведення аналізу можливих радіаційних наслідків аварії на Запорізькій АЕС необхідно враховувати режим навантаження енергоблоків Запорізької АЕС, що перебували в експлуатації перед зупинкою їх у вересні 2022 р.

**Висновки.** Результати моделювання показують, що питома активність, а відповідно й загальна активність ядерного палива в активній зоні ВВЕР–1000, після  $\sim 1$  року вимушеного простою енергоблоків Запорізької АЕС, зменшилася в  $\sim 100$  разів. Тому можливі радіаційні наслідки в разі пошкодження ядерного палива, що знаходиться в

активних зонах або вивантажено в басейни витримки, будуть значно меншими, ніж у разі аварії на працюючому реакторі.

**Перелік посилань:**

1. Борисенко В. І. Активність і залишкове енерговиділення ядерного палива під час експлуатації і зберігання. Ядерна енергетика та довкілля. № 2 (27) 2023. С. 3–9.

2. Юров М. С., Горанчук В. В. Активність і залишкове енерговиділення ядерного палива ВВЕР – 1000 під час експлуатації і зберігання. Збірник тез IV Міжнародної конференції «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику» (28–29 вересня 2023 року, м. Київ). [електронне джерело]. Київ. 2023. С. 28–30.

<sup>1</sup> Магістрант 2 курсу Корчун В.В.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Коньшин В.І.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=UgfWon8AAAAJ&hl=en>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО АЛГОРИТМУ УПРАВЛІННЯ АВАРІЄЮ "ТЕЧА З ПЕРШОГО КОНТУРУ В ДРУГИЙ" НА РЕАКТОРНІЙ УСТАНОВЦІ З РЕАКТОРОМ ВВЕР-10

**Постановка проблеми та її актуальність.** Згідно проектних основ, підтверджених результатами експлуатації реакторної установки (РУ) з реакторами типу ВВЕР, причинами виникнення течі з першого контуру до другого можуть бути розуцільнення кришки колектора парогенератора або розрив теплообмінних трубок. Основна проблема полягає в тому, що під час течі із першого контуру в другий існує дефіцит безпеки, зумовлений високою ймовірністю викиду радіоактивного теплоносія першого контуру в атмосферу через пароскидні пристрої аварійного парогенератора (ПСП АПГ).

Специфікою управління аварією з течею теплоносія з першого контуру в другий є необхідність виконання комплексних взаємопов'язаних між собою дій в умовах обмеженого часу. Відповідно до існуючої експлуатаційної документації з управління аваріями (ІЛА) для ВВЕР-1000/В-320 ці дії мають бути виконані оперативним персоналом, однак, враховуючи стрімкість розвитку аварійного процесу та малий резерв часу, надійність успішного виконання таких дій є неприйнятно низькою [1].

**Формулювання мети.** Обґрунтувати можливість застосування автоматизованого алгоритму управління аварією «Теча теплоносія з першого контуру в другий» на реакторній установці з реактором ВВЕР-1000.

**Основна частина.** Під час міжконтурної течі теплоносія з першого контуру надходить у другий контур АПГ, а далі по паропроводах у вигляді пари надходить до турбіни. При цьому тиск у першому контурі знижується. Поведінка основних параметрів реакторної установки та робота обладнання залежать від еквівалентного діаметра міжконтурної течі.

При міжконтурній течі з еквівалентним діаметром 30÷100 мм через зниження тиску в першому контурі спрацьовують захисні сигнали - АЗ (при умові «Тиск у першому контурі <math>< 150 \text{ кгс/см}^2 \text{ за потужності } > 75\% N\_{\text{ном}} \text{)>>») та САОЗ (при умові «\Delta T\_{\text{сік}} \leq 10^\circ\text{C}>>»). Це спричиняє введення розчину борної кислоти (РБК) в перший контур через САОЗ ВТ ТQ13(23,33).

Якщо еквівалентний діаметр течі менше 20 мм або є розрив однієї або двох теплообмінних трубок ПГ, зниження тиску в першому контурі частково компенсується роботою трубчатих електронагрівачів компенсатора тиску (ТЕН КТ). Це дозволяє енергоблоку продовжувати працювати на потужності, але збільшується витрата підживлення першого контуру через втрату теплоносія. Це може призвести до зниження рівня у КТ. Якщо рівень у КТ знизиться до певних уставок, спрацюють захисти, включаючи АЗ та відключення ТЕН КТ. Це може викликати спрацювання інших захистів, зокрема САОЗ, що зумовить подачу РБК в перший контур. Збільшення рівня у аварійному ПГ до 620 мм або падіння тиску перед головною паровою засувкою (ГПЗ) до 52 кгс/см<sup>2</sup> спричиняє закриття стопорно-регулюючих клапанів (СРК) турбіни, що призводить до підвищення тиску в головному паровому колекторі (ГПК) та введення в дію швидкодіючої редукаційної установки скидання пари в конденсатор (ШРУ-К) за сигналом з електрогідравлічної системи регулювання (ЕГСР) "Скидання навантаження" зі скиданням теплоносія до технологічного конденсатору.

Робота САОЗ ВТ ТQ13(23,33) у разі течі у ПГ веде до наповнення аварійного ПГ,



паропроводу АПГ та непроектного режиму роботи ШРУ-К з витіканням пароводяної суміші. Це може призвести до відмови ШРУ-К у будь-якому з положень – відкритому, закритому чи проміжному. Заповнення системи «перший контур – аварійний ПГ» водою та можлива відмова ШРУ-К можуть викликати викид радіоактивних речовин у навколишнє середовище через спрацювання ПСП АПГ. Щоб уникнути цих негативних наслідків, необхідно вжити своєчасних та ефективних заходів по управлінню аварією.

Застосування автоматизованого алгоритму управління аварією з міжконтурною течєю теплоносія передбачає виконання комплексу дій, спрямованих на локалізацію АПГ та переведення енергоблоку у стабільний безпечний стан без спрацювання ПСП другого контуру або з мінімальною кількістю циклів спрацювання та радіоактивних речовин (РАР) (що викидаються) у разі додаткових відмов обладнання [2].

Алгоритм виконує наступні завдання:

- виключається спрацювання ПСП АПГ та викид радіоактивних речовин у навколишнє середовище;
- забезпечується автоматичне виконання функцій підживлення та борування першого контуру, виключається пошкодження активної зони реактора;
- забезпечується "умовна" стабілізація стану енергоблоку тобто, забезпечується автоматичне переведення енергоблоку у стан зі зниженими параметрами 1-го та 2-го контурів та локалізація міжконтурної течі в межах АПГ, включаючи створення умов для запобігання спрацювання ПСП АПГ;
- забезпечується стійкість до відмови алгоритму при накладенні додаткових вихідних подій аварії (ВПА) або при відмові елементів алгоритму;
- забезпечуються прийнятні наслідки перехідного процесу у разі «помилкового» спрацювання алгоритму.

**Висновки.** Загалом у результаті роботи алгоритму з управління аварією виключається необхідність виконання критичних дій оперативним персоналом на етапі переведення енергоблоку у стабільний стан. Автоматичним алгоритмом дій забезпечується стабілізація аварійного процесу та створюється достатній запас часу для організації оперативним персоналом відповідних заходів з подальшого розхолодження РУ та переведення в режим «зупин для ремонту». Дані дії персоналу з переведення РУ із досягнутого стабільного стану в режим «зупин для ремонту» мають бути передбачені в ІЛА, скоригованих з урахуванням впровадження алгоритм.

#### **Перелік посилань:**

1. Комплексна (зведена) програма підвищення рівня безпеки енергоблоків АЕС України. Розділ 2. Перелік заходів для енергоблоків ВВЕР-1000/В-320. Захід 12401 «Розробка і реалізація організаційно-технічних заходів з управління аварією: теча теплоносія з 1-го контуру в 2-ий еквівалентним перетином Ду 100».

2. Хмельницькая АЭС. Энергоблок № 1. Разработка документации по аналитическому обоснованию внедрения технологического алгоритма автоматизированного управления аварией «течь теплоносителя из 1-го контура во 2-й». Этап 2. Технический отчет. 02/2017/2-124-11-17-06667.200.ОД.1. 2018.

<sup>1</sup> Магістрант 2 курсу Федотов В.В.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Клевцов С.В.

[https://scholar.google.com.ua/citations?user=NAul3\\_MAAAAJ&hl=ru](https://scholar.google.com.ua/citations?user=NAul3_MAAAAJ&hl=ru)

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ПЕРСОНАЛУ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Аналіз надійності персоналу (АНП) відіграє важливу роль в оцінці та зменшенні ризику, пов'язаного з людськими помилками при експлуатації атомних електростанцій (АЕС). Представлено огляд методології, джерел даних і методів аналізу надійності персоналу, що застосовуються для оцінки ефективності дій персоналу при аваріях на АЕС. Висвітлюються проблеми, пов'язані з дефіцитом даних і поширенням невизначеності в АНП, а також обговорюються різні підходи для оцінки ймовірності людських помилок. Крім того, досліджується важливість інженерії людського фактору для підвищення безпеки АЕС.

Атомні електростанції (АЕС) є складними соціально-технічними системами, де людський фактор відіграє вирішальну роль у забезпеченні безпечної та ефективної експлуатації. Людські помилки можуть мати серйозні наслідки, включаючи пошкодження активної зони, радіоактивні викиди і забруднення навколишнього середовища. Таким чином, АНП є важливим компонентом імовірнісного аналізу безпеки (ІАБ) для АЕС, забезпечуючи систематичний підхід до виявлення, оцінки та кількісного визначення імовірності людських помилок, які можуть призвести до аварій або виникнути при управлінні аваріями [1 - 3].

Необхідно зазначити що дослідження людського фактору є одним із основних організаційно-технічних принципів забезпечення безпеки згідно Загальних положень безпеки АЕС України НП 306.2.141-2008 [4].

### **Фактори, що впливають на надійність людини**

На надійність людини при експлуатації АЕС впливає безліч факторів, які в сукупності відомі як фактори, що формують продуктивність (ФФП). Ці фактори можна розділити на внутрішні ФФП, такі як вік, досвід і підготовка, і зовнішні ФФП, включаючи робоче середовище, постановку завдань і організаційну культуру.

Визначається кілька ФФП [5], які мають найбільший вплив на надійність людини, зокрема увага, пам'ять, сприйняття, прийняття рішень, комунікація та стрес. Оцінка цих ФФП за допомогою таких методів, як анкетування, інтерв'ю, спостереження та моделювання, може дати уявлення про потенційні проблеми людської діяльності та спрямувати розробку стратегій пом'якшення наслідків.

### **Оцінка імовірності помилки персоналу**

Центральним аспектом АНП є кількісна оцінка імовірності помилки персоналу (ІПП) для різних завдань і дій, що виконуються персоналом АЕС. Для оцінки ІПП в ІАБ використовується декілька методів, включаючи метод прогнозування ймовірності людських помилок (THERP), метод когнітивної надійності та аналізу помилок (CREAM), а також метод оцінки та зменшення людських помилок (HEART) [5].

Однією з важливих проблем в оцінці ІПП є нестача фактичних даних про людський фактор на АЕС. Аналітики часто покладаються на дані, екстрапольовані з таких джерел, як динамічні симулятори, промислові процеси або робочі ситуації в інших галузях, а також військові сценарії, які психологічно подібні до завдань на АЕС. Експерименти і польові дослідження з використанням реальних завдань, що представляють інтерес, також можуть сприяти оцінці ІПП хоча і з потенційними обмеженнями в узагальненні.

### **Поширення невизначеності в АНП**

Результати АНП за своєю суттю є невизначеними через варіативність людської діяльності, брак даних та обмеження моделювання. Поширення цих невизначеностей має вирішальне значення для отримання надійних оцінок ризиків та процесів прийняття рішень.

Існують різні методи поширення невизначеності в АНП, включаючи моделювання, згортку, метод моментів і призначення меж невизначеності для загального терміну відмови дерева подій АНП. Вибір методу залежить від таких факторів, як наявність даних, складність дерева подій АНП і бажаний рівень консерватизму.

### **Процедури прийняття рішень для оцінки ІПП**

За відсутності емпіричних даних, експертна оцінка відіграє важливу роль в оцінці психо-фізичного стану людини. Для отримання надійних оцінок від експертів були розроблені різні процедури оцінювання, включаючи попарні порівняння, ранжування, числове оцінювання та непряме числове оцінювання.

Вибір відповідної процедури оцінювання залежить від таких факторів, як необхідна точність, наявні ресурси та характер подій, що оцінюються. Парні порівняння та ранжування/рейтинг, як правило, вважаються найбільш точними та надійними процедурами, але можуть бути ресурсомісткими, тоді як процедури числового оцінювання менш точні, але більш практичні в умовах обмежених ресурсів.

### **Інженерія людського фактору**

У той час як АНП фокусується на кількісній оцінці людських помилок, інженерія людського фактору (ІЛФ) спрямована на розробку систем і середовищ, які відповідають людським можливостям і обмеженням, тим самим знижуючи ймовірність помилок і підвищуючи загальну надійність систем.

Посібник з АНП підкреслює важливість ІЛФ і надає рекомендації щодо оцінки проєктних особливостей і методів експлуатації з точки зору людського фактору. Впроваджуючи принципи ІЛФ у проєктування та експлуатацію систем, АЕС можуть вирішувати потенційні проблеми, пов'язані з людським фактором, і підвищувати безпеку [5][6].

### **Внесок помилок персоналу у розвиток аварії**

В рамках роботи було розглянуто ІАБ однієї з АЕС України. Було виявлено значних внесок у частоту виникнення аварій помилок персоналу. Так, значний внесок у частоту аварії «середня течія з першого контуру у другий» вносять протікання аварії із помилками персоналу (більше 48% від усіх аварійних послідовностей). Основними помилками дій персоналу (ДП) є: ДП по включенню системи підживлення-продувки та організації розхолодження, ДП по відводу тепла через другий контур у режимі розхолодження, та ДП по заповненню бака приямку.

### **Висновок**

Аналіз надійності персоналу відіграє важливу роль в оцінці та зменшенні ризику, пов'язаного з помилками персоналу при експлуатації атомних електростанцій і аваріях. Використовуючи ряд методологій, джерел даних і методів, АНП дає змогу всебічно оцінити ефективність роботи людини та її вплив на надійність і безпеку АЕС.

Незважаючи на проблеми, пов'язані з дефіцитом даних і поширенням невизначеності, АНП надає цінну інформацію та кількісні оцінки, які можуть бути використані в процесах прийняття рішень, пов'язаних з модифікацією проєкту, експлуатаційними процедурами, аналізом безпеки та дотриманням нормативних вимог.

Крім того, інтеграція АНП з принципами інженерії людського фактору пропонує цілісний підхід до вирішення проблем, пов'язаних з людським фактором, сприяючи розвитку культури безперервного вдосконалення і підвищенню загальної безпеки та ефективності експлуатації атомних електростанцій.

Було проаналізовано та визначено значимий внесок помилок персоналу у розвиток проєктних аварій на АЕС.

**Перелік посилань:**

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-3, IAEA, Vienna (2010).
2. Probabilistic Risk Assessment (PRA). NRC Web. URL: <https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/risk-informed/pr.html> (дата звернення: 14.03.2024).
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of Nuclear Power Plants: Design, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2016).
4. Про затвердження Загальних положень безпеки атомних станцій: наказ Державного комітету ядерного регулювання України від 21.10.2011р. №162. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-08#Text>.
5. Swain A. D., Guttman H. E. Handbook of human-reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications. Final report. United States : Sandia National Lab. (SNL-NM), 1983. 728 с. URL: <https://doi.org/10.2172/5752058> (дата звернення: 14.03.2024).
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Human Factors Engineering in the Design of Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-51, IAEA, Vienna (2019)

<sup>1</sup> Магістрант 2 курсу Шахнюк Е.В.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Філатов В.І.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ КПРВ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ТА ПІДГОТОВКИ ДО ПОХОВАННЯ РАВ УТВОРЕНИХ ПРИ ЗНЯТТІ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ АЕС

**Постановка проблеми та її актуальність.** Виведення з експлуатації атомних електростанцій (АЕС) викликає значний інтерес у суспільстві та науково-технічній громадськості через пов'язані з цим ризики для здоров'я людей та навколишнього середовища. Це завдання вимагає комплексного підходу, що охоплює технічні, економічні, соціальні та екологічні аспекти.

**Формулювання мети.** Розгляд важливості процесу виведення з експлуатації атомних електростанцій. Розглянути технічні аспекти виведення АЕС з експлуатації, а саме проаналізувати можливості застосування існуючого обладнання та технологій для ефективного проведення процесу демонтажу. Також у доповіді буде розглянуто перспективи подальшого вдосконалення та модернізації комплексів по переробці радіоактивних відходів з метою зменшення їх обсягу та забезпечення безпечного зберігання.

**Основна частина.** Вирішення питання про виведення з експлуатації АЕС вимагає комплексного підходу, який враховує технічні, економічні, соціальні та екологічні аспекти. Складність виведення з експлуатації АЕС відображається у необхідності проведення комплексу процесів демонтажу енергоблоків. Ці процеси включають в себе розбирання та видалення радіоактивних матеріалів, розміщених у реакторному відділенні, а також розбирання та утилізацію реакторного устаткування. При цьому важливо забезпечити безпеку працівників, мінімізувати викиди радіоактивних речовин у навколишнє середовище та виконати вимоги збереження ядерної безпеки на всіх етапах демонтажу. Такий підхід дозволить ефективно управляти радіаційними ризиками та забезпечити безпечне завершення життєвого циклу АЕС.

Для організації ефективного та безпечного процесу зняття необхідно завчасно провести підготовку до зняття з експлуатації АЕС. Саме ця підготовка основа успішного та безпечного закриття станції. Процес підготовки включає у себе накопичення коштів, розробку концепції та проєкту а також здійснення підготовчих заходів.

Однією із складових таких підготовчих заходів є аналіз можливості застосування різного уже існуючого на АЕС обладнання з метою спростити та здешевити процес демонтажу енергоблоку. Пункт 2 розділу 2 НП 306.2.230-2020 [1] вказує на необхідність враховувати в процесі зняття з експлуатації ядерних установок (ЯУ) наявність інших ЯУ та/або об'єктів призначених для поводження з радіоактивними відходами (РАВ).

У якості прикладу існуючих систем, які можна застосувати для зняття з експлуатації, можна навести комплекс по переробці радіоактивних відходів (КПРВ). Метою створення КПРВ зменшення об'єму уже існуючих РАВ і РАВ що утворюються в процесі експлуатації енергоблоків, а також кондиціонування РАВ для забезпечення безпечного тимчасового та довгострокового зберігання з подальшим транспортуванням до місця поховання [2]. Дані комплекси були побудовані на Запорізькій АЕС та на Рівненській АЕС для перевірки ефективності запропонованих рішень. Після успішного запуску комплексу в експлуатацію було прийнято рішення про проєктування та будівництво подібного комплексу на Хмельницькій АЕС.

КПРВ складається з наступних установок:

- установка вилучення;
- установка фрагментації і сортування відходів;
- установка спалення (на органічному паливі);
- установка пресування (суперкомпактор);
- установка цементування;
- установка виміру активності;
- установка дезактивації металу та обладнання.

Проектна потужність [3] даного комплексу становить:

- тверді РАВ – 750 м<sup>3</sup>/рік;
- відпрацьовані мастила – 40 м<sup>3</sup>/рік.

Перелік установок наведених вище здатний провести повноцінну переробку відходів що будуть утворюватися під час демонтажу АЕС. Однак, виникає питання до ефективності та продуктивності даного комплексу. Наприклад, під час демонтажу обладнання АЕС не буде використовуватися установка вилучення через те, що дана установка призначена для вилучення РАВ, які зберігаються в комірках/відсіках сховища твердих радіоактивних відходів (ХТРВ). ХТРВ призначений для тимчасового зберігання відходів, які утворюються під час експлуатації АЕС і буде пустим, якщо враховувати застосування періоду витримки у 30 років [4], перед безпосереднім початком демонтажних робіт.

Окрім цього виникає питання до співставлення навантаження на різні установки. Значна частина твердих радіоактивних відходів (ТРВ) що утворюватиметься під час демонтажу обладнання будуть металевими. Продуктивність установки фрагментації і сортування складає близько 4,5 м<sup>3</sup> за день, тоді як продуктивність установки дезактивації металу та обладнання становить до 200 м<sup>3</sup>/год. Враховуючи значну відмінність між продуктивністю окремих елементів системи постає питання можливості модернізації окремих установок, або будівництва додаткових установок які допоможуть пришвидшити процес. Можливість будівництва нових об'єктів для поводження з РАВ передбачена в пункті 3 розділу 2 НП 306.2.230-2020 [1]. Більш детально питання можливості та доцільності даних модернізацій КПРВ буде розглянуто в магістерській дисертації.

#### **Перелік посилань:**

1. НП 306.2.230-2020. Загальні положення безпеки зняття з експлуатації ядерних установок. Наказ Державної інспекції ядерного регулювання від 28.10.2020 № 440.
2. Пояснювальна записка до проекту розпорядження Кабінету Міністрів України «Про затвердження проекту "Будівництво комплексу по переробці радіоактивних відходів Рівненської АЕС"»: Наказ міністра енергетики та вугільної промисловості України від 23.10.2013 р.
3. Про затвердження проекту "Будівництво комплексу по переробці радіоактивних відходів Рівненської АЕС": Розпорядж. Каб. Міністрів України від 07.11.2013 р. № 935-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/935-2013-r#Text> (дата звернення: 12.03.2024).
4. Концепція зняття з експлуатації діючих атомних електростанцій України. Наказ Міністерства палива та енергетики України від 12.05.2004 № 249.

<sup>1</sup> Бакалаврант 4 курсу Остаповець М.О.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Шевель Є.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=zNMzfwAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## **КВАЛІФІКАЦІЯ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЯДЕРНИХ УСТАНОВОК ІЗ РЕАКТОРАМИ ВВЕР-1000**

**Постановка проблеми та її актуальність.** Актуальність безпеки ядерних установок з реакторами типу ВВЕР-1000 є критичною з точки зору створення безпечних умов експлуатації цих об'єктів в екстремальних умовах. Ця проблема підкреслюється низкою подій, таких як аварія на Чорнобильській АЕС, аварія на Фукусімській АЕС, а також інші інциденти та аварії, що сталися на ядерних установках в різних країнах світу [1]. Аналіз цих подій підкреслив важливість постійного вдосконалення систем безпеки, для створення найвищого рівня захисту АЕС в екстремальних умовах експлуатації. Особливу актуальність має дана тема сьогодні, в умовах війни, адже ведення бойових дій поблизу майданчиків АЕС несе надзвичайну загрозу безпеці самій АЕС, навколишньому середовищу та людству в цілому. Підтвердженням цього є окупація Запорізької АЕС і численні порушення у її роботі протягом війни.

**Аналіз останніх досліджень.** Цей напрямок досліджень полягає в розробці та вдосконаленні методів аналізу ризиків для оцінки можливих загроз та визначення найефективніших заходів забезпечення безпеки. Цей напрямок включає в себе аналіз потенційних сценаріїв аварій, розробку моделей взаємодії систем та процесів у разі кризових ситуацій, а також вдосконалення методів оцінки і управління ризиками.

**Формулювання мети.** Мета роботи полягає у вдосконаленні систем безпеки ядерних установок з реакторами типу ВВЕР-1000 з метою забезпечення їхньої надійності та стійкості в екстремальних умовах експлуатації, зокрема в умовах війни.

**Основна частина.** У сучасних екстремальних умовах експлуатації українських атомних електростанцій (особливо Запорізької АЕС) внаслідок зовнішніх військових дій сталися десятки аварійних зупинок енергоблоків через повне або часткове зовнішнє знеструмлення. Повне тривале знеструмлення атомних енергоблоків стало однією з основних причин ядерних (важких) та радіаційних аварій із катастрофічними екологічними наслідками на АЕС Фукусіма-1 у 2011 р [2]. Проведений раніше детерміністичний аналіз аналогічної аварії з повним тривалим знеструмленням енергоблоків з реакторами ВВЕР-1000 встановив неминучість виникнення ядерної аварії за умов перевищення гранично допустимої температури оболонок тепловиділяючих елементів ядерного палива. Таким чином, актуальною є модернізація стратегій та систем управління аваріями з повним тривалим знеструмленням енергоблоків із ВВЕР.

Перспективним підходом підвищення ефективності управління аваріями з повним тривалим знеструмленням ядерних енергоустановок є застосування аварійного живильного насоса (АЖН) з пароприводом від парогенератора. Необхідною умовою впровадження такого підходу є кваліфікація цього насосу на надійність та працездатність при аваріях з повним знеструмленням.

На основі розробленої консервативної теплогідродинамічної моделі «реактор – парогенератор – аварійний живильний насос з пароприводом» визначено конструкційно-технічні вимоги до системи АЖН, що відповідають встановленим критеріям та умовам кваліфікації. Встановлено, що ефективна працездатність АЖН обґрунтована при тиску пари парогенератора більше 0,3 МПа. При менших тисках можуть бути застосовані системи пасивного відведення тепла природною циркуляцією. Отримані результати можуть бути

використані при модернізації стратегій та систем управління аваріями з повним тривалим знеструмленням атомних енергоблоків, а також пропонується декілька варіантів схем забезпечення подачі води АЖН у парогенератор для забезпечення відводу тепла від активної зони реактора в екстремальних умовах повної або часткової втрати живлення, варіанти заживлення аварійного живильного насоса та встановлення додаткових баків хімічної знесоленої води для створення необхідного запасу води, для забезпечення відведення тепла від активної зони реактора.

**Висновки.** Згідно з представленою інформацією, експлуатація українських атомних електростанцій, зокрема Запорізької АЕС, стикається з ризиком аварійних зупинок унаслідок військових дій. Повне тривале знеструмлення енергоблоків може спричинити ядерні аварії з катастрофічними наслідками, подібні до аварії на АЕС Фукусіма-1 у 2011 році. Модернізація стратегій та систем управління аваріями стає актуальною, і перспективним рішенням є застосування АЖН від парогенератора. Розроблена модель визначила конструкційно-технічні вимоги до цієї системи, вказуючи на необхідність тиску пари більше 0,3 МПа для забезпечення ефективної працездатності насоса.

Ці результати можуть служити основою для подальшої модернізації обладнання та врахування документації дій персоналу за даними схемами, у разі проведення модернізацій на атомних енергоблоках з урахуванням можливих ризиків та викликів

**Перелік посилань:**

1. Кондратюк В.А. Підвищення безпеки ядерної енергетики з урахуванням уроків важких аварій / В.А. Кондратюк, Є.М. Письменний, О.М. Верінов, В.І.Філатов, А.І.Остапенко // Ядерна та радіаційна безпека. - 2022. - № 3. - С. 76 - 81.
2. Кондратюк В.А. Уроки аварії на АЕС Fukushima-Daiichi для безпеки ядерної енергетики України / В.А. Кондратюк, Є.М. Письменний, А.І. Остапенко, Д.О. Федоров // Енергетика: економіка, технології, екологія. - 2022. - № 3. - С. 107 - 114.



<sup>1</sup> Бакалаврант 4 курсу Топал А.О.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Лебедь Н.Л.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=MepННW4AAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВИРОБНИЦТВО ВОДНЮ З ВИКОРИСТАННЯМ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Для побудови стійкого та надійного майбутнього важливо запобігти зміні клімату.

Основною причиною зміни клімату є здатність вуглецю поглинати та випускати інфрачервоне випромінювання, яке затримує тепло. Але вуглекислий газ є важливою частиною циклу життя, без нього рослини не будуть розвиватися, що порушить біологічний харчовий ланцюг. Також перехід до низьковуглецевої економіки має запобігти глобальному потеплінню. При спалюванні водню отримується чиста вода та енергія. Існує кілька способів його виробництва, але деякі з них є не екологічними.

Міжнародне агентство з атомної енергії визначає шість методів, за допомогою яких атомна енергія може бути використана для виробництва водню: ядерний риформінг природного газу; атомна газифікація вугілля; термохімічне перетворення біомаси за допомогою ядерного обладнання; термохімічне розщеплення води; низькотемпературний електроліз (LTE); високотемпературний паровий електроліз (VTCE) [1].

У перших трьох методах використовується тепло, яке виробляється атомною енергією (переважно у формі пари), щоб зменшити потребу в теплі, яке вироблене викопним паливом, що необхідне для виробництва водню.

Існує сучасна технологія: електроліз на основі полімерного електроліту (PEM), яку іноді називають електролізом на протонообмінній мембрані. Електроліз PEM використовує електролізер. Де тверда полімерна електролітна мембрана використовується як роздільник між двома електродами замість лужного розчину електроліту. PEM — це тонка протонопровідна мембрана, виготовлена зі спеціального типу полімеру, часто на основі перфторсульфонової кислоти. Ця мембрана пропускає через себе лише протони  $H^+$ , блокуючи проходження інших іонів і електронів. На анодну сторону електролізера подається вода, а на електроди подається зовнішній електричний струм. Електрична енергія ініціює реакції на аноді та катоді. Коли вода дисоціює на аноді, утворюються протони  $H^+$ , які проходять через PEM до катодної сторони електролізера. Електрони, що утворюються під час реакції, не можуть пройти через PEM і повинні проходити через зовнішній контур, щоб досягти катода. На стороні катода протони поєднуються з електронами із зовнішнього контуру, утворюючи газоподібний водень. Тим часом на аноді утворюється кисень. PEM ефективно відокремлює водень і кисень, запобігаючи їх змішуванню в електролізері. Для підвищення чистоти отриманого водню можуть бути виконані додаткові етапи очищення. Така конструкція мембрани дозволяє виробляти водень при тиску до 20 МПа (таким чином уникаючи або зменшуючи енергоємне стиснення газу).

Для паливних елементів і певних промислових процесів потрібен водень високої чистоти, який отримується при використанні описаної вище технології. Електролізери PEM використовують високу густину струму, що дозволяє їм адаптуватися до змін потужності, які можуть бути спричинені використанням тісно пов'язаними гібридними системами атомної та відновлюваної енергії. Процес електролізу PEM має такі переваги, як швидкий час відгуку, вища ефективність і компактний дизайн, що робить його придатним для застосувань, які вимагають виробництва водню на вимогу та портативності.

Оскільки єдиним джерелом енергії для систем LTE є електрика, електрика є точкою інтеграції. У тісно пов'язаній ядерно-відновлюваній ГЕС електроенергія може вироблятися або з відновлюваної, або з ядерної енергії, або з обох одночасно. PEM-електроліз можуть

забезпечувати гнучкість і резерви на випадок непередбачених ситуацій. Електролізери PEM також можуть забезпечувати контроль частоти та регулювання напруги завдяки своїй здатності дуже швидко реагувати на зміни. Крім того, електролізери PEM можна швидко повністю вимкнути та швидко запуснути; таким чином, вони не потребують постійного джерела електроенергії. Крім того, оскільки електролізери є модульними, виробничий процес можна масштабувати. Таке масштабування малоімовірно для термохімічних процесів [1].

Атомні електростанції, серед варіантів виробництва енергії, мають вищу теплову ефективність і менший негативний вплив на навколишнє середовище. Існує кілька основних переваг когенерації з атомними електростанціями: менші викиди парникових газів, атомні електростанції вимагають мало місця порівняно з тепловими та газотурбінними електростанціями тієї ж потужності.

Незважаючи на те, що когенераційні системи на основі ядерної енергії мають ряд переваг: атомні станції дорожчі в будівництві та обслуговуванні, ніж ТЕС; відходи є шкідливими і потребують ретельного та безпечного зберігання протягом тривалого часу; оскільки паливо радіоактивне, конструкція реактора і потребує кількох рівнів захисту [2].

Технічно, будь-який тип реактора можна використовувати для певної форми когенерації, якщо він виробляє електроенергію та технологічне тепло. Основними критеріями для визначення того, який тип реактора більше підходить для різних виробничих процесів, є: теплоносій реактора та його максимальна температура.

Атомна енергетика є основною технологією для виробництва електроенергії в Україні (за статистикою 2022 року, доля виробленої електроенергії складає близько 60%). Україна також має науковий потенціал для впровадження водневих технологій. За останнє десятиліття над створенням новітніх матеріалів і технологій для потреб водневої енергетики працював ряд наукових установ НАН України.

Європейський Союз має план декарбонізувати економіку до 2050 року. Виробництво водню є одним із запропонованих рішень. На даний момент більшість виробленого водню базується на викопному паливі, але комерційне виробництво водню з низьким вмістом вуглецю на атомних електростанціях може вирішити цю конкретну проблему. На думку наших зарубіжних партнерів в енергетиці, Україна є найкращою країною в Європі для започаткування виробництва водню. Оскільки вона здатна здійснити фундаментальну трансформацію європейського енергетичного сектору та здійснити перехід до зеленої енергетики. Оскільки є місцевий попит і достатньо місця для зберігання водню та палива на основі водню.

Навіть повномасштабне вторгнення російської федерації не відмінє наш розвиток в енергетичному секторі. Наприклад, навесні 2023 року на майданчику Хмельницької АЕС відбулася зустріч з фахівцями галузі та представниками «Framatome» (французький атомний реакторний бізнес). Основною темою обговорення стала можливість виробництва низьковуглецевого водню на промисловому рівні поблизу існуючих АЕС. «Framatome» представив європейський дослідницький проект, присвячений виробництву водню з атомної енергетики під назвою NPHuCo, який планує оцінити доцільність виробництва водню за допомогою існуючої атомної електростанції та розрахувати вартість такого проекту. Крім того, будуть розглянуті потенційні місця для пілотного проекту [3].

Водень є чистим і універсальним енергоносієм, який відіграє вирішальну роль у переході до низьковуглецевого та екологічно відповідального майбутнього. Існують різні способи отримання водню, і більшість з них передбачає його виробництво у великих масштабах. Представлені результати присвячені опису систем, які можуть отримувати водень, використовуючи електроенергію, вироблену на АЕС. Інтегруючи атомну енергетику з виробництвом водню, ми можемо створити надійну та стійку енергетичну систему, здатну задовольнити постійно зростаючий глобальний попит на енергію, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище.

**Перелік посилань:**

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-1.24, IAEA, Vienna (2022)
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Opportunities for Cogeneration with Nuclear Energy, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-4.1, IAEA, Vienna (2017)
3. Міністерство енергетики України, Стратегія майбутнього: Україна - це енергетичний хаб, який допоможе Європі позбутися залежності від росії, 2023  
<https://www.kmu.gov.ua/news/strategiia-maibutnoho-ukraina-tse-enerhetychnyi-khab-iakyi-dopomozhe-ievropi-pozbutysia-zalezhnosti-vid-rosii>

СЕКЦІЯ №2

**Ядерна захищеність  
та  
нерозповсюдження**

<sup>1</sup> Аспірант 1 курсу Борзенков В.В.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Бібік Т.В.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ФІЗИЧНА ЯДЕРНА БЕЗПЕКА ПІД ЧАС ЗБРОЙНИХ КОНФЛІКТІВ

### Постановка проблеми та її актуальність.

Вторгнення російських військових в Україну та напади на ядерні установки у 2022 році спричинили нові виклики у сфері ядерної безпеки, захищеності та гарантій для персоналу об'єктів, української влади та світової спільноти.

До цього часу жоден військовий напад не був спрямований на велику, діючу атомну електростанцію зі значними запасами опроміненого ядерного палива. Ці виклики з великою ймовірністю матимуть значний вплив на міжнародний режим фізичної ядерної безпеки в подальшому. Вони вимагатимуть ретельного обговорення конкретних аспектів існуючої системи фізичної ядерної безпеки, пов'язаних з надзвичайними подіями, в тому числі війною.

На сьогодні, в першу чергу, міжнародними рекомендаціями МАГАТЕ не визначено яким чином суб'єкти системи фізичної ядерної безпеки мають відповісти на нові виклики та загрози, спричинені атаками на ядерні об'єкти, які міжнародно-правові інструменти дозволяють попередити такого роду напади та чи слід корегувати світовий режим фізичної ядерної безпеки вже зараз виходячи із нових загроз.

Ці питання потребують врегулювання на рівні МАГАТЕ з метою попередження виникнення кризових ситуацій на ядерних об'єктах в подальшому.

**Аналіз останніх досліджень.** На сьогоднішній день, в контексті визначення загроз для ядерних об'єктів, МАГАТЕ використовує термін «проектна загроза». «Проектна загроза» це документ, який описує потенційну загрозу тобто порушника, проти якого система і заходи фізичної ядерної безпеки, включаючи фізичний захист, мають забезпечувати захист, для того щоб бути ефективними [1].

Експлуатуюча організація має запровадити таку систему фізичної ядерної безпеки, яка б дозволяла захистити ядерний об'єкт для багатьох сценаріїв дій порушника, визначених у «проектній загрозі». Під час надзвичайних подій відповідальність за протидію загрозам ядерним об'єктам, які не передбачені «проектною загрозою», несе держава [2].

Звичайно, очікується, що експлуатуюча організація допомагатиме державі у боротьбі із загрозами державного рівня і обов'язки «оператора» під час надзвичайних подій не припиняться.

Водночас, згідно рекомендацій МАГАТЕ, відповідальність експлуатуючої організації все ж таки лежить в межах «проектної загрози», що позбавляє її легальних інструментів протидії так званим «запроектним загрозам».

**Формулювання мети.** В ситуації, що склалась, очевидно, що існує потреба у напрацюванні підходу до планування дій суб'єктів забезпечення фізичної ядерної безпеки у надзвичайних ситуаціях або у відповідь на загрози фізичній ядерній безпеці, що виходять за межі «проектної загрози». Напрацювання такого підходу потребує запровадження низки припущень.

**Основна частина.** По-перше, потрібно визнати, що надзвичайні події, які мають серйозний вплив на фізичну ядерну безпеку, можуть не містити загроз безпосередньо пов'язаних із нею.

Згідно визначення МАГАТЕ загроза у сфері фізичної ядерної безпеки це особа або група осіб, які мають мотивацію, намір і можливість вчинити злочинні або навмисні несанкціоновані дії по відношенню до ядерного матеріалу, інших радіоактивних матеріалів,

пов'язаних з ними установками або пов'язаною з ними діяльністю, або інші дії, які, за визначенням держави, можуть мати негативний вплив на фізичну ядерну безпеку [1].

По суті, загроза - це порушник, для протидії якому розробляються заходи безпеки [3]. Надзвичайні події, такі як пандемія Covid-19 або великомасштабна природна катастрофа (наприклад, землетрус з подальшим цунамі), мають специфічні наслідки для фізичної ядерної безпеки, але не передбачають наявності порушника у розмінні фізичної ядерної безпеки [4]. Аналогічно під час збройного конфлікту, навіть за відсутності факту нападу на ядерний об'єкт, все одно такі дії можуть мати негативний вплив на фізичну ядерну безпеку. Наприклад, пошкодження національної енергетичної інфраструктури може призвести до знеструмлення окремих елементів системи фізичної ядерної безпеки ядерної установки.

Таким чином, не лише загрози, які визначені у «проектній загрозі», можуть мати негативний вплив на фізичну ядерну безпеку.

По-друге, слід визнати, що не лише збройні конфлікти можуть нести загрозу ядерній безпеці. Крім війни між державами, приклади таких сценаріїв включають розпад держави (тобто краху держави) і широкомасштабні громадянські заворушення. Інциденти, пов'язані з загрозами, що виходять за межі «проектної загрози», слід класифікувати за їхнім масштабом, оскільки масштаб визначатиме залучених учасників і, отже, розподіл відповідальності. Один із варіантів є класифікація інцидентів, які впливають на ядерну безпеку, як міжнародні або національні. Міжнародні інциденти включатимуть, наприклад, міжнародні збройні конфлікти, тобто ворожнечу між двома чи більше державами. Національні інциденти, які впливають на фізичну ядерну безпеку, можуть бути неміжнародними збройними конфліктами, тобто бойовими діями між державою та недержавними збройними групами або лише між недержавними збройними групами, наприклад у сценаріях заворушень або розпаду держави [5].

По-третє, основним завданням режиму фізичної ядерної безпеки під час збройних конфліктів має бути запобігання радіоактивним викидам і недопущення виходу ядерних та інших радіоактивних матеріалів з-під регулюючого контролю. При плануванні заходів із протидії загрозам збройних конфліктів необхідно враховувати різні сценарії. Наприклад, порушник може навмисно спричинити радіоактивний викид на атомній електростанції, тоді як війна може спричинити загальні перебої в ланцюгах постачання або доступності електроенергії на ядерному об'єкті. На етапі планування держава має вирішити, чи повинна експлуатуюча організація нести відповідальність не лише за протидію нападу порушника, а і за забезпечення зменшення впливу інших наслідків ведення військових дій (наприклад, тривалих перебоїв в електропостачанні ззовні).

І на останнє, необхідно створити надійну систему планування та реагування на три основні сценарії, визначені вище: надзвичайні події, що впливають на фізичну ядерну безпеку, але не є загрозами з точки зору фізичного захисту (наприклад, пандемія або стихійне лихо), міжнародні збройні конфлікти і неміжнародні (внутрішньодержавні) збройні конфлікти. Таке планування може існувати певною мірою в деяких країнах, але це не є поширеним явищем.

**Висновки.** У підсумку можна із впевненістю стверджувати, що на сьогодні існує потреба в подальшому уточненні дій всіх суб'єктів фізичної ядерної безпеки держави, у тому числі експлуатуючих організацій під час таких подій. Національний режим фізичної ядерної безпеки повинен передбачати, яким чином експлуатуюча організація має виконувати наступні три функції під час надзвичайних подій: виконувати вимоги до систем фізичного захисту, надавати допомогу державі у протидії загрозам, що виходять за межі «проектних загроз», а також надавати допомогу державі у пом'якшенні наслідків надзвичайних подій. І МАГАТЕ має змогу надавати державам допомогу в розробці відповідних документів.

#### **Перелік посилань:**

1. IAEA, Nuclear Security Series no. 20.

2. IAEA, National Nuclear Security Threat Assessment, Design Basis Threats and Representative Threat Statements: Implementing Guide, IAEA Nuclear Security Series no. 10-G (Rev. 1)

3. IAEA, Glossary

4. E.g. Chapman, G. et al., Nuclear Security in Times of Crisis, Centre for Science and Security Studies (CSSS) Occasional Paper Series (King's College London: London, May 2021)

5. Bartels, R., 'The classification of armed conflicts by international criminal courts and tribunals', International Criminal Law Review, vol. 20, no. 4 (Aug. 2020)

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Гончарук В.Г.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Бібік Т.В.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## КОМПЛЕКС ПРОТИДІЇ БПЛА В СКЛАДІ СИСТЕМИ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ АТОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

**Постановка проблеми та її актуальність.** У Збройних силах України під терміном радіоелектронна боротьба (РЕБ) розуміють [1, 2] сукупність узгоджених за метою, завданнями, місцем і часом одночасних і послідовних дій з радіоелектронного подавлення систем управління військами та зброєю противника і заходів щодо радіоелектронного захисту РЕЗ своїх систем управління, які спрямовані на забезпечення переваги у використанні електромагнітного спектру. Проблема використання БПЛА для злочинних дій стоїть гостро, тож методи боротьби потрібно також розвивати. Повноцінний комплекс РЕБ не можна використовувати на території АЕС тому що невідомі наслідки впливу таких комплексів на безпеку експлуатації атомної станції. Рішенням може бути використання для захисту малопотужних, спрямованих джерел радіо-завад [3].

**Аналіз останніх досліджень.** Для боротьби з БПЛА застосовують великі, потужні та коштовні комплекси РЕБ [4].

Зазвичай такі комплекси випромінюють радіо-заваду у всі сторони рівномірно, що потребує великої потужності для ефективної роботи. В комплекс має входити система відслідковування сигналів котрі випромінює чи отримує БПЛА, це організують окремим коштовним комплексом радіорозвідки.

**Формулювання мети.** Для забезпечення ефективної та безпечної, для експлуатації АЕС електромагнітної завади, необхідно зменшити потужність установки, спрямувати заваду та дослідити вплив на інші системи якими користуються на атомних станціях. За таких умов необхідно розробити структуру такого комплексу який задовольнить вимоги до його експлуатації.

**Основна частина.** БПЛА – Безпілотний Літальний Апарат, дрон, квадрокоптер тощо.

Є кілька сценаріїв керування БПЛА які ефективно можна перервати електромагнітним впливом:

- Оператор БПЛА керує апаратом з пульта управління і отримує відеосигнал з літального апарату, що допомагає корегувати політ.
- Оператор БПЛА програмує польотне завдання і після запуску ніяк не впливає на політ, літального апарату корегує політ користуючись супутниковою мережею для навігації.

Інші сценарії складніші технічно, дорожчі та менш ефективні для виконання злочинних дій, як приклад інерційна система навігації захищена від РЕБ, але вона не дозволить так точно позиціонувати БПЛА в просторі.

Згідно вище викладеним сценаріям, комплекс БПЛА складається з пульта керування, окулярів чи монітору для відображення відео з літального апарату, або літального апарату що обладнаний системою супутникової навігації для виконання польотного завдання без оператора. Отже рішенням проблеми може бути вплив на канали прийому інформації БПЛА або оператора. Простим і ефективним методом є постанова радіо завади в діапазонах які використовують комплекси БПЛА.

Щоб протидіяти потрібно точно знати як саме – тож перед тим як застосувати радіо заваду, потрібно її сформулювати. Щоб правильно сформулювати радіо заваду потрібно знати в якому діапазоні вона буде ефективно протидіяти керуванню БПЛА.



Визначити яку заваду потрібно формувати можливо тільки у випадку якщо ідентифікувати сигнал що випромінює пульт керування, або літальний апарат. Коли літальним апаратом керують з пульта можна перехопити керування, або завадити БПЛА отримати корисний сигнал, що унеможливить керування, в іншому випадку літальний апарат випромінює сигнал для навігації і отримує відгук від мережі супутників, сигнал який випромінює БПЛА також можна зафіксувати [5].

Отже першою складовою комплексу має бути антенний пост з прийомними антенами, точніше кілька антенних постів, об'єднаних в одну мережу центром обробки. Такий антенний пост повинен приймати сигнал в дуже широкому діапазоні частот. Також ці антени ніяк не можуть впливати на роботу інших систем, так як вони пасивні, та тільки приймають сигнал нічого не випромінюючи. Чим більше антен буде в системі - тим точніше можна буде позиціонувати в просторі БПЛА, задіявши метод триангуляції.

Друга складова це керований пристрій формування та підсилення сигналу котрий буде протидіяти БПЛА. Направлена випромінююча антена, або кілька антен, а також поворотна платформа. Поворотна платформа обов'язково обмежується фізично в свободі рухів, так щоб випромінювач було не можливо повернути в сторону території атомної станції, залишивши можливість випромінення тільки назовні.

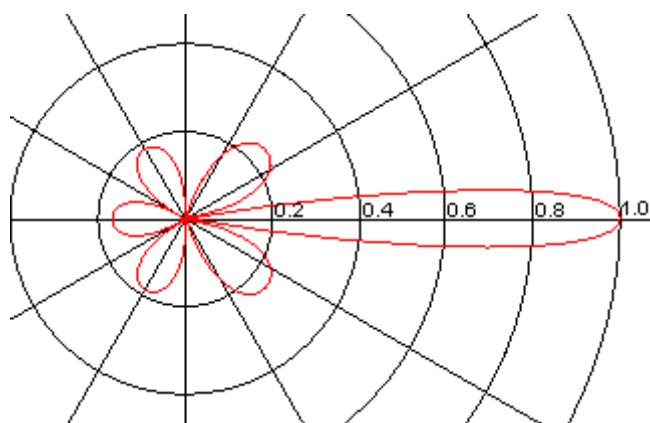


Рисунок 1 - Діаграма випромінювання направленої антени.

Третя складова це система керування комплексом РЕБ. Потрібно максимально автоматизувати роботу комплексу, для швидкої ідентифікації БПЛА, побудови перешкоди та направлення її на БПЛА або на оператора. Найефективнішим методом боротьби є перехоплення керування дроном, але це можливо тільки в окремих випадках, наприклад якщо це БПЛА FPV на базі відкритого не комерційного проекту зі стандартними протоколами керування. Якщо мова йде про шифрований сигнал який неможливо швидко розшифрувати то в дію має вступити інший протокол протидії, завада у вигляді «білого шуму», яка просто унеможливить розпізнавання сигналу для БПЛА. У випадку літаючого апарату який використовує для роботи супутникову навігацію – достатньо поставити заваду в діапазоні частот GPS [6].

**Висновки.** Підсумовуючи, об'єкти критичної інфраструктури, такі як атомні електричні станції уразливі до шкідливих дій які можуть вчинити злочинці, використовуючи радіокеровані БПЛА. Безпечним методом боротьби є електромагнітний вплив. Створення керованої завади малопотужним комплексом радіо-електронної боротьби є ефективним рішенням, але потребує комплексних досліджень впливу на інші системи.

#### **Перелік посилань:**

1. Ю.П. Белокурський , О.Ю. Іохов , В.Є. Козлов , О.О. Щербина 3D Принципи побудови системи радіоелектронного захисту підрозділів Національної Гвардії України під час виконання завдань за призначенням  
URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewById/481291.pdf> (Системи озброєння і військова техніка, 2017, № 4(52)).

2. FM 3 – 38 Cyber Electromagnetic Activities. Headquarters Department of the Army Washington, DC, 12 February 2014.
3. Борьба радиоэлектронная. Термины и определения: ГОСТ РВ 0158-002-2008: Изменение N 1. – Введ. 2012-01-01. – М.: Стандартинформ, 2011.
4. Adam T. Electronic warfare I / T. Adam. –: Nova Science Publishers. 2009. – 192 p.
5. Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. Основы теории / А.И.Куприянов, Л.Н. Шустов. – М.: Вузовская книга, 2011. – 800 с.
6. Мельников Ю.П. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников радиоизлучения / Ю.П. Мельников, С.В. Попов. – М.: Радиотехника, 2008. – 432 с

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Козлов А.Є.

<sup>1</sup> Асист. Остапенко І.А.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ РОЗРАХУНКУ ІАБ ДЛЯ ОЦІНКИ ВРАЗЛИВОСТІ СИСТЕМИ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ НА ЕТАПІ ІЇ ПРОЕКТУВАННЯ

### Постановка проблеми та її актуальність.

Беручи до уваги інтенсивність розвитку ядерної промисловості та глобальну необхідність у генерації електричної потужності за рахунок ядерної енергії на фоні міжнародних геополітичних конфліктів, питання захищеності та безпеки ЯУ є першочерговим пріоритетом на сьогоднішній день.

Ключову роль у реалізації енергетичної стратегії та безпеки України відіграє саме атомна промисловість. Оператор (відповідно ліцензіат), який експлуатує більшість ядерних установок держави, для досягнення поставлених даною стратегією цілей, робить наступні кроки [1]:

- укладання угоди між АТ НАЕК «Енергоатом» та американською компанією «Holtec International» про будівництво в Україні до 20 атомних енергоблоків з малими модульними реакторами SMR-160.
- укладання меморандуму між АТ НАЕК «Енергоатом» та американською компанією «Westinghouse Electric» щодо будівництва в Україні нових енергоблоків за технологією AP-1000.
- підписання двосторонніх контрактів щодо розширення співпраці у сфері ядерного палива між АТ НАЕК «Енергоатом» та однією з найбільших уранових компаній світу «Самесо».
- реалізація будівництва лінії виробництва тепловиділяючих збірок для ядерних реакторів за технологією Westinghouse на потужностях АТ НАЕК «Енергоатом» в Україні.
- будова енергоблоків №3 та №4 Хмельницької АЕС за підтримки країн ЄС.

Тому, процес проведення оцінки вразливості для існуючих а також майбутніх СФЗ ЯУ потребує більш детального та ефективного підходу на всіх етапах реалізації проектів з урахуванням можливостей використання сучасних імовірнісних методів аналізу.

### Аналіз останніх досліджень.

У відповідності до керівного документу МАГАТЕ [2], процес проведення оцінки вразливості передбачає використання як методів імітаційного моделювання так і настільних вправ, що прогнозують ефективність СФЗ. На сьогоднішній день у світі існує значна кількість програм за допомогою яких можна виконати моделювання й розрахунок вразливості та ефективності СФЗ будь-якого об'єкта. До таких програм відносяться [3]:

- ASSESS (Analytic System and Software for Evaluating Safeguards and Security)
- EASI (Estimate of Adversary Sequence Interruption)
- SAFE (Safeguards Automated Facility Evaluation)

Керівництво МАГАТЕ [4] застерігає від використання лише симуляцій, оскільки вони можуть не відображати практичні аспекти реагування і можуть упустити важливі аспекти сценаріїв нападу. Побудова індивідуальних імовірнісних моделей (дерев подій) за методологією ІАБ з урахуванням аналізу створеної моделі людського чинника для окремо взятої СФЗ може бути набагато ефективнішими і деталізованими підходом в порівнянні з традиційними процесами моделювання які закладені у алгоритмах перелічених вище

програм. Більш того, цей підхід може бути інтегрований у комплексний ІАБ у майбутньому.

**Формулювання мети.** Інтегрування методології ІАБ у методіку проведення оцінки вразливості СФЗ для отримання більш об'єктивних і точних результатів проведення даної оцінки шляхом систематизації і визначення вагомості впливу наявних вхідних даних з урахуванням людського фактору.

**Основна частина.** Ключовим елементом у аналізі ефективності роботи СФЗ є оцінка її вразливості. Процес проектування СФЗ та проведення її оцінки вразливості (Рис. 1) повинен проводитися послідовно, виважено та включати в себе наступні кроки [5]:

1. Визначення вимог до СФЗ. Для цього необхідно виконати наступні дії:

- описати експлуатаційні режими та умови роботи об'єкта
- визначити спектр загроз
- визначити цілі правопорушника
- визначити нормативні вимоги

2. Розробка СФЗ. Визначення збалансованого поєднання бар'єрів, датчиків, процедур, засобів зв'язку, сил оперативного реагування у СФЗ, яка може задовільнити вимогам захисту в рамках експлуатаційних, безпекових та економічних обмежень об'єкта. Комбінація обладнання повинна враховувати слабкі і сильні сторони кожного елемента.

3. Оцінка СФЗ. Перевірка необхідних функцій системи, таких як виявлення вторгнень, контроль над входом, затримка доступу, комунікації у відповідь та сили реагування.

4. Доопрацювання проекту. Аналіз доопрацьованої системи проводиться до поки результати не покажуть, що СФЗ відповідає вимогам захисту.

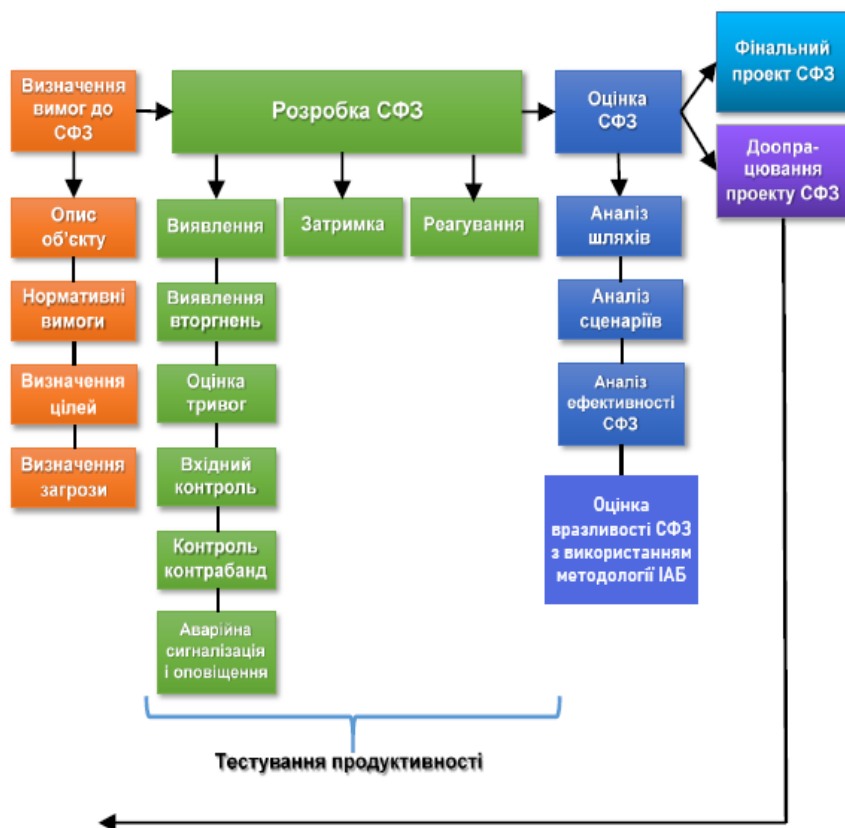


Рисунок 1 – Процес проектування та проведення оцінки вразливості СФЗ

Дана робота буде проводитись у відповідності до вказаних вище етапів проведення оцінки вразливості:

- розробка гіпотетичного ядерного об'єкта – Централізоване сховище відпрацьованого ядерного палива (ядерний матеріал другої категорії) з урахуванням географічних, економічних та безпекових умов регіону, встановлення відповідних нормативних вимог до

СФЗ. Аналізу ресурсів та моделей потенційних правопорушників і їх вразливих цілей стосовно даного об'єкту а також розробка можливих сценаріїв їх дій.

- розробка СФЗ у відповідності до встановлених нормативних вимог до даного об'єкту з урахування всіх можливих факторів та специфіки його роботи.

- проведення оцінки вразливості СФЗ у відповідності до діючого Наказу ДІЯРУ №169 від 30.11.2010 [6] із застосуванням часових рамок на нейтралізацію правопорушників за класичним сценарієм.

- визначення найбільш імовірнішого маршруту дій правопорушників за методологією ІАБ з використанням комп'ютерного коду SAPHIRE та з урахуванням усіх потенційно можливих аспектів та наслідків.

- аналіз надійності персоналу (побудова психологічної моделі прийняття рішень).

- розрахунок величини допустимого ризику для найбільш імовірнішого сценарію дій правопорушників, визначеного за методологією ІАБ та з урахуванням аналізу надійності персоналу в рамках цього сценарію.

- аналіз отриманих результатів допустимого ризику в процесі визначення ефективності СФЗ у відповідності до затвердженої регулюючим органом об'єктової загрози для обох варіантів проведеної оцінки вразливості (за методологією ІАБ та за класичним підходом розрахунку)

**Можливі шляхи вирішення проблеми.** Беручи до уваги той факт що комплексне використання таких функцій як: виявлення вторгнень, контроль над входом, затримка доступу, комунікації у відповідь та сили реагування СФЗ - навіть при високих показниках їх надійності не є панацеєю забезпечення належного рівня захисту в умовах існування людського фактору як зі сторони оператора СФЗ так і зі сторони зовнішніх та внутрішніх правопорушників (що є неврахованою функцією при оцінці ефективності СФЗ) - для об'єктивної оцінки продуктивності СФЗ, застосування методів імовірнісного аналізу безпеки з урахуванням створеної моделі людського чинника є необхідним інструментом в процесі моделювання даних систем. За результатами таких досліджень, оцінка проекту виявить не тільки вразливість (слабкі місця) СФЗ, але також визначить вагомість впливу людського чинника на досягнення або не досягнення системою ефективності відповідно до встановлених законодавчих вимог до фізичного захисту.

**Висновки.** Систематична оцінка подій в рамках сценаріїв об'єктової загрози, використовуючи дерево подій або подібний інструмент розробки послідовності подій, може бути корисною для оцінки ефективності СФЗ. Враховуючи динамічний та залежний характер взаємодій між подіями, динамічні дерева подій, які можуть автоматично ініціювати моделювання різних варіантів послідовності подій з урахуванням людського чинника можуть бути більш корисними, ніж традиційний процес моделювання аварійних сценаріїв для подій у сфері безпеки.

#### **Перелік посилань:**

1. Офіційний сайт АТ НАЕК Енергоатом URL: <https://www.energoatom.com.ua/ua/all-news/1/category/2>

2. IAEA Nuclear Security Series No. 10, Development, Use and Maintenance of the Design Basis. URL: <https://www.iaea.org/publications/8097/development-use-and-maintenance-of-the-design-basis-threat>

3. Курс лекцій «Управління фізичною ядерною безпекою на національному та об'єктовому рівнях» Інститут ядерних досліджень імені Дж.Кузьмича

4. IAEA Nuclear Security Series No. 4, Engineering Safety Aspects of the Protection of NP against Sabotage. URL: <https://www.iaea.org/publications/7574/engineering-safety-aspects-of-the-protection-of-nuclear-power-plants-against-sabotage>

5. Курс лекцій «Оцінка вразливості ядерних об'єктів та управління ризиками» Серафін Р.І / ІАТЕ НТУУ Київський Політехнічний Інститут ім. Ігоря Сікорського

6. Наказ ДІЯРУ №169 від 30.11.2010 року <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1309-10#Text>

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Подустов О.М.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Бібик Т.В.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЗАТРИМКИ ПРАВОПОРУШНИКА СИСТЕМАМИ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ АЕС

### Постановка проблеми та її актуальність.

#### Постановка проблеми:

В контексті безпеки атомних електростанцій (АЕС), виникає проблема визначення оптимального часу затримки правопорушника системами фізичного захисту. Фізичний захист АЕС є важливою складовою для запобігання терористичних або інших злочинних актів, спрямованих на нанесення шкоди або втрати управління ядерними реакторами, що може призвести до серйозних наслідків для людського життя, довкілля та економіки [1].

#### Актуальність проблеми:

1. **Загроза тероризму:** Зростаюча загроза терористичних груп та інших злочинних елементів вимагає посилення заходів фізичного захисту АЕС. Встановлення оптимального часу затримки для систем фізичного захисту стає критичною для забезпечення ефективності та надійності захисних механізмів.

2. **Технологічні виклики:** Розвиток технологій дозволяє потенційним загрозам здійснювати більш складні та вдосконалені атаки. Це означає, що системи фізичного захисту повинні постійно адаптуватися до нових сценаріїв загроз та збільшувати швидкість реакції.

3. **Вплив на глобальну безпеку:** АЕС є ключовими об'єктами глобальної інфраструктури, і будь-який інцидент може мати серйозні наслідки для безпеки та стабільності на міжнародному рівні. Оптимізація часу затримки правопорушника може відігравати ключову роль у попередженні подібних інцидентів.

4. **Економічні втрати:** Інциденти на АЕС можуть призвести до серйозних економічних втрат як на рівні конкретних компаній, так і на рівні країн та глобальних ринків. Ефективна система фізичного захисту, що включає в себе оптимальний час затримки правопорушника, може зменшити ризики фінансових втрат.

Отже, визначення оптимального часу затримки правопорушника стає актуальною проблемою, яка потребує досліджень та розробки відповідних стратегій і технологій для забезпечення найвищого рівня безпеки АЕС.

#### Формулювання мети.

Мета роботи полягає в розробці і визначенні оптимального часу затримки правопорушника системами фізичного захисту АЕС з метою максимального забезпечення безпеки атомних електростанцій та запобігання можливим терористичним або іншим злочинним актам, що можуть стати загрозою для глобальної безпеки, людського життя, довкілля та економіки [2].

#### Основна частина.

Основна частина роботи може включати такі дослідження:

##### 1. Аналіз потенційних загроз:

– Вивчення сценаріїв можливих загроз для АЕС, включаючи терористичні акти, кібератаки, внутрішні інциденти тощо.

– Оцінка ймовірності виникнення кожної з цих загроз та їх потенційних наслідків.

##### 2. Аналіз існуючих систем фізичного захисту:

- Огляд і аналіз існуючих систем фізичного захисту, які використовуються на АЕС.
- Оцінка їхньої ефективності та здатності виявляти та зупиняти потенційних правопорушників.

### **3. Моделювання сценаріїв інцидентів:**

- Створення математичних моделей для моделювання різних сценаріїв інцидентів, включаючи напади на АЕС.
- Врахування різних факторів, таких як час реакції, швидкість правопорушника, характеристики систем фізичного захисту тощо.

### **4. Оптимізація часу затримки:**

- Використання алгоритмів оптимізації для визначення оптимального часу затримки правопорушника.
- Розробка стратегій реагування, які дозволяють максимально ефективно використовувати цей час затримки для нейтралізації загрози.

### **5. Валідація результатів:**

- Перевірка ефективності запропонованих стратегій та оптимальних часів затримки за допомогою симуляційних моделей та реальних експериментів.
- Аналіз результатів і корекція стратегій, якщо необхідно.

### **6. Розробка рекомендацій:**

- Створення рекомендацій для вдосконалення систем фізичного захисту на АЕС на основі отриманих результатів досліджень.
- Формулювання рекомендацій для регуляторних органів та експлуатуючих компаній з метою підвищення загальної безпеки ядерних об'єктів.

Також можуть бути досліджені такі аспекти:

#### **1. Технічні аспекти:**

- **Аналіз систем фізичного захисту:** Оцінка та аналіз існуючих систем фізичного захисту на АЕС з огляду на їхню здатність забезпечити затримку правопорушників.
- **Вивчення технологічних можливостей:** Дослідження доступних технологій для виявлення, відслідковування та затримки потенційних правопорушників.

#### **2. Організаційні аспекти:**

- **Аналіз процедур і режимів безпеки:** Оцінка ефективності і достатності існуючих процедур та режимів безпеки для виявлення та реагування на потенційні загрози.
- **Вивчення організаційної структури:** Дослідження організаційної структури управління фізичним захистом на АЕС та ідентифікація можливих точок вразливості.

#### **3. Стратегічні аспекти:**

- **Аналіз потенційних загроз:** Оцінка сценаріїв та типів загроз, які можуть бути спрямовані на АЕС, включаючи терористичні атаки та кіберзлочинність.
- **Розробка стратегій протидії:** Розробка стратегій та планів дій для протидії потенційним загрозам та забезпечення оптимального часу затримки правопорушника.

#### **4. Технологічні аспекти:**

- **Дослідження нових технологій:** Вивчення та оцінка нових технологій, які можуть поліпшити здатність систем фізичного захисту виявляти та затримувати потенційних правопорушників.
- **Вивчення інтеграції технологій:** Дослідження можливостей і викликів, пов'язаних з інтеграцією різних технологій у складі систем фізичного захисту.

#### **5. Соціальні аспекти:**

- **Аналіз впливу на громадську думку:** Вивчення впливу досліджень і впроваджених заходів на громадську думку та сприйняття безпеки АЕС у суспільстві.

### **Висновки.**

Висновки з цього дослідження демонструють важливість ретельного аналізу та оптимізації систем фізичного захисту атомних електростанцій (АЕС) з метою забезпечення максимальної безпеки та запобігання можливим терористичним або іншим злочинним

актам, які можуть становити загрозу для глобальної стабільності та безпеки.

Основні висновки включають:

1. **Необхідність постійного вдосконалення:** Системи фізичного захисту АЕС повинні постійно адаптуватися до зростаючих загроз та використовувати нові технології та стратегії для максимізації ефективності.

2. **Важливість інтегрованого підходу:** Ефективність систем фізичного захисту залежить від інтеграції різних технологій, процедур та організаційних заходів в єдину стратегію безпеки.

3. **Необхідність постійного моніторингу і аналізу:** Постійний моніторинг та аналіз потенційних загроз дозволяє вчасно виявляти вразливості та розробляти ефективні заходи протидії.

4. **Роль громадськості:** Важливо залучати громадськість до процесу оцінки та покращення систем фізичного захисту, щоб забезпечити підтримку та довіру суспільства.

5. **Необхідність постійного навчання та тренування персоналу:** Навчання та тренування персоналу є важливою складовою ефективною системи фізичного захисту, що дозволяє вчасно та ефективно реагувати на потенційні загрози.

Узагальнюючи, ці висновки підкреслюють необхідність постійного удосконалення систем фізичного захисту АЕС для забезпечення безпеки та стійкості ядерних об'єктів в умовах зростаючих загроз та швидко змінюючогося світового контексту.

**Перелік посилань:**

1. International Atomic Energy Agency (IAEA) - Організація Об'єднаних Націй з атомної енергії <https://www.iaea.org/>

2. RAND Corporation <https://rand.org/>



<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Штиль О.В.

<sup>1</sup> Асист. Остапенко І.А.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## КОНТРОЛЬ ТА ОБЛІК РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ У ВИГЛЯДІ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Радіоактивні відходи є одним із найбільш небезпечних видів відходів, які можуть завдати значної шкоди здоров'ю людини та навколишньому середовищу. Відпрацьовані джерела іонізуючого випромінювання (далі – ВДІВ) є одним із основних джерел радіоактивних відходів, що утворюються в результаті різних сферах діяльності, використання ядерної енергії, важкої промисловості, медицини та науки. Вони містять різні радіоактивні елементи, які можуть випромінювати іонізуюче випромінювання. Необхідно безпечно зберігати та утилізувати ВДІВ, щоб не допустити їх викидів у навколишнє середовище.

Актуальність теми обумовлена великій кількості джерел іонізуючого випромінювання, які активно використовуються в різних установах на сьогоднішній день в Україні. Виникнення ВДІВ є неминучим процесом, що відбувається в ході їхньої експлуатації, які з плином часу, втрачають здатність виконувати покладені на них функції, після чого потребують зняття з експлуатації і транспортування до місця зберігання. Система обліку і контролю дозволяє відстежувати місцезнаходження великої кількості ВДІВ та запобігати їх потраплянню в навколишнє середовище, що в свою чергу може призвести до неприйнятних наслідків. Контроль та облік на об'єкті є невід'ємною складовою забезпечення радіаційної безпеки, та для безпечного зберігання та подальшої утилізації.

**Формулювання мети.** Метою роботи є забезпечення захищеності та безпечного поводження з відпрацьованими джерелами іонізуючого випромінювання, відслідковування розташування кожного ВДІВ, отримання, обробки, аналізу, збереженості даних щодо ВДІВ (в тому числі у випадку аварійних ситуацій), видача рекомендацій щодо сортування ВДІВ.

**Основна частина.** Об'єктом автоматизації являється «Централізоване сховище для довгострокового зберігання відпрацьованих джерел іонізуючого випромінювання» (ЦСВДІВ) комплексу виробництв «Вектор», призначеного для прийому, ідентифікації, сортуванню, обробки, комплектації, пакування, паспортизації та подальшого роздільного зберігання (до 50 років) відпрацьованих джерел альфа-, бета-, гамма- та нейтронного ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\eta$ ) випромінювання закритого типу до їх передачі їх в подальшому на захоронення. Транспортно-технологічна схема поводження з відпрацьованими джерелами іонізуючого випромінювання в ЦСВДІВ передбачає п'ять технологічних потоків [1].

Загальна очікувана кількість ВДІВ 174 000 штук. Сумарна активність ВДІВ складає приблизно  $1,15E+16$  Бк. На даний момент в ЦСВДІВ зберігається більше 50 типів ВДІВ в кількості 22352.

Розробка бази даних (далі – БД) призначена для удосконалення існуючої системи обліку ВДІВ на ЦСВДІВ [2].

База даних обліку і контролю ВДІВ, які приймаються на переробку і зберігання до ЦСВДІВ, має забезпечити виконання таких функцій:

- облік ВДІВ, що приймаються на ЦСВДІВ, з занесенням до БД всіх даних паспортів на партію ВДІВ;

- відслідковування знаходження ВДІВ протягом всього технологічного процесу поводження з ними (в приміщенні тимчасового зберігання прийнятих ВДІВ, в конкретній

гарячій камері А, В та С та в конкретних місцях кожної камери (в сейфах, капсулах тощо), в радіаційно-захисному боксі, а також в конкретних місцях зони зберігання упаковок ВДІВ);

- облік ВДІВ, накопичених на кожному етапі технологічного процесу;
- облік ВДІВ, що знаходяться в зоні зберігання;
- порівняння результатів характеристики ВДІВ на ЦСВДІВ з даними паспортів та видача рекомендацій щодо відповідності збіжності/розбіжності даних встановленим критеріям;
- порівняння характеристик ВДІВ з критеріями сортування та видача рекомендацій щодо розміщення ВДІВ у певну капсулу/упаковку;
- відстеження сумарної активності накопичених ВДІВ;
- запобігання несанкціонованим змінам інформації в БД.

При розробці програмного забезпечення має враховуватися можливість розширення його функціональності функціональності та складу завдань без втрати працездатності системи.

Вимоги до захисту даних від несанкціонованого доступу містять у собі три узагальнені процедури:

- ідентифікація користувача;
- ведення запису часу входу в систему та користувача;
- чітке розмежування доступу користувача до можливостей програмного забезпечення, відповідно до типу користувача.

Функціональне забезпечення повинно мати гнучкий пошук та сортування за різними критеріями БД. Наприклад пошук за датою, або діапазоном дат, вибірка по типу нукліду або пошук за активністю і т.д.

Ідентифікація недоліків та пропозиція покращень: виявити основні проблеми, що виникають у роботі бази обліку даних та запропонувати можливі шляхи усунення недоліків. Також потрібно вжити заходів, які необхідні для створення та підтримки ефективного обліку та контролю ядерних матеріалів, також розглянути методи реалізації заходів безпеки.

**Висновки.** Ця база даних має вирішувати ряд важливих завдань, включаючи облік прийнятих на переробку та зберігання джерел, відслідковування їх розміщення протягом всього технологічного процесу, контроль активності джерел, порівняння даних характеристик з паспортними даними, та ідентифікацію користувачів з метою забезпечення захисту інформації.

Потрібно також врахувати гнучкість програмного забезпечення для розширення його функціональності та можливість розширення функцій без втрати продуктивності. Особлива увага повинна бути приділена заходам захисту даних від несанкціонованого доступу, включаючи ідентифікацію користувача, ведення журналу входу та розмежування прав доступу.

Загалом, розробка бази даних для обліку та управління джерелами іонізуючого випромінювання є критично важливою для забезпечення ефективного та безпечного управління відпрацьованими джерелами в рамках ЦСВДІВ комплексу "Вектор".

#### **Перелік посилань:**

1. Централізоване сховище відпрацьованих джерел іонізуючого випромінювання [Електронний ресурс] // Чорнобильський Інститут досліджень і розвитку. – Режим доступу: <http://chornobyl.institute/ua/news/2020/10/22/80/view>
2. International Atomic Energy Agency, 2018. | Guidance on the Management of Disused Radioactive Sources [p. 94]

<sup>1</sup> Аспірант 3 курсу Самсоненко А.В.

<sup>1</sup> Проф., д.т.н. Письменний Є.М.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ОЦІНКА ЗАГРОЗ ЯК СКЛАДОВА ФІЗИЧНОЇ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ

Забезпечення ефективної фізичної ядерної безпеки без чіткого визначення загрози для фізичної ядерної безпеки не можливо. У виданні МАГАТЕ із Серії видань з фізичної ядерної безпеки № 10 «Development, Use and Maintenance of the Design Basis Threat» («Розроблення, застосування і супроводження проектної загрози») «загроза» визначається як «особа чи організація, що має мотиви, наміри й кваліфікацію для вчинення зловмисних дій» [1], у Глосарій МАГАТЕ «IAEA Nuclear Safety and Security Glossary» 2022 р «Загроза - особа або група осіб, які мають мотивацію, наміри та можливості вчинити зловмисні дії».

Носіями загроз для фізичної ядерної безпеки є правопорушники, характеристики яких визначаються в проектній загрозі, кожною державою окремо.

Основою проектної загрози є модель правопорушника, на основі якої будується модель загрози. Модель має містити вихідну інформацію для розроблення і проектування системи фізичного захисту об'єкта. Аналогічні підходи в оцінці загроз використовуються в багатьох країнах світу.

В Законі України «Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання» [2] дається наступне визначення: «проектна загроза - властивості та характеристики потенційних правопорушників, дії яких можуть бути спрямовані на вчинення диверсії, крадіжки або будь-яке інше неправомірне вилучення радіоактивних матеріалів, для протидії яким створюється система фізичного захисту».

Відповідно до українського законодавства з фізичного захисту особи, що здійснили спробу вчинення злочинних дій чи вчинили злочинні дії щодо радіоактивних матеріалів і пов'язаних з ними установок, називаються правопорушниками. Правопорушники поділяються на внутрішніх і зовнішніх правопорушників (Рис. 1).

Потрібно усвідомити, що проектна загроза не описує жодних конкретних правопорушників, їх ознак і характеристик, ні тих що ідентифіковані, ні тих, що можуть бути ідентифіковані. Проектна загроза містить узагальнені характеристики правопорушників, розроблені на підставі оцінки достовірних загроз, як реально існуючих, так і достовірно можливих.

Відповідно до термінології МАГАТЕ оцінка загрози – це оцінка наявних носіїв загрози, що зазвичай ґрунтується на оцінці розвідувальних даних, яка описує мотиви, наміри і можливості цих носіїв загрози щодо можливого вчинення ними протиправних дій [3].

Для оцінки загрози, перш за все, необхідно зібрати інформацію щодо всіх наявних і потенційних загроз, які існують у країні й поза її межами, тобто зібрати дані про правопорушників, їх мотивації, наміри й можливості. Держава призначає компетентний орган з оцінки загрози, куди стікаються дані про загрози. Це може бути орган, який у подальшому буде розробляти проектну загрозу, а може й ні.

Джерела інформації про загрози – це матеріали служб розвідки, правоохоронних органів, відповідні урядові документи, повідомлення експлуатуючих організацій, результати міжнародних конференцій та інших заходів з фізичної ядерної безпеки, повідомлення спецслужб інших держав, підтверджені повідомлення засобів масової інформації. Слід відмітити, що інформація про загрози стосується всіх реально існуючих

або цілком можливих загроз країні, населенню, керівництву країни, інфраструктурі.

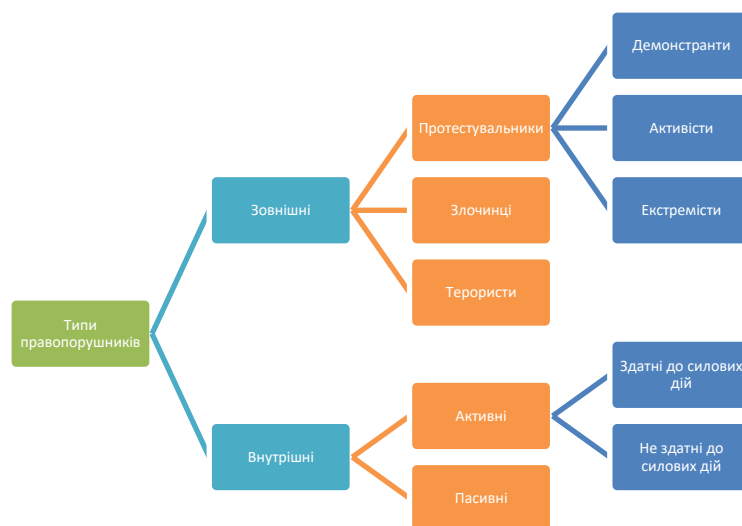


Рисунок 1 - Типи правопорушників

Для оцінки загрози, перш за все, необхідно зібрати інформацію щодо всіх наявних і потенційних загроз, які існують у країні й поза її межами, тобто зібрати дані про правопорушників, їх мотивації, наміри й можливості. Держава призначає компетентний орган з оцінки загрози, куди стікаються дані про загрози. Це може бути орган, який у подальшому буде розробляти проектну загрозу, а може й ні.

Джерела інформації про загрози – це матеріали служб розвідки, правоохоронних органів, відповідні урядові документи, повідомлення експлуатуючих організацій, результати міжнародних конференцій та інших заходів з фізичної ядерної безпеки, повідомлення спецслужб інших держав, підтвержені повідомлення засобів масової інформації. Слід відмітити, що інформація про загрози стосується всіх реально існуючих або цілком можливих загроз країні, населенню, керівництву країни, інфраструктурі.

У разі отримання інформації про загрози дуже важливою є оцінка достовірності цієї інформації. Потрібно вираховувати ступінь довіри до джерела інформації. Якщо було отримано інформацію з інших джерел, у такому випадку перевіряється першоджерело інформації.

Сьогоднішні події в Україні показують, що загрози постійно змінюються. Поява нових загроз, які в майбутньому будуть неодноразово оцінені та проаналізовані матиме вплив на фізичну ядерну безпеку в цілому на рівні держави, так і на рівні захищеності об'єктів.

Збір та аналіз інформації про загрози, які виникли в умовах повномасштабного вторгнення ключове питання, на яке має бути направлено зусилля спеціалістів з фізичної ядерної безпеки.

#### **Перелік посилань:**

1. National Nuclear Security Threat Assessment, Design Basis Threats and Representative Threat Statements , IAEA Nuclear Security Series № 10-G (Rev.1) (Vienna, IAEA, 2021) 54 p: [www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1926\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1926_web.pdf)

2. Закон України «Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання» Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2001, № 1, ст.1: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2064-14#Text>  
The IAEA Nuclear Safety and Security Glossary, 2022 (Interim) Edition Vienna, IAEA, 2022, 248 p.: [www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/IAEA-NSS-GLOweb.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/IAEA-NSS-GLOweb.pdf)

СЕКЦІЯ № 3

**Теплогідравлічні  
процеси в тепло- і  
парогенеруючих  
установках**

<sup>1</sup> Postgraduate 3d year Mane K.V.

<sup>1</sup> Sn.res.fellow, cand.eng.sc. Alekseik Y..

[https://scholar.google.com.ua/citations?user=IV\\_0FngAAAAJ](https://scholar.google.com.ua/citations?user=IV_0FngAAAAJ)

<sup>1</sup> Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

## PULSATING HEAT PIPE SENSITIVITY TO SPACE ORIENTATION: ZONE LENGTH AND HEAT CARRIER INFLUENCE

**Statement of the problem and its relevance.** The rapid technical development of high powered electronic devices along with their miniaturization presents a serious challenge to their thermal management. The adoption of highly efficient passive cooling devices such as pulsating heat pipe (PHP) invented by Akachi [1] is necessary to address this problem. These devices are very promising because of simple design, high heat transfer characteristics and possibility of working at any space orientation. Nevertheless, PHP's original functionality is compromised when employed across different orientations due to a multitude of reasons that fall into three categories: physical, geometrical, and regime. Numerous attempts have been made in the past to use innovative PHP designs to balance the forces of vapor pressure and capillary action, making PHP function independent of orientation and lessening the effect of gravity. Examining the impact of heat carrier type and heating zone length on PHP thermal performance is one such endeavours.

**Analysis of the latest research.** Heat carrier selection is an important question for PHP designing. Water is commonly used as heat carrier because of its high thermal properties. But although low latent heat fluids are more likely to dry out at high heat flux, they do have better oscillation and start-up properties [2]. Methanol is thought to be the ideal working fluid for horizontal operations because of its high thermal conductivity [3]. Srikrishna et al. [4] examined the impact on closed-loop PHP using deionized (DI) water and methanol. At 70% filling ratio (FR), methanol showed better heat transfer performance than DI water. Consequently, it is advised to employ large latent heat fluids for high heat flux applications and small latent heat fluids for low heat flux applications.

Decreasing heating zone length improved heat transfer characteristics [5, 6]. Despite promising findings, there is a limited research on the effects of heating zone length. The few studies that are available either only examine the vertical bottom heating mode or show results that are inconsistent with previous literature [7]. The combined influence of length of the heating zone and working fluid at various orientations must therefore be observed.

**Goal formulation.** The goal of is work is experimental investigation of heat carrier type and heating zone (HZ) length complex influence on PHP heat transfer characteristics.

**Main part.** To achieve this goal, investigations were made at three different HZ lengths — 10, 30 and 50 mm with water and methanol as heat carriers.

The other parameters of experimental PHP sample were: internal/outer diameter - 1.1/2.1 mm; condensing zone (CZ) length - 100 mm; overall PHP length – 150 mm, FR - 50±0.5%. The PHP was mounted on a metal plate together with an ohmic heater on HZ and a cooler on CZ. The metal plate was able to be adjusted to inclination angles: +90° (vertical bottom heating mode), +45°, 0° (horizontal mode), -45°, and -90° (vertical top heating mode) by means of levelling screws. A DC power supply was used to power the heater. A digital wattmeter was used to control the heater's electric power. The thermostat attached to the cooler maintained a steady cooling water temperature equal to 22°C. Temperature measurement system consisted of: ten T-type thermocouples mounted on the outer wall of PHP, a multichannel data acquisition module, an interface converter and a personal computer.

The results of the investigation are displayed in figure 1 depicting dependence between

PHP thermal resistance and supplied heat flux density at different orientation for a varied heating zone length. PHP didn't start to work at inclination angles  $-45^\circ$  and  $-90^\circ$ .

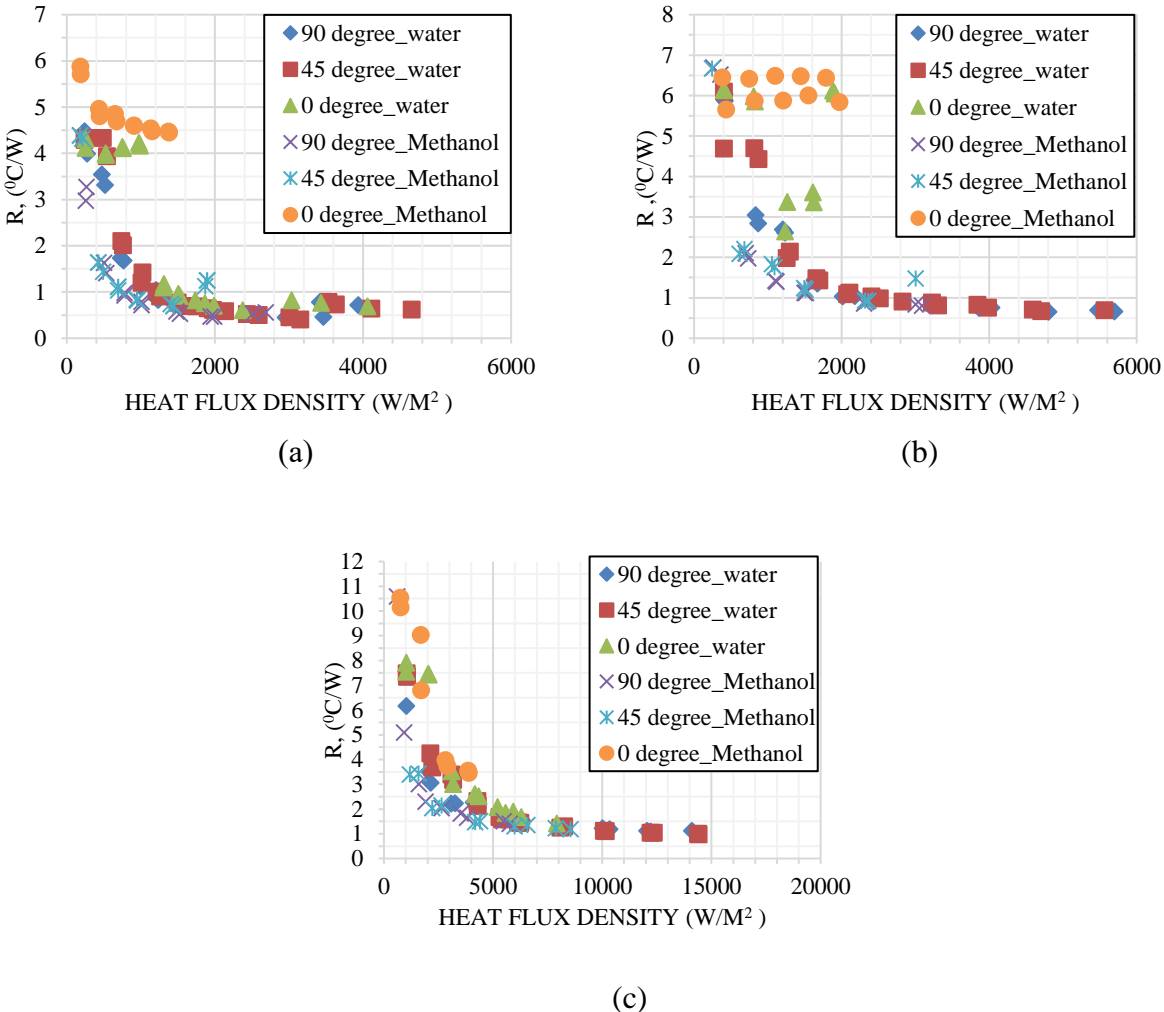


Figure 1- Influence of the heating zone length and heat carrier on thermal resistance across different orientations: 50 mm (a), 30 mm (b), 10 mm (c)

Methanol appears to be a good choice at lower heat flux and in the vertical bottom heating mode, however water appears to perform best at larger heat flux and in all other orientations when it comes to thermal resistance. The findings are in line with most previous studies, which shows that thermal resistance rises as the heating zone's length decreases for both heat carriers. However, at lower heat fluxes, methanol produces lower thermal resistance; at horizontal positions, water is always a good option. Experimental results also shows that water is the best option for maximum transmitted heat flux.

On the other hand, methanol appears to be a useful choice for quickly starting pulsation at reduced heat flux. With a 50 mm heating zone length, its minimum start-up temperature ( $t_{start}$ ) is  $34.79^\circ\text{C}$ , while it is  $61^\circ\text{C}$  for water (figure 2a). In general, start-up temperature is strongly affected by inclination angle and HZ length. For water at horizontal mode the lowest start-up temperature was observed at 30 mm HZ length. For inclination angles  $+90^\circ$  and  $+45^\circ$  start-up temperature decreases with HZ length increasing for both heat carriers.

The ratio of thermal resistance in horizontal position ( $R_h$ ) to the thermal resistance in the bottom heating mode ( $R_{vb}$ ) was chosen in this study as degree of PHP sensitivity to space orientation. If this ratio equals to 1 at the main PHP operational mode (pulsating mode), then PHP

can be assumed as insensible to space orientation. As it can be seen from figure 2b, this ratio is much stronger affected by HZ length for methanol than for water but for both heat carriers it has the lowest values at 10 mm HZ length. Also this ratio is higher than 1 for both heat carriers at all investigated HZ lengths and inclination angles.

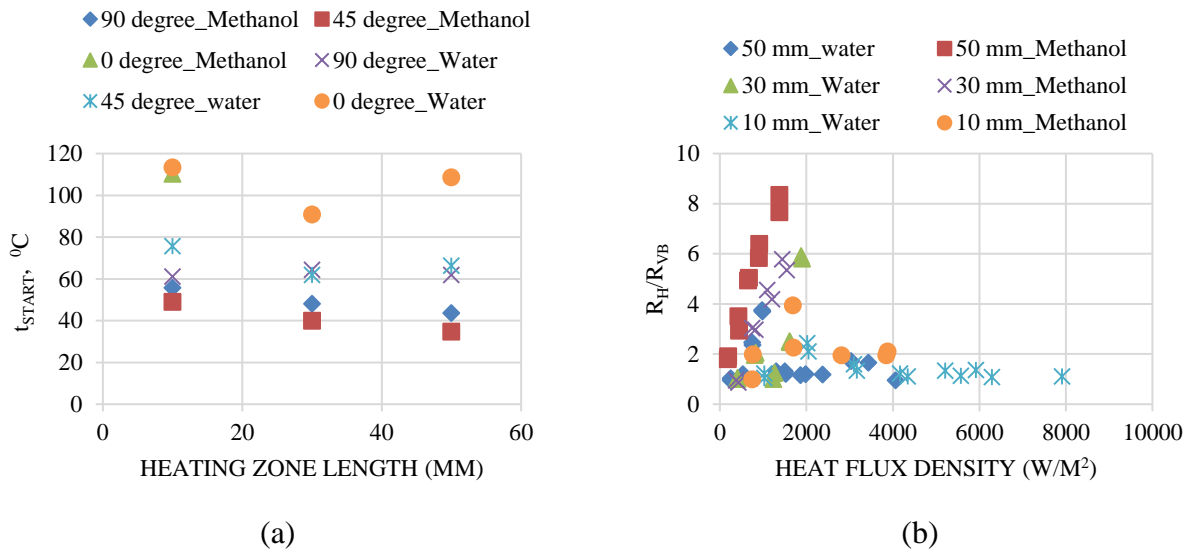


Figure 2 - PHP performance parameters: (a) variation of start-up temperature with heating zone length; (b) sensitivity ration as a function of heat flux density

**Conclusions.** It can be summarized as follows:

1. Methanol provides lower thermal resistance, but PHP with water transfers higher heat flux.
2. At inclination angles  $+90^\circ$  and  $+45^\circ$ , increasing of HZ length leads to increasing of thermal resistance and decreasing of start-up temperature.
3. In horizontal position, PHP with water has the lowest start-up temperature at HZ length 30 mm and the only HZ length at which PHP with methanol works is 10 mm.
4. PHP has the lowest sensitivity to space orientation at HZ length 10 mm for both heat carriers. For this point of view such Hz length is perspective for further development of PHP insensible to space orientation but it is necessary to solve problems with high thermal resistance and start-up temperature.

**References:**

1. Akachi, H. (1990). U.S. Patent No. 4,921,041. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
2. Han H., Cui X., Zhu Y., Sun S. A comparative study of the behavior of working fluids and their properties on the performance of pulsating heat pipes (PHP). *Int. J. Therm. Sci.* 2014. V.82, № 9. P. 138-147.
3. Saha M., Feroz C. M., Ahmed F., Mujib T. Thermal performance of an open loop closed end pulsating heat pipe. *Heat Mass Transf.* 2012. V.48. P. 259-265.
4. Shrikrishna P., Siddharth N., Reddy S.U.M., Narasimham G. S.V.L. Experimental investigation of flat plate closed loop pulsating heat pipe. *Heat Mass Tranf.* 2019. V.55, № 9. P. 2637-2649.
5. Charoensawan P., Terdtoon P. Thermal performance of horizontal closed-loop oscillating heat pipes. 2008. V.28, № (5-6). P. 460-466.
6. Zhan J., Chen X., Ji Y., Zheng P., Duan W.: Experimental study of ethane pulsating heat pipe with varying evaporator lengths based on pulse tube refrigerator. *Int. J. Refrig.* 2023. V. 145. P. 40-49.
7. Kargarsharifabad H., Mamouri S.J., Shafii M.B., Rahni M.T.: Experimental investigation of the effect of using closed-loop pulsating heat pipe on the performance of a flat plate solar collector. *J. Renew. Sustain. Energy.* 2013. V.5, № 1. P. 013106.



<sup>1</sup> Аспірант 3 курсу Ліпніцький Л.В.; <sup>1</sup> Мол. вчений Мельник Р.С.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Лебедь Н.Л.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=МерННН4ААААА&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОВОГО ТА ГІДРОДИНАМІВЧНОГО ПРИМЕЖОВОГО ШАРУ В УМОВАХ ВІЛЬНОЇ КОНВЕКЦІЇ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Зростання темпів розвитку електроніки призводить до постійного ускладнення засобів та методів термостабілізації у зв'язку зі зростанням питомих теплових потоків що спричинені зменшенням розмірів компонентів та зростанням їх потужності. На даний час найбільш розповсюдженими системами термостабілізації є системи що базуються на використанні двофазних теплопередаючих пристроїв, таких як термосифони, теплові труби, парові камери та ін.

Серед зазначених пристроїв, термосифони є найбільш простими у виготовленні і відповідно найбільш дешевими. Враховуючи, що більшість силової електроніки розташовується стаціонарно в просторі (цивільні системи телекомунікацій та ін) або ж з невеликими періодичними відхиленнями (електроніка на кораблях чи системах радіолокації), використання термосифонів є найбільш раціональним.

**Аналіз останніх досліджень.** Для зростання ефективності функціонування термосифонів застосовуються різні методи та підходи, а саме: конструктивні зміни геометрії (канавки на внутрішній поверхні [1], нарізання різьб [2], нарощування шорсткості за допомогою напилення); використання різних методів підвищення чи зменшення крайових кутів змочування (напилення незмочуваних матеріалів, хімічна обробка поверхонь, методом LIPSS [3]). Більшість методів ґрунтуються на представленнях збільшення площі теплообміну та збільшення кількості центрів пароутворення, не беручи до уваги процесу формування теплового та гідродинамічного примежового шару, дослідження яких дозволить більш ефективно та цілеспрямовано застосовувати методи інтенсифікації. Дослідження такого роду дозволять визначити найбільш активні зони формування примежового шару

**Формулювання мети.** Визначити дотичними методами формування теплового примежового шару.

**Основна частина.** З ціллю дослідження процесів формування примежового шару при початкових умовах функціонування двофазних термосифонів було створено експериментальну установку, принципову схему якої показано на рисунку 1.

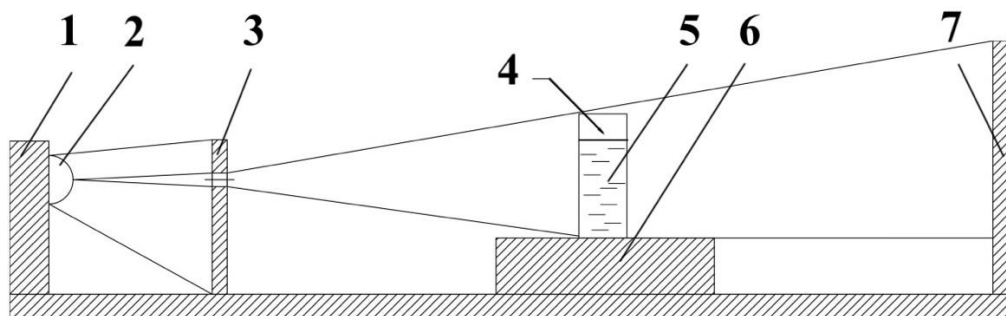


Рисунок 1 – Принципова схема дослідження формування теплового примежового шару оптичним методом.

На штативі 1 розташовується джерело світла 2. Проходячи через колімаційну діафрагму 3, за допомогою якої відбувається імітація точкового джерела світла, світловий потік проходить через плоско паралельну кювету 4 з робочою рідиною 5. Кювета розташована на теплоізолюваній підставці 6. Імітатор теплового потоку, який закріплено на кювету, на рисунку не показано. Зображення процесів відображається на екрані 7, та фотографувалось. Розміри кювети склали 10x10мм, з висотою 40мм. При цьому у якості теплоносія було використано етиловий спирт.

В результаті первинних досліджень отримано зображення послідовного формування фронту зміни густини робочої рідини (Рис.2).

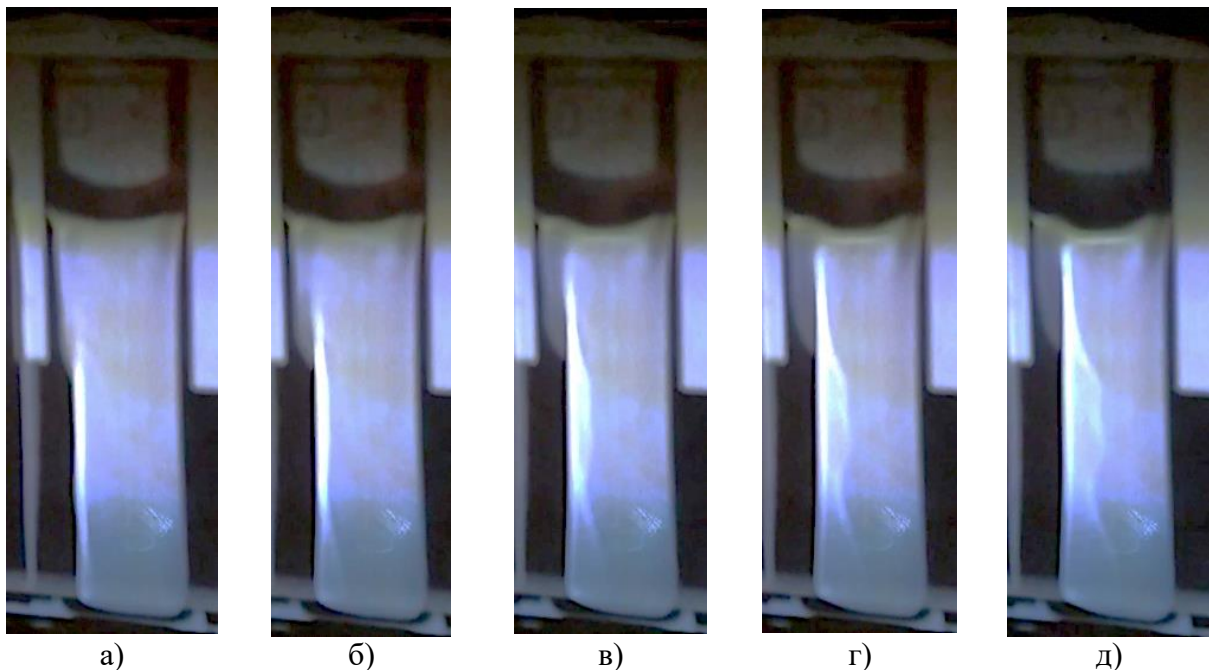


Рисунок 2 – Загальний вигляд поступового формування примежового шару в плоскопаралельній кюветі при підведеному тепловому потоці 2Вт, з періодом в 20 секунд.

З рисунку добре видно, що фронт має форму з двома піками, один з яких знаходиться ближче до дна, інший на висоті близько 2/3 висоти зони нагріву.

Засвічена область на рисунку є межею зміни густини рідини, оскільки при зміні температури змінюється кут заломлення світла, що проходить скрізь неї. Таким чином можна побачити як тепловий примежовий шар (засвічена область), так і гідродинамічний (при лівій стінці чітко видно затемнену область).

**Висновки.** У результаті така форма пограничного шару демонструє, що область при дні є більш перегрітою, через малу швидкість руху рідини. Також це може пояснювати, чому під час «запуску» термосифону основна частина рідини зони нагріву закидається у зону охолодження.

#### Перелік посилань:

1. Y. Hua, J. Qu, W. Yang, T. Zhang та Y. Zhao, Thermal characteristics of a two-phase loop thermosyphon with micro-grooved structures inside the evaporator, *Int. J. Heat Mass Transfer*, t. 224, art no. 125357, Jun. 2024.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125357>

2. M. B. H. Mantelli, Thermosyphon heat exchangers, in *Thermosyphons and Heat Pipes: Theory and Applications*. Cham: Springer Int. Publishing, 2021, p. 343–362. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-62773-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-62773-7_9)

3. J. Bonse, S. V. Kirner та J. Krüger, Laser-Induced periodic surface structures (LIPSS), *Handbook of Laser Micro- And Nano-Engineering*. Cham: Springer Int. Publishing, 2020, p. 1–59. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-69537-2\\_17-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-69537-2_17-1)

<sup>1</sup> Аспірант 3 курсу Логвинюк М.О.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Новаківський Є.В.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ МОДЕРНІЗАЦІЇ КОТЛА ГМ-50-14 З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Перехід енергетичного сектору України на європейські стандарти роботи актуалізує питання екологічності котлів, що експлуатуються на ТЕС, ТЕЦ та АЕС. Енергетика України є базовою галуззю економіки, яка забезпечує функціонування основних промислових об'єктів. Одним з основних джерел виробництва теплової та електричної енергії в Україні та світі є ТЕЦ і ТЕС, на які припадає до 60% електроенергії, що виробляється у світі та до 35% в Україні [1-3]. У свою чергу, українські теплові електростанції використовують котли, що працюють на природному газі та мазуті для виробництва теплової та електричної енергії, на які припадає близько 17,8% всієї виробленої енергії [1-3]. Наразі електростанції зменшують використання природного газу у зв'язку з економічною та політичною ситуацією, але в міських умовах, згідно з показниками забруднення навколишнього середовища, природний газ є основним видом палива.

**Аналіз останніх досліджень.** На практиці більшість котельного обладнання, що експлуатується на сьогоднішній день ці показники перевищує [4]. Серед методів зниження оксидів азоту є основні методи [4]:

1. Малотоксичні пальники
2. Триступінчасте спалювання палива (відновник – вугілля);
3. Триступінчасте спалювання палива (відновник – природний газ);
4. Ступеневе спалювання палива ;
5. Рециркуляція димових газів;
6. Селективне некаталітичне відновлення (СНКВ);
7. Селективне каталітичне відновлення (СКВ).

**Формулювання мети.** Зниження концентрації оксидів азоту та розподіл теплового навантаження по висоті топки за рахунок розподілення кількості повітря по ярусах пальників (ступеневе спалювання палива). Для аналізу робіт з модернізації промислових котлів з точки зору модернізації (налаштування) пальникових пристроїв на існуючих котлах розглядається декілька методів перерозподілу повітря між двома ярусами пальників (організації ступеневого спалювання) для котла ГМ-50-14.

При постійній рівномірній подачі палива перерозподіляється повітря між двома ярусами пальників. Матриця перерозподілу повітря представлена в Таблиці 1. Для зменшення температури в зоні активного горіння (міжфакельному просторі) повітря з нижнього ярусу частково подається на верхній ярус. За рахунок неповноти згорання палива першого ярусу температура в ЗАГ знижується тим самим зменшується утворення повітряних  $\text{NO}_x$ .

Таблиця 1 – Матричні значення розподілення повітря по ярусам пальників із додатковими соплами третинного повітря

№	Матричні значення										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ярус пальників	Коефіцієнт надлишку повітря										
#1	1,05	1,0	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55
#2	1,05	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	0,95
Сопла третинного повітря			0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,45	0,5	0,6

Таблиця 2 – Матричні значення розподілення повітря по ярусам пальників із додатковими соплами третинного повітря

№	Матричні значення								
	12	13	14	15	16	17	18	19	
Ярус пальників	Коефіцієнт надлишку повітря								
#1	0,,9	0,875	0,85	0,825	0,8	0,775	0,725	0,7	
#2	0,9	0,875	0,85	0,825	0,8	0,775	0,725	0,7	
Сопла третинного повітря	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,7	

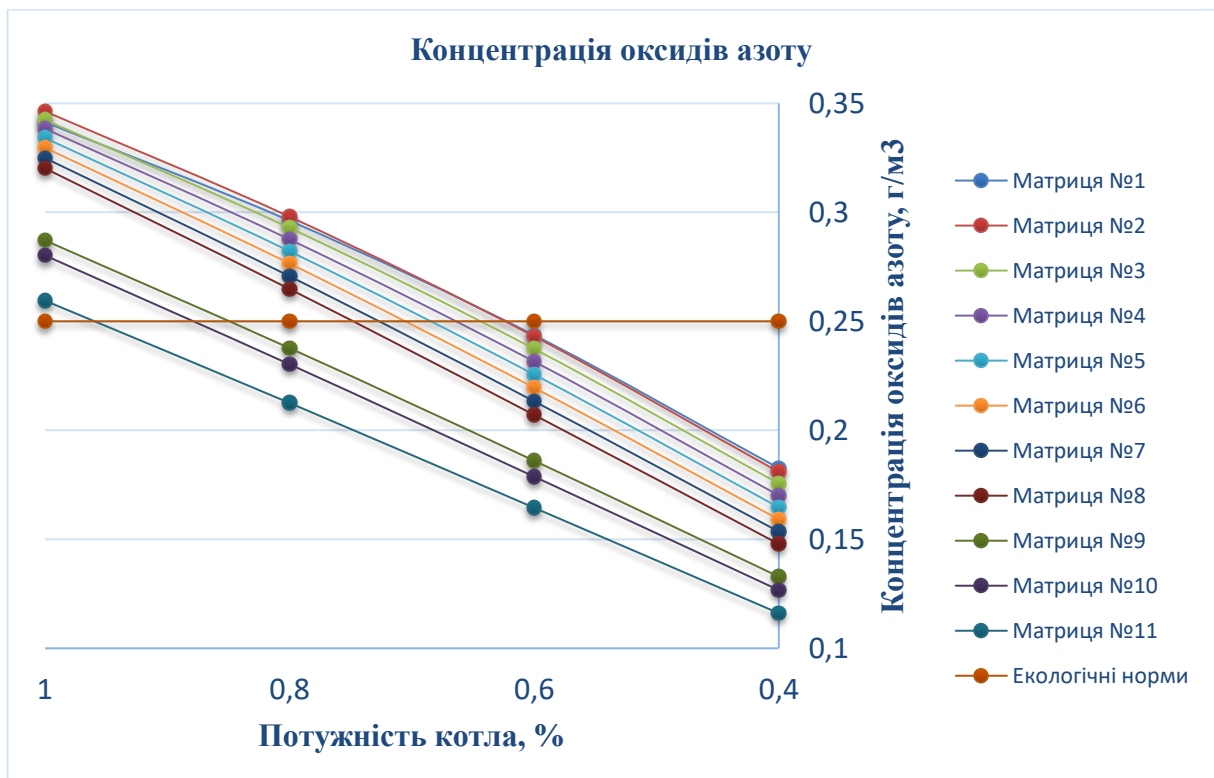


Рисунок 1 – Зміна концентрації оксидів азоту в залежності від потужності котла (результати розрахунків матриць 1-11)

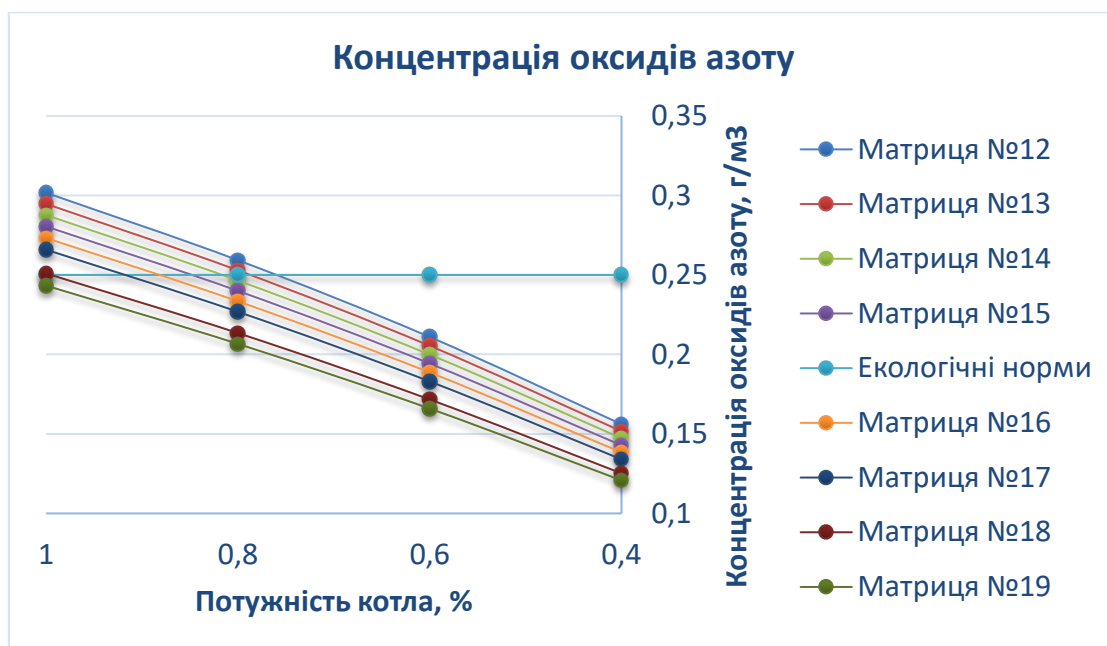


Рисунок 2 – Зміна концентрації оксидів азоту в залежності від потужності котла (результати розрахунків матриць 12-19)

**Висновки.** Аналізуючи значення отримані для матричних даних №1-11, можна зробити висновки, що в залежності від потужності котла, зміна концентрації оксидів азоту змінюється лінійно, та при зміні коефіцієнту надлишку на ярусах пальників, утворення оксидів азоту зменшується, що обумовлено зниженням температури на кожному розрахунковому ярусі пальників, і в цілому зони активного горіння.

При поступовому зменшенні надлишку повітря на нижній ярус, до граничного, спостерігається різкий перепад із зменшення утворення оксидів азоту, і також при різкому зростанні хімічного недопалу, що обумовлено критичним надлишком повітря, що обумовлено необхідною неповнотою змішування газоповітряної суміші в зоні активного горіння.

Для детальнішого розуміння та знаходження діапазон значення граничного коефіцієнта надлишку повітря було додано додаткові матричні значення. При цьому можна спостерігати, що граничне значення знаходиться в діапазоні 0,7-0,75.

**Перелік посилань:**

1. E.U. Parliament, Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), Off. J. Eur. Union 334 (2010) 17.
2. I. Volchyn, N. Dunaievskaya, L. Haponych, M. Cherniavskiy, O. Topal, Y. Zasiadko, Prospects for the Introduction of Clean Coal Technologies in the Energy Sector of Ukraine, Coal Energy Technology Institute, Kyiv, Ukraine, 2013, p. 308, 978-966-8840-97-5.
3. Lohvyniuk M., Novakivskiy Y. "CFD modeling of thermal processes in the firebox and heat load distribution on the screen surface firebox." Heliyon (2024).
4. M. Lohvyniuk, Y. Novakivskiy, Decreasing NOx emissions by way of the staged fuel combustion, NTU "KhPI" Bull.: Power Heat Eng. Processes Equip. 3 (2021) 18–23, <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.03.03>

<sup>1</sup> Аспірант 1 курсу Новосад Ю.І.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Воробйов М.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=mxNIgEoAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ШТУЧНОГО МЕТАНУ З ВІДХОДІВ ТА БІОМАСИ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Пошук стійких і відновлюваних джерел енергії спонукав до розробки технологій перетворення відходів біомаси в цінне паливо. Перехід до відновлюваних джерел енергії вимагає розробки інноваційних технологій, здатних перетворювати відходи біомаси в альтернативні види палива. У цій роботі представлений передовий підхід до штучного виробництва метану, що поєднує газифікацію киснем з реакцією Сабатьє і заснований на емпіричних дослідженнях останніх років[1]. У роботі представлено інновації в кисневій газифікації як засіб підвищення ефективності штучного виробництва метану, особлива увага приділяється визначенню граничних температур горіння, оптимізації спалювання суміші СО і СО<sub>2</sub> і застосуванню реакції Сабатьє в системах кисневої газифікації.

Сучасні дослідження щодо енергетичної стійкості все більше зосереджуються на перетворенні відходів біомаси у відновлювані види палива. Технологія отримання штучного метану значно просунулася вперед, особливо завдяки процесу газифікації. Поточне дослідження спрямоване на вдосконалення процесу газифікації з використанням кисню, який забезпечує більш високу теплотворну здатність синтез-газу і полегшує подальшу реакцію каталітичного метанування.

**Аналіз останніх досліджень.** Розроблення кисневого газифікатора, що працює за принципом часткового окислення є актуальною задачею виходу рибництва відновлювальних палив на теперішній час. Такі системи використовують чистий кисень замість повітря, що значно покращує процес газифікації за рахунок збільшення теплотворної здатності синтез-газу і мінімізації розведення азотом. Дослідженнями визначають оптимальні межі температури горіння в залежності від характеристик палива з використанням термогравіметричного аналізу і просунутого комп'ютерного моделювання гідродинаміки. Точний контроль порогових значень температури забезпечує максимальний вихід синтез-газу при збереженні цілісності палива. Використовуючи інформацію про конфігурації газифікатора низхідного потоку, детально описано [2] (див. рис 1). Моя експериментальна установка являє лабораторний кисневий газифікатор. Установка спроектована для визначення оптимальних температур газифікації, критичних для різних видів сировини з біомаси, з використанням вдосконаленого термогравіметричного аналізу. Покращений контроль процесу газифікації дозволяє використовувати індивідуальний підхід для максимального підвищення якості та кількості синтез-газу.

Спалювання ретельно контрольованої суміші СО отриманої в процесі газифікації, досягається за допомогою реакційної камери, спеціально розробленої для підтримки реакції Сабатьє. За рахунок каталітичного перетворення СО і СО<sub>2</sub> в метан і воду при високих температурах система не тільки покращує вихід метану, але і сприяє загальній енергоефективності процесу. Було виявлено, що продуктивність газифікатора, включаючи ефективність перетворення вуглецю та ефективність холодного газу, значно покращилася. Отриманий метан, проаналізований за допомогою газової хроматографії, показав рівні чистоти, які роблять його придатним для комерційного використання, як передбачає модель піролізу полум'я Сараванакумара [3]. Інтеграція газифікації киснем і реакції Сабатьє, як

показано в дослідженнях [4] і [5], являє собою новий синтез Технологій, який збільшує виробництво метану. Помітно знижується утворення смол і твердих частинок, зазвичай пов'язаних зі звичайною газифікацією повітря. Крім того, видалення азоту з газифікуючого агента призводить до отримання синтез-газу більш високої якості, що, в свою чергу, полегшує подальше виробництво метану по реакції Сабатьє. Використання чистого кисню замість повітря як газифікуючого агента вирішує проблему розведення азоту та утворення смоли. Крім того, розроблена система дозволяє переробляти більш широкий спектр видів біомаси, включаючи новий гібридний міскантус, що розмножується насінням, який має сприятливі характеристики газифікації.

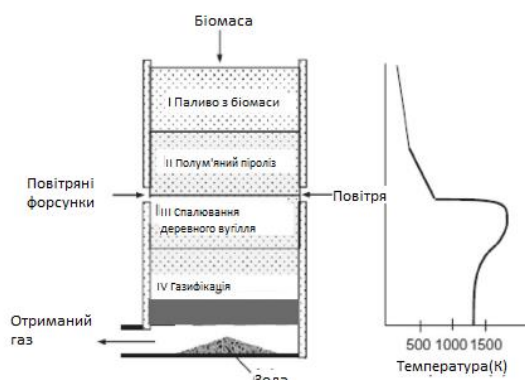


Рисунок 1 – Схематичний вигляд газифікатора з рухомих шаром без горловини з низхідним потоком (зліва) з градієнтом температури по висоті (праворуч)

**Мета досліджень.** Дослідження будуть містити значну наукову новизну в галузі енергетики, та будуть науковим проривом в області технологій переробки відходів з біомаси. Оптимізуючи ключові параметри, такі як коефіцієнт еквівалентності і температура горіння буде розроблено кисневий газифікатор на основі реакції Сабатьє, для ефективного способу отримання штучного метану.

**Висновки.** Інноваційні підходи до газифікації біомаси киснем є наріжним каменем досліджень. Використовуючи чистий кисень замість повітря, покращується процес газифікації, в результаті чого отримується синтез-газ з вищою калорійністю та зниженим вмістом азоту. Це не тільки покращує ефективність виробництва метану, але й сприяє загальній енергетичній стабільності процесу. Важливим аспектом роботи є ретельна оптимізація температур горіння. Використовуючи розширений термогравіметричний аналіз і моделювання обчислювальної гідродинаміки, будуть визначені оптимальні температурні режими для різних видів палива з біомаси та відходів. Така точність контролю температури максимізує вихід синтетичного газу, зберігаючи цілісність палива. За допомогою реакції Сабатьє буде забезпечено контроль згорання суміші CO та CO<sub>2</sub>, отриманої в результаті газифікації.

#### Перелік посилань:

1. Khan, Z. et al. (2022) Design, instrumentation, and operation of a standard downdraft, laboratory-scale gasification testbed utilising novel seedpropagated hybrid Miscanthus pellets. Applied Energy.
2. 2020 Design, construction and operation of a low-tar biomass (LTB) gasifier for power applications MD Mashiur Rahman, Ulrik Birk Henriksen, Jesper Ahrenfeldt, Maria Puig Arnavat.
3. Flaming pyrolysis model of the fixed bed cross draft long-stick wood gasifier A. Saravanakumar a, T.M. Haridasan b, Thomas B. Reed.
4. Experimental investigation of a “throatless” downdraft gasifier with palm kernel shell A. Kuhe, H. A. Iortyer, and E. I. Kucha.
5. CFD analysis of biomass gasification using downdraft gasifier Bhoopendra Pandey, K. Yogesh Prajapati a, N. Pratik Sheth.

<sup>1</sup> Мол. вчений Шепель Г.С.

<sup>1</sup> Проф., д.т.н. Кравець В.Ю.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=18nJrv0AAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ФАКТОРІВ НА ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОФАЗНОГО ТЕРМОСИФОНУ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Сучасні тенденції підвищення функціональних можливостей приладів та обладнання при одночасному збільшенні потужності приводить до ситуації, коли може бути перевищений їхній безпечний температурний режим роботи. Це вимагає розроблення нових систем забезпечення заданих температурних режимів елементів устаткування, які ефективно відводять значні теплові потоки. На даний час такими перспективними елементами для відведення теплової енергії є теплові труби і термосифони [1–2]. Це автономні пристрої, в яких застосовується випаровувально-конденсаційний спосіб відводу теплоти. Однією з важливих вимог до таких систем є здатність передавати значні питомі навантаження при одночасному забезпеченні заданих робочих температур елементів обладнання. Таким якість повністю відповідають теплові труби і термосифони. Однак термосифони прості у виготовленні і мають значно більшу еквівалентну теплопровідність у порівнянні з тепловими трубами. Більшість дослідників ведуть пошук методів створення термосифонів з оптимальними характеристиками, які б відповідали заданим режимам роботи устаткування. Вивчення процесів теплопередачі в термосифонах загалом дає розуміння роботи конкретних варіацій приладів на їх основі, а також їхніх переваг та недоліків. Тому виникає необхідність визначення параметрів, що впливають на теплопередавальні характеристики термосифонів.

### **Аналіз останніх досліджень.**

Перший патент на теплопередавальний пристрій у вигляді однофазного термосифону отриманий ще 1892 року – трубка Перкінса, а на початку ХХ сторіччя перші двофазні термосифони були використані як нагрівальні елементи у печах хлібопекарні [3]. Наразі термосифони використовують у теплообмінних пристроях в різноманітних сферах промисловості та побуту. Останніми роками проведені дослідження тепло-масопереносу для термосифонів різних конструкцій, з яких відомо, що є певні обмеження умов їхньої експлуатації. До них можна віднести: в'язкість теплоносія, режими кипіння, можливість повного випаровування теплоносія або захлинання в зоні випаровування, тощо. Якщо об'єм теплоносія буде меншим від мінімально достатнього для того, щоб відвести потрібний тепловий потік, може відбутися часткове чи повне осушення зони нагріву, що призведе до перегріву поверхні зони підводу теплоти термосифону та потенційному руйнуванню конструкції. При низьких теплових потоках та максимальному затопленню зони випаровування знижується ефективність роботи термосифонів [4]. При високих теплових потоках, неправильному підборі теплоносія та його об'єму, та неспівмірних до них розмірах зони нагріву, процес кипіння стає нестійким, що може призвести до аварійної роботи термосифонів.

**Формулювання мети.** Експериментальне дослідження визначення впливу довжини зони нагріву термосифону з внутрішнім діаметром 9мм на його теплопередавальну здатність.

**Основна частина.** До основних теплопередавальних характеристик випаровувально-конденсаційних систем (теплові труби, термосифони) відносяться мінімальний термічний опір  $R_{\min}$  і максимальний переданий тепловий потік  $Q_{\max}$ .

Це дослідження присвячене вивченню впливу довжини зони нагріву на залежність



величини термічного опору  $R$  від теплового потоку  $Q$ , що передається, мідного термосифону із внутрішнім діаметром  $d_{\text{вн}} = 9$  мм і довжиною 500 мм. Довжина зони конденсації була 200 мм, а зона нагріву змінювалася від 50 мм до 200 мм з кроком 50 мм. В якості теплоносія використовувалася вода. Коефіцієнт заповнення  $K_z$ , що дорівнює відношенню об'єму, займаного теплоносієм  $V_p$  до об'єму всієї зони нагріву  $V_{\text{зн}}$ , становив від 0,3 до 1,2. Зона конденсації омивалася водою з температурою  $20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  і постійною витратою  $0,8 \cdot 10^{-3}$  кг/с. Дослідження проводилися при вертикальному розташуванні термосифона. Температуру по всій довжині термосифона вимірювали за допомогою мідь-константанових термопар, які були припаяні до його зовнішньої стінки. Сигнал від термопар подавався на аналогово-цифровий перетворювач і далі на персональний комп'ютер. Система опитування показань термопар давала змогу фіксувати температуру в реальному часі з частотою 1Гц.

Проведені дослідження показали (Рис. 1), що для всіх довжин зон нагріву термічний опір термосифона монотонно зменшується до деякого стабільного мінімального значення (приблизно до 0,08 К/Вт). При малих теплових потоках (до  $\sim 30$  Вт) спостерігається область, де значення термічного опору перевищують мінімальний приблизно на порядок. Ця область характерна для формування теплового пограничного шару в рідині і початку бульбашкового кипіння. При цьому спостерігаються періодичні пульсації температури стінки термосифона в зоні нагріву, які досягають  $20^{\circ}\text{C}$  і більше. Поступове збільшення теплового потоку приводить до зменшення амплітуди пульсацій температури і стабілізації термічного опору на мінімальному значенні. Максимальне значення теплового потоку супроводжується різким підвищенням температури стінки в зоні нагріву і збільшенням термічного опору, що є ознакою появи парової плівки і зменшення інтенсивності тепловіддачі в цій зоні.

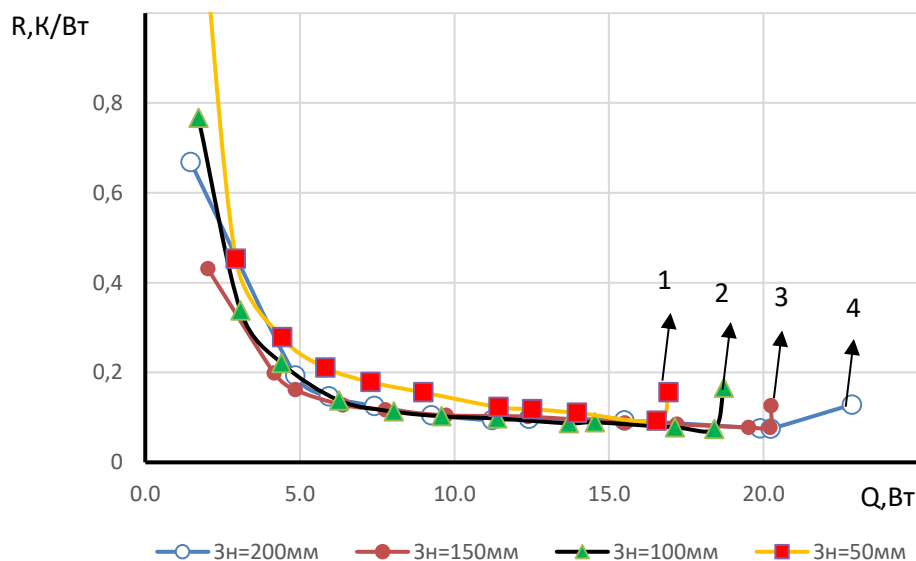


Рисунок 1 – Залежність повного термічного опору термосифону від теплового потоку, що передається (Коефіцієнт заповнення: 1 – 1,2; 2 – 0,6; 3 – 0,4; 4 – 0,3)

Як видно з Рис.1 мінімальний термічний опір для всіх  $K_z$  має приблизно однакові значення. Однак максимальні теплові потоки  $Q_{\text{max}}$  залежать від довжини зони нагріву і відповідно від  $K_z$ . Такий характер впливу довжини зони нагріву на  $Q_{\text{max}}$  можна пояснити тим, що змінюється густина теплового потоку. Так при довжині зони нагріву 200 мм, що відповідає  $K_z=0,3$ , густина теплового потоку при  $Q_{\text{max}}$  дорівнює  $40,4 \text{ кВт/м}^2$ , а коли маємо довжину  $Z_n=50$  мм то густина теплового по току при  $Q_{\text{max}}$  підвищується приблизно у три рази і дорівнює  $120,0 \text{ кВт/м}^2$ . Тому, вірогідність виникнення кризи кипіння у вигляді парової плівки у зоні нагріву при малій її довжині буде значно більшою, ніж при значно

більшій довжині. Однак значення  $Q_{\max}$  при довжинах зон нагріву 50 мм і 200 мм відрізняються не більше ніж у 1,5 рази (Рис. 2). Це значить, що є ще додаткові впливаючі фактори, які треба враховувати при створенні термосифонів з підвищеними теплопередавальними властивостями. До таких факторів можна віднести вплив кількості теплоносія у термосифоні, а також те, що при великих довжинах зони нагріву по частині її поверхні стікає плівка рідини із зони конденсації, яка може випаровуватися і не досягати нижньої частини зони нагріву. Тому виникнення там дефіциту теплоносія може привести до кризових явищ при малих густинах теплових потоків.

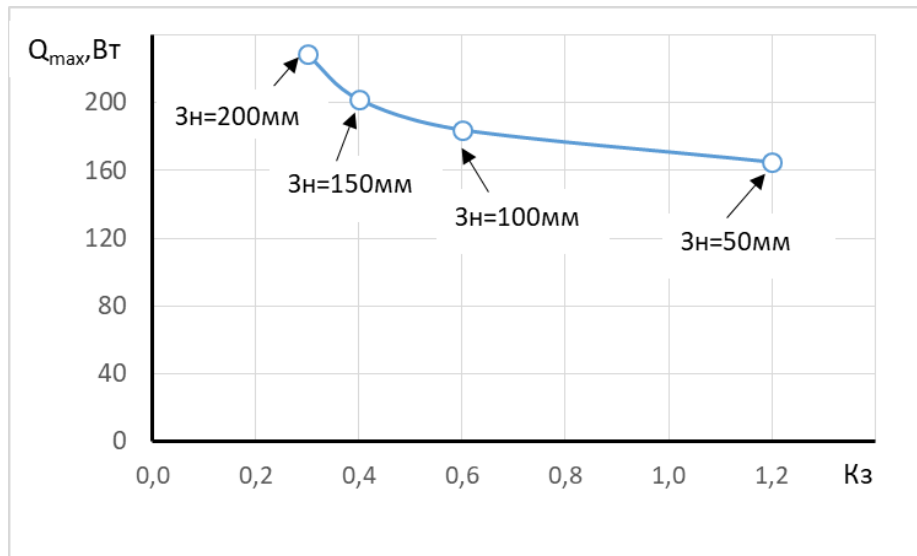


Рисунок 2 – Вплив коефіцієнта заповнення на максимальні теплові потоки термосифона

**Висновки.** Таким чином, проведені дослідження показали, що довжина зони нагріву термосифона з внутрішнім діаметром 9 мм і довжиною 500 мм практично не впливає на мінімальне значення термічного опору у широкому діапазоні теплових потоків. Але досить значний вплив цього фактору є на максимальні теплові потоки. Для розрахунку термосифонів з оптимальними теплопередавальними характеристиками для конкретних пристроїв слід враховувати досить велику кількість факторів. Таких як співвідношення довжин зон нагріву і конденсації, а також кількість теплоносія та його теплофізичні властивості.

**Перелік посилань:**

1. Кравець В.Ю. Процеси теплообміну у мініатюрних випарно-конденсаційних системах охолодження. Х.: ФОП Бровін О.В., 2018. 288 с.
2. Faghri, A. Heat Pipe Science and Technology, 2nd ed., Global Digital Press. 2016. 1013 P.
3. Безродный, М. К., Пиоро И. Л., Костюк Т. О.. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика – К.: Факт, 2005. – 704 с.
4. Zuo Z. J., Gunnerson F. S. Heat Transfer Analysis of an Inclined TwoPhase Closed Thermosyphon. J. Heat Transfer. 1995. Vol.117. P. 1073–1075.

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Гнатенко А.В.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Воробйов М.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=mxNIgEoAAAAJ&hl=ru>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩ ПРОТІЧОК ПОВІТРЯ НАЗОВНІ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТУ ЧАЕС

**Постановка проблеми та її актуальність.** Новий Безпечний Конфайнмент (НБК) є структурою, яка має захисне призначення, включаючи у себе обладнання для вилучення матеріалів зруйнованого 4-го енергоблоку ЧАЕС, що містять ядерне паливо, забезпечуючи при цьому безпеку персоналу, населення та навколишнього середовища, а також перетворення зруйнованого енергоблоку в екологічно безпечну систему. Щоб забезпечити безпеку персоналу, населення та навколишнього середовища, НБК має зовнішню і внутрішню оболонки, які не є повністю герметичними. Також місця ущільнення під західною та східною стінами НБК, а також будівельні конструкції під цими стінами, не є повністю герметичними. Оскільки в кільцевому просторі (КП) НБК підтримується надлишковий тиск (5-20 Па), а в основному об'ємі (ОО) — негативний тиск (мінус 5-10 Па), то основні протічки повітря з радіоактивними аерозолями (РА) стали наслідком проникнення повітря з ОО під стінами НБК і частково через оболонки НБК.

**Аналіз останніх досліджень.** Приклади визначення площ протічок повітря назовні з радіоактивним пилом за межі НБК наведені в роботах [1]. Характер цих площ протічок — це щілини в місцях з'єднання окремих листів обшивки.

В зазначених роботах прораховувались старі вибірки вимірювань, не враховувались пори року при обробці даних. Відповідно до висновків забудовника, в процесі експлуатації НБК ці площі будуть збільшуватись, що призведе до збільшення викидів повітря назовні.

**Формулювання мети.** Ціль даної роботи полягає в оцінці площ невідповідного витоку повітря з радіоактивними аерозолями в середину та за межі НБК у навколишнє середовище під стінами НБК.

**Основна частина.** Визначення площ протічок повітря назовні в цих областях (Рис. 1), вони є важливими параметрами для визначення обсягів витоків. Ці площі можуть бути визначені як розрахункові площі протічок з використанням моделі гідравлічного стану та експлуатаційних даних гідравлічного стану НБК.

На схемі поздовжнього перерізу (Рис.1) показані місця західних і східних протічок між стінами НБК і будівельними конструкціями.

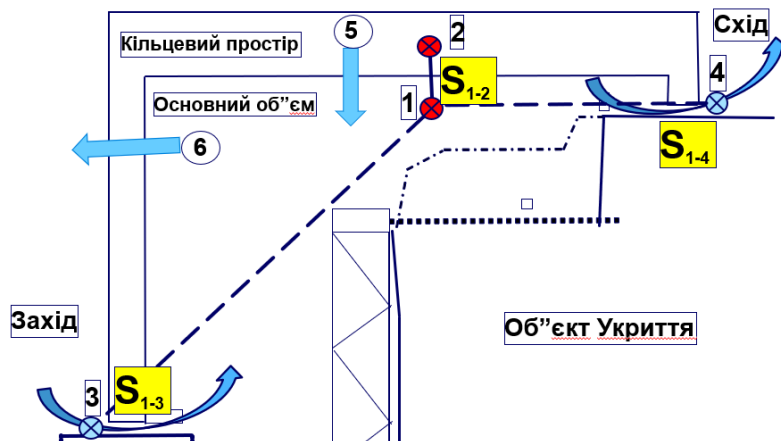


Рисунок 1 – Схема НБК в поздовжньому перерізі. На рисунку: 1 – основний об'єм; 2 – кільцевий простір; 3 – західна протічка; 4 – східна протічка; 5 – нагнітання в кільцевий простір та основний об'єм; 6 – витяжка з основного об'єму

Визначення розрахункових площ протічок НБК здійснюється за допомогою комп'ютерної моделі, яка базується на гідравлічному стані НБК та експлуатаційних даних. Така модель запропонована Інститутом технічної теплофізики НАН України (ІТТФ) [2]. Основу цієї моделі становлять рівняння Бернуллі [3], які модифікуються відповідно до вимог розрахунків гідравлічного стану НБК у наступному вигляді:

$$G = \mu \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho \cdot |\Delta P|}} \cdot \Delta P; \quad (1)$$

де  $G$  – витрата;

$\mu=0,6$  – коефіцієнт витрати;

$S$  – умовна площа протічки між вибраними частинами НБК і оточуючим середовищем;

$\rho$  – густина повітря;

$\Delta P$  – перепад статичних тисків.

Рівняння моделі відносно абсолютних значень тисків  $P$  в об'ємах КП і ОО витікають з балансу витрат повітря  $G$  між об'ємами НБК і оточуючим середовищем і мають наступний вигляд:

$$P_{\text{КП}} = \frac{R_{\text{КП-ОО}} \cdot P_{\text{ОО}} + G_{\text{КП}}^+}{R_{\text{КП-ОО}}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{ОО}} = \frac{R_{\text{КП-ОО}} \cdot P_{\text{КП}} + R_{\text{ОО-ЗП}} \cdot P_{\text{ЗП}} + R_{\text{ОО-СП}} \cdot P_{\text{СП}} + G_{\text{ОО}}^+ + G_{\text{ОО}}^-}{R_{\text{КП-ОО}} + R_{\text{ОО-ЗП}} + R_{\text{ОО-СП}}}, \quad (3)$$

де  $G^+$  і  $G^-$  – витрати нагнітаючих і витяжних ВУ в КП і ОО.

Система двох рівнянь (2)-(3) записується для кожного вимірювання  $i=1, \dots, n$  гідравлічних параметрів НБК, і одночасно розв'язується відносно  $P_{\text{КП}}$  і  $P_{\text{ОО}}$  (2)-(3) для всіх вимірювань  $n$ , одержаних від ЧАЕС.

Визначення умовних площ протічок  $S$  між об'ємами НБК і місцями протічок між ОО і навколишнім середовищем відбувається за алгоритмом ідентифікації [4], згідно з яким знаходяться такі значення  $S$ , для яких середньоквадратичне відхилення  $F$  в (4) розрахункових  $\Delta P_{j,i}^{\text{МОД}}$  і замірених  $\Delta P_{j,i}^{\text{ВИМ}}$  перепадів тиску стане менше за  $\delta$ :

$$F = \left[ \sum_{j=1}^M \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta P_{j,i}^{\text{ВИМ}} - \Delta P_{j,i}^{\text{МОД}})^2}{N}} \right] / M \leq \delta, \quad (4)$$

де  $\Delta P_{j,i}^{\text{ВИМ}}$  вимірених, а  $\Delta P_{j,i}^{\text{МОД}}$  розрахунковий перепади тисків для  $i$ -го вимірювання ( $i=1, \dots, N$ )  $j$ -го датчика ( $j=1, \dots, M$ ), КП-ОО, ОО-ЗП та ОО-СП.

$N$  – кількість вимірювань,  $M$  – кількість датчиків;

$\delta$  – середня похибка вимірювання перепадів тиску (прийнята 1,5 Па).

Умова (4) відображає відповідність моделі (1)-(3) реальному об'єкту НБК, оскільки модель забезпечує повний баланс повітряних потоків та розрахункові перепади тисків, що близькі до фактичних значень, виміряних в НБК.

Були знайдені площі протічок з використанням моделі гідравлічного стану та експлуатаційних даних гідравлічного стану НБК:  $S_{1-2} = 7,94 \text{ м}^2$ ;  $S_{1-3} = 2,84 \text{ м}^2$ ;  $S_{1-4} = 1,90 \text{ м}^2$ .

Результати розрахунку площ протічок представлені для вибірки вимірювань в часі з використанням моделі гідравлічного стану та експлуатаційних даних гідравлічного стану НБК у вигляді графіків для КП-ОО та КП-ОС (Рис. 2 і 3):

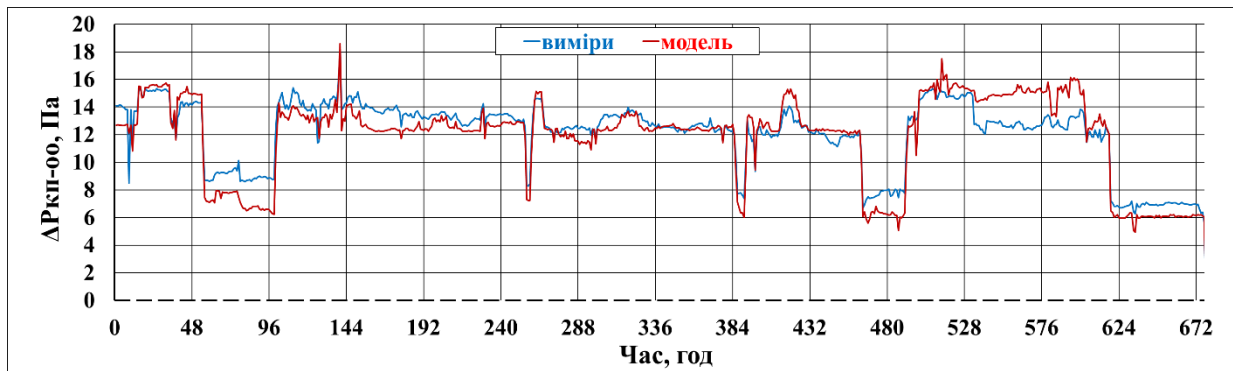


Рисунок 2 – Залежність перепадів тисків КП-ОО від часу. Синя лінія – експлуатаційні дані ЧАЕС, червона лінія – модель з розрахунковими площами протічок

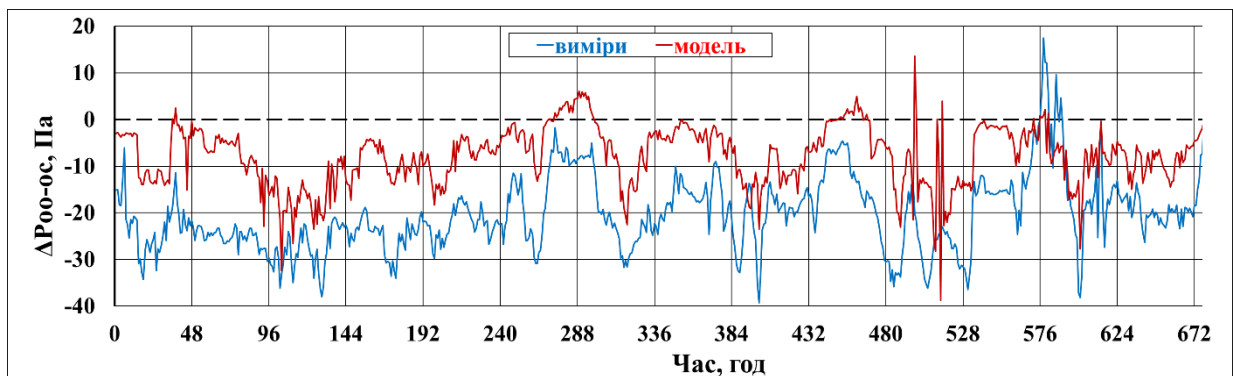


Рисунок 3 – Залежність перепадів тисків ОО-ОС від часу. Синя лінія – експлуатаційні дані ЧАЕС, червона лінія – модель з розрахунковими площами протічок

Дана вибірка є прикладом лиш одного періоду часу експлуатації. Такі дані ЧАЕС надсилає достатньо часто, щоб мати можливість слідкувати за станом НБК. Пошук площ протічок є дуже важливою складовою обробки даних. Оскільки зміна площ протічок безпосередньо впливає на кількість викиду повітря разом з радіоактивним пилом із основного об'єму з НБК назовні.

**Висновки.** Підсумовуючи, за допомогою моделі гідравлічного стану та експлуатаційних даних гідравлічного стану НБК, були знайдені нові значення площ протічок. Це є дуже важливою роботою, оскільки НБК є захисною спорудою, що забезпечує безпеку персоналу, населення і оточуючого середовища.

#### **Перелік посилань:**

1. Міжнародна конференція «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища» INUDECО 2017-2023, Славутич, Україна, <https://inudeco.pro/>

2. Складенко Д.І, Круковський П.Г, Дядюшко Є.В. Модель вітрового обтікання та розподілу тисків на поверхнях Нового безпечного конфайнмента ЧАЕС // VII міжнародна конференція «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища» INUDECО, 27–28 квітня, 2022 р., м. Славутич, Україна. – с.79-81.

3. Т.М. Башта. Гидропривод и гидропневмоавтоматика // книга по требованию. – М: изд-во «ЕЭ Медиа». – 2012. – 317с.

4. Круковский П.Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход). – Киев, Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998. – 218 с.

## УДК 621.1

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Джабборов В.А.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Філатов В.І.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

### ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ NO<sub>x</sub> ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕЦІАЛЬНИХ ПАЛЬНИКІВ

**Постановка проблеми та її актуальність.** В умовах активної експлуатації електростанцій на основі органічного палива ми зіткнулися із проблемою забруднення навколишнього середовища. Згідно до вимог Директиви 2001/80/ЄС про обмеження викидів деяких забруднюючих речовин у повітря від великих спалювальних установок (далі – Директива 2001/80/ЄС). Обмеження викидів оксидів азоту входить до цих зобов'язань. Згідно з даними Державної служби статистики України, викиди оксидів азоту в Україні в 2020 році склали 621,2 тис. тон. Для вирішення проблеми надмірного збільшення викидів NO<sub>x</sub> країна почала впроваджувати нові технології.

**Аналіз останніх досліджень.** Вирішення проблеми зниження оксидів азоту при спалювання органічного палива в котлах можливо як за допомогою застосування комплексних очисних установок, так і за допомогою режимно – конструктивних заходів, які впроваджуються безпосередньо на котлі.

**Формулювання мети.** Спеціальні пальники як режимно – конструктивний захід має свої переваги у вирішенні проблеми. Ці пальники мають конструкцію, яка оптимізує процес горіння, щоб зменшити утворення NO<sub>x</sub>. До них відносяться пальники з попереднім змішуванням палива та повітря, пальники з рециркуляцією димових газів, пальники з багатоступеневим горінням.

**Основна частина.** Для прикладу розглянемо пальники марки Saacke LONOX UCC, SOLEX COMBUSTION SYSTEM.

Багато конкурентів впроваджують заходи для скорочення викидів NO<sub>x</sub>, але ці методи часто мають такі недоліки: надлишок O<sub>2</sub> (високий рівень кисню, що може негативно вплинути на процес горіння та призвести до неефективного використання палива), високий рівень CO (підвищений рівень чадного газу, який є небезпечним для здоров'я людей). Значне скорочення викидів оксиду азоту часто можна досягти за допомогою традиційних або альтернативних методів. Традиційні методи: SCR (селективне каталітичне відновлення): використовує каталізатор для перетворення NO<sub>x</sub> на азот і воду, SNCR (селективне некаталітичне відновлення): впорскує реагент, який вступає в реакцію з NO<sub>x</sub>, утворюючи азот і воду. Альтернативи: Система SAACKE LONOX UCC: ефективна та економічна система, яка не потребує SCR або SNCR, пальник SOLEX: досягає 5 ppm викидів NO<sub>x</sub>, незалежно від палива та температури печі.

Однак всі ці опції збільшують витрату палива, матеріальні витрати і використання необхідних присадок за рахунок оператора. У каталітичному відновленні збільшується витрата палива через необхідність підтримувати високу температуру для роботи каталізатора, також вимагаються дорогі каталізатори, які потребують періодичної заміни і збільшується витрата матеріалів, таких як реагенти для очищення SCR. Що до некаталітичних відновлень ситуація схожа: збільшується витрата палива через необхідність впорскування реагенту, вимагається реагенти, які можуть бути дорогими, залежно від типу та обсягу, збільшується експлуатаційні витрати, пов'язані з впорскуванням та зберіганням реагенту.

На відміну від цього, система SAACKE LONOX UCC (Ultra Clean Burning) заснована на перевірених і перевіреній на практиці технології(Рис. 1).

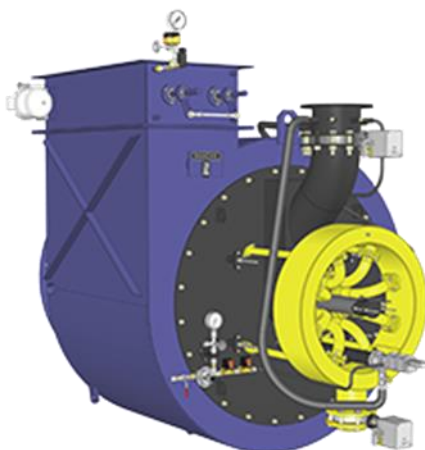


Рисунок 1 – Пальник SAACKE LONOX UCC

Пальник економічно і ефективно спалює всі стандартні види газоподібного палива відповідно до граничного значення  $30 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$  на основі  $3,0\%$  сухого  $\text{O}_2$  – і все це при низькій швидкості рециркуляції димових газів  $< 25\%$ [1]. Це було підтверджено німецьким TÜV (Органом технічного контролю) на основі незалежних вимірювань. Він оснащений однією газовою магістраллю.

Дотримання встановлених законом меж викидів можливе завдяки спеціальній закрученій геометрії полум'я (завдяки закрученій формі полум'я паливо згоряє більш ефективно, що мінімізує викиди  $\text{NO}_x$ ), а також спеціально розробленій системі контролю полум'я (ця система оптимізує процес горіння, гарантуючи економне та екологічне спалювання палива). Завдяки інноваційним технологіям пальник SAACKE LONOX UCC відповідає найсуворішим екологічним стандартам – це робить його екологічно чистим та економічно вигідним вибором.

Пальник SOLEX може досягати  $5 \text{ ppm}$  викидів  $\text{NO}_x$  незалежно від складу палива (пальник може працювати з різними типами палива, включаючи природний газ, біогаз, зріджений нафтовий газ та інші.) та незалежно від температури печі. Пальник розроблено з двома значними зонами згорання для досягнення цих рівнів викидів від запуску до повної потужності з мінімальні викиди  $\text{CO}$ . Крім того, компактна довжина полум'я пальника вирішує багато проблем, технології пальника з наднизьким викидом  $\text{NO}_x$  обличчя на ринку сьогодні[2]. Ця система має переваги у надійності (стабільне та ефективне горіння при будь-якій температурі печі), екологічності (захист довкілля за рахунок мінімізації викидів  $\text{NO}_x$ ) і економії (зниження витрат на екологічні платежі).

**Висновки.** Системи SAACKE LONOX UCC, SOLEX COMBUSTION SYSTEM – це не тільки низькі викиди  $\text{NO}_x$  і відповідає найсуворішим екологічним стандартам, але й має низькі інвестиційні витрати, економію палива, низькі експлуатаційні витрати та швидку окупність інвестицій.

**Перелік посилань:**

1. Пальники Saacke LONOX UCC <https://empireltd.com.ua/gorelki-saacke-lonox-ucc/> (дата звернення: 21.03.2024).
2. John Zink Hamworthy Combustion. URL: [https://www.johnzinkhamworthy.com/wp-content/uploads/JZH\\_SOLEX\\_Burner\\_Flyer\\_04-22\\_FINAL.pdf](https://www.johnzinkhamworthy.com/wp-content/uploads/JZH_SOLEX_Burner_Flyer_04-22_FINAL.pdf) (дата звернення: 21.03.2024).

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Павлачик В.С.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Воробйов М.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=mxNIgEoAAAAJ&hl=ru>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА НА ГАЗОВИХ ПАЛИВАХ РІЗНОГО ПОХОДЖЕННЯ

**Постановка проблеми та її актуальність.** В умовах зростання цін на енергоресурси та посилення екологічних проблем, актуальним стає питання підвищення ефективності роботи водогрійних котлів, що використовуються для опалення житлових та промислових приміщень. Одним із напрямків вирішення цієї проблеми є дослідження та впровадження нових видів газового палива, які можуть забезпечити більш економне та екологічне спалювання. зростання цін на природний газ, який традиційно використовується в водогрійних котлах, робить його експлуатацію все більш затратною. Використання альтернативних видів газового палива, таких як біогаз, звалищний, газогенераторний, доменний, коксовий може призвести до значного зниження витрат на опалення.

**Аналіз останніх досліджень.** Традиційно для опалення житлових та промислових приміщень використовуються водогрійні котли, що працюють на природному газі. Проте, зростання цін на енергоресурси та посилення екологічних проблем роблять актуальним питання використання альтернативних видів газового палива. До альтернативних газів, які можуть використовуватися у водогрійних котлах, відносяться: звалищний газ [1], газогенераторний [2], доменний та коксовий газ [3].

**Формулювання мети.** Виконання оцінок характеристик роботи водогрійного котла при його роботі на альтернативних газових паливах різного походження.

### Основна частина.

#### 1. Вибір досліджуваних палив:

Для дослідження будемо використовувати чотири типи газового палива:

- Звалищний газ: продукт анаеробного розкладання органічних речовин на звалищах твердих побутових відходів.
- Газогенераторний газ: паливо, яке отримується в процесі газифікації твердого палива (вугілля, біомаси).
- Доменний та коксовий газ: паливні гази, які утворюються як технологічні гази металургійних виробництв.

2. Методика дослідження: Буде використано розрахунково-теоретичний метод. Цей метод базується на відомих законах теплообміну та аеродинаміки, які використовуються для розрахунку котельних агрегатів. Передбачається виконати наступні етапи робіт:

- Визначення характеристик кожного виду палива (теплотворна здатність, склад, температура горіння).
- Розрахунок показників ефективності роботи котла на кожному виді палива (ККД, теплова потужність, витрата палива, емісія шкідливих речовин).
- Порівняння показників ефективності роботи котла на різних видах палива.

#### 3. Критичні показники ефективності:

- Емісія шкідливих речовин: утворення оксидів азоту.



Планується виконати повіркові розрахунки роботи водогрійного котла при роботі на різних видах газових палив на прикладі жаротрубного котла КОЛВІ-600 (Рис.1.)

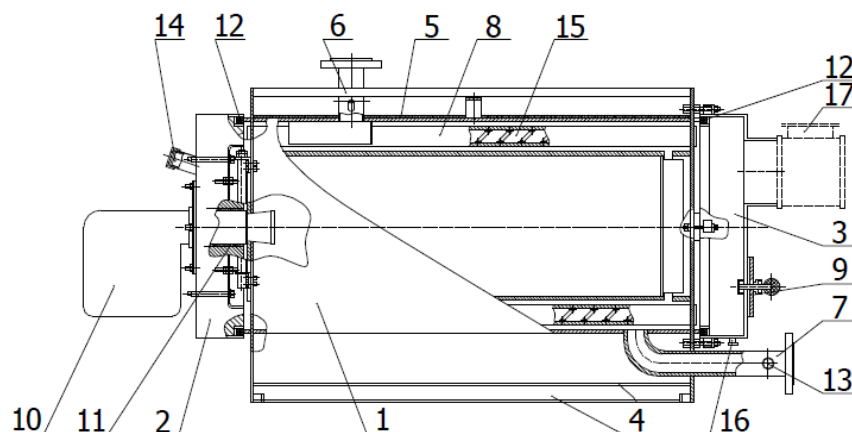


Рисунок 1 – Газовий водогрійний котел КОЛВІ-600.

1. Корпус; 2. Дверцята топки; 3. Короб димових газів; 4. Опора; 5. Теплоізоляція;
6. Вихідний патрубок; 7. Вхідний патрубок; 8. Жарова труба; 9. Шлюз чищення короба димових газів; 10. Пальник; 11. Ущільнення; 12. Шнур ущільнювальний; 13. Дренажний патрубок; 14. Оглядове вікно; 15. Турбулізатори; 16. Патрубок дренажу конденсату;
17. Запобіжний вибуховий клапан.

Параметри роботи котла представлено в табл. 1

Таблиця 1 – Характеристики газового водогрійного котла КОЛВІ-600.

Параметри	Одиниця виміру	Значення
Номінальна продуктивність	Квт	698
Витрата природного газу	м. куб/год	81,0
Витрата дизпалива	кг/годину	62,1
Максимальна температура нагріву води	З	115
Поверхня нагріву	м. кв.	13,02
ККД	%	92
Максимальний робочий тиск води	Бар	5
Маса котла	Кг	1570
Обєм води в котлі	Л	800

**Висновки.** Вибір методу дослідження залежить від поставлених задач, доступних ресурсів та необхідної точності результатів. Повірковими розрахунками буде встановлено можливість роботи котла на альтернативних газах.

**Перелік посилань:**

1. Пятничко, А.И., Жук, Г.В. (2010). Результат обследования полигонов ТБО Украины для установления объемов добычи и состава биогаза. // Технические газы, №2. – С. 63-66.
2. Антошук Т.А., Пьяных К. Е. (2010) Анализ результатов промышленной эксплуатации газогенератора комбинированного типа. // Энергетика, № 4. - С. 43-50.
3. Soroka B. (2013) Development of Combined Power and Environmental Fundamentals of Natural Gas Substitution for Alternative Combustible Gases // International Journal of Energyfor a Clean Environment (IJECE). Vol. 14, No 2–3. – P. 91–11

<sup>1</sup> Бакалаврант 2 курсу Андреечкін А.А.; <sup>1</sup> Бакалаврант 2 курсу Плетень М.Д.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Гавриш А.С.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=FNHVtwYAAAAJ&hl=ru>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ПРИНЦИП ОТРИМАННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ СУПЕРГІДРОФОБНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ КОНДЕНСАЦІЇ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Конденсація належить до високо інтенсивних процесів теплообміну. Водяна пара і вода є найбільш розповсюдженими теплоносіями, які широко використовуються в різних галузях, таких як, теплоенергетика, металургія, будівництво, транспорт та ін. Окрім переваг застосування конденсації водяної пари, існує ряд супутніх питань, які потребують уваги. Наприклад, наявність корозійно-ерозійних процесів знижує ефективність роботи обладнання [1]. Теплотехнічні системи, такі як, опріснювальні та холодильні установки, кондиціонери, електростанції та інші, потребують довготривалого надійного застосування робочих поверхонь, здатних високо ефективно працювати при мінімізації експлуатаційних затрат. Актуальність проблеми полягає в пошуку новітніх методів захисту теплообмінних поверхонь, контролю і керування конденсаційними процесами із одночасним запобіганням можливих негативних супутніх явищ.

**Аналіз останніх досліджень.** Останні дослідження науковців в світі все більше зосереджують увагу на стику різних наук. Наприклад, інформація у галузі матеріалознавства та теплоенергетики вказує на можливість створення і підтримання супер гідрофобних поверхонь. Таке явище, як супер гідрофобність, надає широкі перспективи ефективного довго тривалого застосування режиму краплинної конденсації із одночасним захистом робочих поверхонь від корозії. Застосування спеціальних матеріалів спільно з поверхнево-активними речовинами (ПАР) дозволяє оперативно керувати теплообмінними процесами, що надає суттєві переваги для різних галузей економіки.

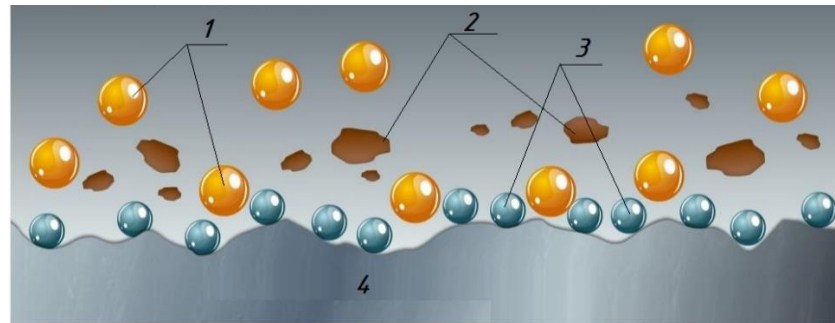
**Формулювання мети.** Метою роботи є дослідження можливості створення та застосування супер гідрофобних конденсаційних поверхонь, які суттєво інтенсифікують теплообмін із одночасним захистом від корозійно-ерозійних процесів. При цьому, також, за рахунок комплементарних властивостей на поверхнях теплообміну формуються водо відштовхуючі покриття із властивістю самоорганізації і самоочищення.

**Основна частина.** Розробка та використання багатофункціональних покриттів сучасних теплообмінних поверхонь у промисловому масштабі є актуальною задачею сьогодення [2]. Нанотехнології надали можливість синтезувати нові композиції з елементами органічних сполук. Фізико-хімічні властивості новітніх покриттів підтверджують їхню стійкість до корозійно-ерозійного впливу, забезпечують захист теплообмінних поверхонь, сприяють самоочищенню та самовідновленню. Все це в комплексі інтенсифікує теплообмін і подовжує терміни дії теплообмінних поверхонь, а також впливає на регламентні роботи і спектр експлуатаційних режимів теплотехнічного обладнання.

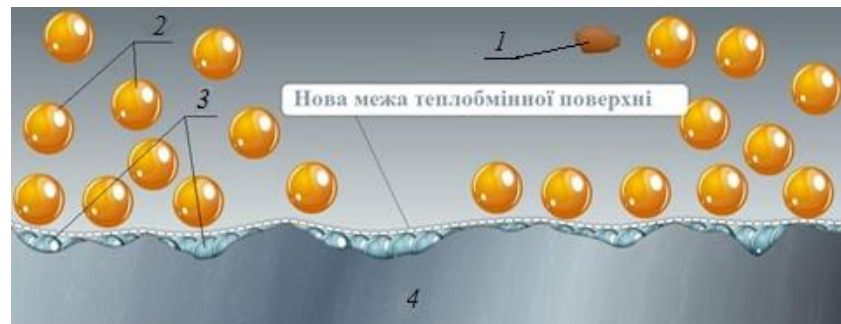
Принцип супер гідрофобності тісно переплітається із теорією краплинної конденсації, детально описаної багатьма вченими, зокрема професором Роузом [3]. Супер гідрофобними вважаються поверхні з крайовими кутами змочування від 148-150 до граничних 180 кутових градусів. При цьому гістерезис крайових кутів змочування - статичного, натікання і відтікання - має бути мінімальним, а в граничному випадку - нульовим.

Супутнім чинником для явища супер гідрофобності є ефект самоочищення, який має назву “Ефект Лотоса” [4]. Все вищенаведене відкриває значний потенціал у теплоенергетиці.

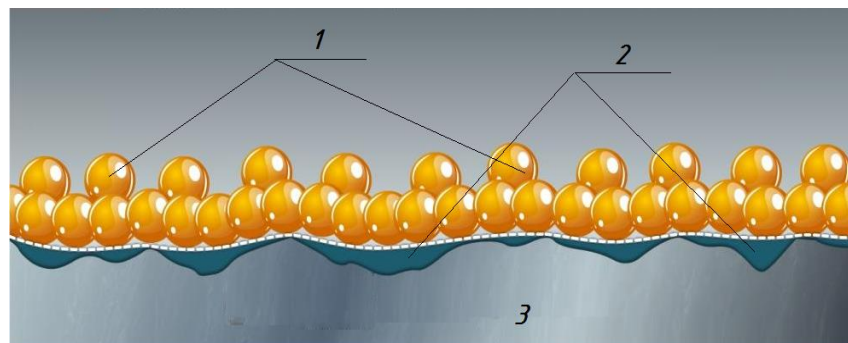
Шар супер гідрофобного покриття робочих поверхонь отримується за технологією третього тіла і відрізняється високою адгезією (міцністю зв’язків з основою) і підвищеною мікротвердістю. Третє тіло являє собою новий моно- або полікристал, який здатен міцно утримувати на поверхні металу вуглеводневі ланки ПАР (див. Рис. 1).



а) нанесення ПАР та очищення поверхні теплообміну: 1 – вуглецеві групи; 2 – забруднення на поверхні теплообміну; 3 – активні компоненти ПАР; 4 – металева поверхня



б) формування нового захисного покриття - шару третього тіла: 1 – частинки забруднення, що видаляються; 2 – вуглеводневі компоненти; 3 – захисний шар; 4 – поверхня теплообміну



в) сформована трибо система: 1 – вуглецеві групи; 2 – третє тіло; 3 – металева поверхня

Рисунок 1 – Формування трибо системи

Трибосистема в теплотехніці відноситься до поняття, яке описує взаємодію трьох

складових: термодинамічна система, технічна система та система, що забезпечує триботехнічні характеристики. Таким чином, трибосистема в теплотехніці враховує не лише сам процес конвертації енергії, а й вплив елементів, що забезпечують оптимальну роботу цієї системи з точки зору триботехніки. Наявність в теплоносії певної надлишкової кількості ПАР дозволяє створювати при поверхневий квазірозріджений шар. Здатність цього шару поступово перетворюватись на поверхні теплообміну в нанокераміку, в свою чергу, дозволяє ефективно поновлювати ушкоджену поверхню.

При цьому ПАР повинні мати певні властивості:

- бути хімічно-нейтральними речовинами;
- бути ініціатором процесів, які створюють структуру на поверхні, що здатна самоорганізуватися;
- при переході у вже сформований мікро-, або нано шар, володіти підвищеною мікротвердістю.

Молекулярна наноструктурна система ПАР, товщиною до 100 нм, включає в себе комплекс хімічних елементів, де атоми активного вуглецю вступають в хіміко-фізичні зв'язки з атомами металів, утворюючи унікальне третє тіло, як захисний шар.

Для створення трибосистем необхідне дотримання балансу між притоком енергії та її віддачею в навколишнє середовище. Трибосистема є відкритою термодинамічною системою. Активні компоненти композиції в наслідок трибохімічних реакцій утворюють особливу модифікацію, яка забезпечує анізотропію механічних властивостей заново сформованої поверхні - прошарку третього тіла із збереженням основного призначення теплообмінної поверхні. Позитивний градієнт механічних властивостей поверхонь забезпечує явище супер гідрофобності. Якщо для таких систем порушується баланс, то система на це відреагує властивістю самоорганізації. Тобто, трибосистема або руйнує старі зв'язки, або утворює нові, шляхом структурного ускладнення.

**Висновки.** Таким чином, супер гідрофобні покриття теплообмінних поверхонь є дієвим способом інтенсифікації теплообміну при конденсації і захисту їх від корозії. Практичне застосування таких трибо системних покриттів розкриває значний потенціал для поліпшення різних технологічних циклів і керування певними процесами, такими як конденсація. Дослідження у цій області є вельми перспективними і можуть зробити значний комплексний внесок у вирішення в ряду енергетичних проблем.

#### **Перелік посилань:**

1. Корозія металів – ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТАЛІВ URL: <https://school.home-task.com/koroziya-metaliv-zagalna-xarakteristika-metaliv/> (дата звернення 12.03.2024)
2. Кожемяка Д. ПРО ЗАХИСТ ТЕПЛООБМІННИХ ПОВЕРХОНЬ URL: [https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/9974/2/Conf\\_2013v1\\_Kozhemiaka\\_D-Pro\\_zakhyst\\_teploobminnykh\\_246.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/9974/2/Conf_2013v1_Kozhemiaka_D-Pro_zakhyst_teploobminnykh_246.pdf) (дата звернення 12.03.2024)
3. J.W.Rose, Dropwise condensation theory and experiment: A review URL: [https://www.researchgate.net/publication/239407364\\_Dropwise\\_condensation\\_theory\\_and\\_experiment\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/239407364_Dropwise_condensation_theory_and_experiment_A_review) (дата звернення 12.03.2024)
4. Пімінов О.Ф. Поняття про супергідрофобність URL: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/6658/supergidrofobnist> (дата звернення 12.03.2024)

<sup>1</sup> Бакалаврант 2 курсу Плетень М.Д.; <sup>1</sup> Бакалаврант 2 курсу Андреечкін А.А.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Гавриш А.С.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=FNHVtwYAAAAJ&hl=ru>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ МЕХАНІЗМУ ПРОЦЕСУ КОНДЕНСАЦІЇ. КРИВІ КОНДЕНСАЦІЇ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Конденсація належить до високо інтенсивних процесів теплообміну. Її дослідження ведуть за декількома основними напрямками. Одним із цих напрямків є побудова і вивчення кривих конденсації, механізму процесу і умовного циклу конденсації. Перехід від плівкової до краплинної конденсації показує, що однаково висока інтенсивність процесу може підтримуватись для різних поверхонь, як пластинчастих, так трубних. Це дозволяє використовувати сучасні ефективні теплообмінні поверхні в різних галузях промисловості. Використання поверхнево-активних речовин (ПАР) при конденсації являє собою один із надійних шляхів зміни режимів від плівкового до краплинного і навпаки. При цьому, з мінімальними затратами просто і надійно інтенсифікується теплообмін і здійснюється захист поверхонь від корозійно-ерозійних процесів. Все це знаходить своє віддзеркалення в кривих конденсації і умовному циклі процесу.

**Аналіз попередніх досліджень.** Одне з перших детальних досліджень кривих конденсації було виконане японськими вченими, яких очолював проф. Й. Утака [1]. Для конденсації парів пропіленгліколю та етиленгліколю побудовані графічні залежності густин теплових потоків, коефіцієнтів тепловіддачі та температурних напорів пара-стінка з конкретизацією різних режимів процесу. Згодом виконане порівняння із кривими конденсації водяної пари. В промислових системах теплообміну, зокрема в конденсаторах, криві конденсації дозволяють проаналізувати й прогнозувати різні умови відповідно до кола вирішуваних задач. Доповнення знань про криві процесу доцільно супроводити інформацією про умовний цикл конденсації. Комплексні знання про ці фактори дозволяють оперативно керувати конденсацією і, за необхідності, здійснювати перехід між різними режимами процесу, як плавно, так і стрибкоподібно.

**Формулювання мети.** Дослідження механізму процесу конденсації віддзеркалюється кривими конденсації і умовним циклом процесу. Наявність вичерпної інформації про умови виникнення і довготривалого підтримання високо інтенсивних процесів конденсації дозволяє розробити нові та оптимізувати існуючі системи охолодження.

**Основна частина.** Конденсація насиченої, або перегрітої пари на твердій поверхні теплообміну відбувається, коли температура поверхні менше температури насичення при заданому тиску. Перший вид конденсації, коли рідка сконденсована фаза утворюється на поверхні теплообміну у вигляді стійкої плівки (для конденсації водяної пари - гідрофільна поверхня), має назву «плівкова конденсація», а другий - коли відбувається утворення крапель (для конденсації водяної пари - гідрофобна поверхня) – «краплинна». На теплообмінній поверхні конденсація починається вже при мінімальному переохолодженні 0,01 – 0,05 К. При початковому контакті пари з переохолодженою відносно температури насичення стінкою на ній утвориться первинний шар рідини. Цей первинний шар рідини в процесі конденсації може розвиватись за двома основними шляхами. На гідрофільній поверхні він зростає і під дією сил тяжіння починає стікати поверхнею у вигляді суцільної плівки. Це – плівкова конденсація, вона відбувається, за умови, що рідина змочує поверхню

при крайових кутах  $\Theta < 90^\circ$ . Водяна пара при конденсації на чистих металевих поверхнях дає плівкову конденсацію, для якої значення коефіцієнтів тепловіддачі описані рівнянням, яке отримав німецький вчений Нуссельт в 1916 році [2].

На гідрофобній поверхні зародкова конденсаційна плівка при крайових кутах змочування  $\Theta > 90^\circ$  розпадається на окремі вже зародкові краплини під дією сил поверхневого натягу. Зростаючі краплі, в свою чергу, при досягненні певного відривного розміру починають видалятися з поверхні теплообміну під дією сил тяжіння, динамічної дії парового потоку, відцентрової сили, тощо. Слід зазначити, що за решти однакових умов, при краплинній конденсації коефіцієнт тепловіддачі в декілька разів більше, ніж при плівковій. Баланс сил поверхневого натягу для конденсатних утворень впливає на те, яким чином рідина розподіляється по поверхні теплообміну – див. рис. 1.

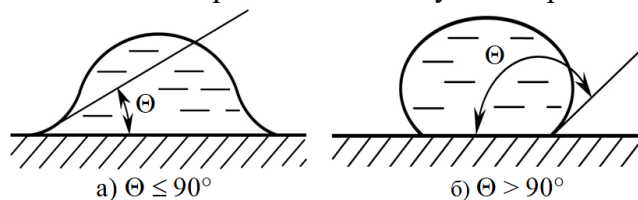


Рисунок 1 - Крайові кути змочування: а) крайовий кут змочування при плівковій конденсації, б) крайовий кут змочування при краплинній конденсації.

В більшості існуючих конденсаційних систем реалізований режим плівкової конденсації. Розроблені методи інтенсифікації тепловіддачі для плівкової конденсації дозволяють незначно збільшити значення коефіцієнтів теплопередачі. Альтернативою такому підходу є зміна режиму конденсації з плівкового на краплинний. Тривала підтримка якісної високо інтенсивної краплинної конденсації водяної пари на теплообмінній поверхні є вельми актуальною задачею. Дослідження процесу краплинної конденсації проводиться за декількома основними напрямками, як на мікро, так і на макро рівні. Перший з них пов'язаний з вивченням умовного циклу процесу. Другий – з кривими конденсації.

Умовний цикл конденсації описує розвиток конденсатних утворень в часі і просторі від початкового  $R_{кр}$  до відривного розміру  $R_{відр}$  – рис. 2. Середньо статистична тривалість циклу  $\tau_0$ . Він враховує можливе співіснування в динаміці крапель і локальних плівок різних типорозмірів і ефект їх злиття – малі під цикли з поточним часом  $\tau$ . Для певних типорозмірів конденсату (10-100 мкм) на супер гідрофобних поверхнях також з'являється ефект відскоку краплин – jumping drop effect (зображений зигзагами). Після відриву і видалення конденсату (пік кривої) може існувати певний проміжок часу (автомодельна область графіку), необхідний для ініціації нового наступного циклу.

$R/R_{відр}$

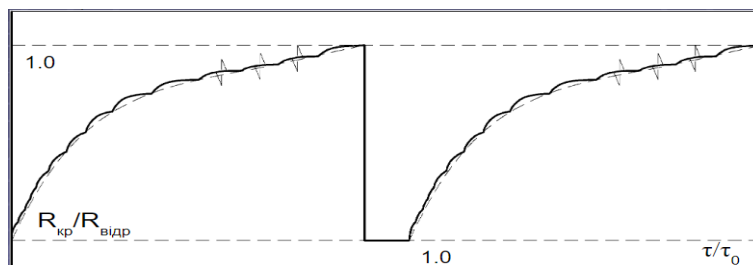


Рисунок 2 - Опосередкована картина умовного циклу конденсації

Умовний цикл конденсації разом з функцією розподілу конденсатних утворень за розмірами дозволяє зробити розрахунок інтенсивності теплообміну з урахуванням в безрозмірному вигляді особливостей просторово-часового розвитку процесу.

Дослідження процесу конденсації на макро рівні ведеться за допомогою відповідних кривих конденсації [3], які будуються на основі масиву експериментальних даних,

отриманих за допомогою балансових співвідношень і обробки фото- і відео матеріалів. Співіснування різних режимів конденсації віддзеркалюють характерні області кривих.

Для прикладу розглянемо криву конденсації на графіку залежності густини теплового потоку від температури (рис. 3), де:

- зона А – краплинна конденсація (КК);
- зона В – псевдо-краплинна конденсація (ПКК);
- зона С – псевдо-плівкова конденсація (ППК);
- зона D – плівкова конденсація (ПК);
- зона Е – конденсація на пласті криги (КПлКр).

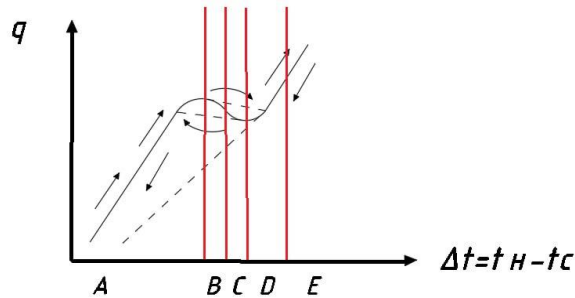


Рисунок 3 - Приклад кривої конденсації

У зоні КК чітко виражені краплини, адже поверхня є незмочуваною. У перехідних псевдо зонах (ПКК, ППК) відбувається в динаміці злиття краплин і локальних плівок аж до характерного залиття поверхні теплообміну при ПК, коли утворюється суцільна плівка конденсату. Для води і водяної пари при великих температурних перепадах (до  $200^{\circ}$ ) можливо досягнення конденсації на пласті криги. Основними зонами кривих конденсації є зони А і D для КК і ПК. Якщо гідрофобне покриття, нанесене на теплообмінну поверхню, вимивається або руйнується, внаслідок корозійно-ерозійних процесів, то крива конденсації вироджується і плівкова конденсація (зона D) розповсюдиться і на інші зони (А, В, С). При плавній зміні параметрів процесу крива конденсації проходиться в прямому і зворотному напрямках також плавно. При стрибкоподібній зміні параметрів процесу проявляється гістерезис кривої, який показує стрибок із зони КК в ПК при прямому ході, і з зони ПК в КК при зворотному.

**Висновки.** Процес конденсації можна узагальнити у вигляді кривих на макрорівні і умовного циклу конденсації на мікро рівні. Обидва узагальнення є взаємопов'язаними між собою. Розуміння того, як відбувається даний процес, дозволяє оптимізувати роботу конденсаційного обладнання. При цьому надійно створюються умови для нанесення і підтримання захисних гідрофобних покриттів робочих поверхонь. Розрахунок тепловіддачі для співіснування різних типорозмірів конденсатних утворень і можливого відскоку крапель доцільно проводити з використанням умовного циклу конденсації і безрозмірного опису просторово-часового розвитку процесу конденсації.

#### Перелік посилань:

1. Yang Li, Junjie Yan, Lei Qiao, Shenhua Hu. Experimental study on the condensation of ethanol–water mixtures on vertical tube.

URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsme1958/28/240/28\\_240\\_1150/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsme1958/28/240/28_240_1150/_pdf/-char/ja) (дата звернення 07.03.2023)

2. Leipertz A., Rausch M., Fröba A. Dropwise condensation of steam on ion implanted titanium surfaces. Germany: International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009.V 53. №3 p. 423–430.

3. Webb, David R. Condensation Curve.

URL: <https://www.thermopedia.com/content/650/> (дата звернення 07.03.2023)

<sup>1</sup> Бакалаврант 3 курсу Корячко М.В.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Новаківський Є.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=ovbouE8AAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ЗАМІЩЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА БІОМАСУ ШЛЯХОМ ЇЇ СПАЛЮВАННЯ У ВИХРОВОМУ ПЕРЕДТОПКУ

**Постановка проблеми та її актуальність.** У сучасний час, однією з ключових стратегічних цілей України є досягнення енергетичної самодостатності. Для реалізації цього завдання необхідно впроваджувати системи використання власних енергетичних ресурсів країни. Зважаючи на значущий внесок сільськогосподарської галузі у економіку країни, актуальним і вигідним з економічного та екологічного погляду є використання низькосортних видів палива, більшість з яких є відходами даного сектора. Вдосконалення технологій та методів спалювання цих видів палива в котлах і вихрових топках може суттєво зменшити залежність від імпортованого природного газу та призвести країну до статусу енергетично незалежної.

**Аналіз останніх досліджень.** На сучасному етапі широко використовуються топки для спалювання біомаси та паливних відходів, які обладнані решітками. Ці решітки призначені для оптимального спалювання біомаси різного складу та вологості з високою зольністю.

У сільському господарстві використовують топки із вібраційною чи обертовою решіткою для спалювання відходів. Спалювання твердих палив та паливних відходів відбувається в котлах різної потужності з киплячим шаром, після їхньої модернізації або використання нових конструкцій [1].

Для спалювання вологих деревних відходів використовують шахтні топки з нерухомою похилою решіткою, але вони мають низьку ефективність і ускладнене регулювання процесу горіння через значний об'єм волового палива.

Останнім часом розвиваються топки, які поєднують спалювання палива в киплячому шарі з вихровим спалюванням у надшаровому просторі. Ці топки забезпечують ефективне регулювання теплової потужності та підтримують температуру киплячого шару, що сприяє покращенню процесу горіння [2].

Сучасна промисловість виробляє комерційні котли з киплячим шаром, такі як котли з киплячим шаром та котли із зовнішньою та внутрішньою циркуляцією киплячого шару. Дослідження показують, що використання технології киплячого шару при спалюванні деревних відходів різного складу є ефективним. Проте, для стабільного гідравлічного режиму псевдозрідження дрібнофракційного деревного палива важливо використовувати шароутворювальний інертний матеріал [3].

До недоліків киплячого шару можна віднести наступне:

1. Ерозія – висока швидкість газу може призвести до зносу труб та інших елементів котла;
2. Скупчення золи – вона може накопичуватися в шарі, зменшуючи теплопередачу та утворюючи шлак, який може пошкодити котел;
3. Забруднення – викиди шкідливих речовин, таких як пил, оксиди азоту та сірки, негативно впливають на навколишнє середовище та здоров'я людей.
4. Шум – котли з киплячим шаром можуть бути дуже шумними, тому вони потребують шумоізоляції.

Для більш ефективного спалювання дрібного палива рекомендується використовувати топки швидкісного горіння, такі як циклонні та вихрові топки, які



відрізняються малими габаритами, простою конструкцією та низькою металоємністю. Спалювання біомаси в таких топках відзначається пошаровою подачею повітря і палива, а також вигоранням частинок палива при великій швидкості та обмеженому об'ємі топки.

Останніми часами розвиваються технології вихрового спалювання для використання в різних галузях, включаючи енергетику та системи аспірації. Вихрові технології дозволяють поліпшити екологічні показники, стійкість спалахування та горіння твердого палива, а також можуть бути використані для різних видів біопалива (Рис. 1). Ці технології можуть бути інтегровані в традиційні камерні топки за рахунок їхньої модернізації, що дозволяє зменшити об'єм котельного агрегату та поліпшити ефективність спалювання [4].

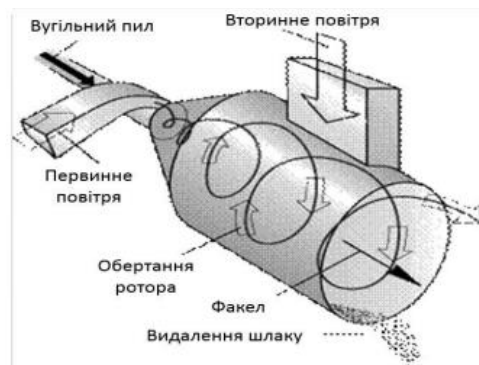


Рисунок 1 - Вихровий пальник для спалювання вугільної суміші з повітрям

У вихрових передтопках паливо утримується у повітрі завдяки сильним вихорам, які утворюються, не дозволяючи навіть великим часткам палива випадати (5 - 10 мм і більше). Сучасні вихрові топки призначені для спалювання шматків твердого палива розміром 2 - 10 мм, при цьому повітря подається зі швидкістю 30 - 150 м/с. Ці передтопки можуть бути горизонтальними або вертикальними циклонними, проте вертикальні використовуються рідше. Горизонтальні циклонні передтопки мають діаметр від 1 до 4 метрів, і відношення їх довжини до діаметру не перевищує 1,5 - 1,6 [5].

Зольність визначає кількість залишкового золи у паливі після його згорання. Зольність палива важлива для вихрових топок, оскільки вона може впливати на чистоту процесу згорання і може викликати утворення золи, яка може бути відкладена на стінках топки або димових газових трубах, що може призвести до утворення накипу та інших проблем. Зольність палива може варіюватися в залежності від його складу та джерела, і вона визначається відсотковим вмістом золи в паливі.

**Висновки.** Розглянуті дослідження та аналіз показують актуальність та перспективність використання біомаси як альтернативного джерела енергії для заміщення природного газу в системах опалення. Вихрові передтопки можуть спалювати паливо різної зольності, а встановлення котла з киплячим шаром не завжди може бути вигідно як зі сторони експлуатації, так і зі сторони ремонту.

#### **Перелік посилань:**

1. Редько А.Ф. Теплообмен в топках с кипящим слоем: Учебное пособие / А.Ф. Редько. – Киев: УМК ВО, 1990, – 72с
2. Шахбазов І.О. Перспективи використання біопалива в побутових котельних установках / Сірий О.А – // УДК 662.6 - Київ. Наукова думка, 2023 – С.294
- Реконструкція пальникових пристроїв, заміна газових на вихрові пальники, щоб спалювалася біомаса
3. Редько А. Ф. Экспериментальные исследования сжигания биотоплива в кипящем слое / А. Ф. Редько, И. А. Редько, Ю. А. Пивненко // Вентиляция, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 23. – С. 52-60..
4. Махорин К.Е. Сжигание топлива в псевдооживленном слое / К. Е. Махорин, П. А. Химкис. – Киев. Наукова думка, 1989.
5. Олешко П.О. Реконструкція промислових котлів для спалювання біомаси // С.181

## УДК 662.66

<sup>1</sup> Бакалаврант 4 курсу Бельмас В.В.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Шевель Є.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=zNMzfw0AAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ЗАМІЩЕННЯ АНТРАЦИТУ В ПАРОВОМУ КОТЛІ НА АЛЬТЕРНАТИВНИЙ ВИД ТВЕРДОГО ПАЛИВА

**Постановка проблеми та її актуальність** Антрацит в Україні в парових котлах використовувався протягом довгого часу і це було виправдано. На момент 2014 року приблизно 40% теплової енергії в Україні вироблялося за допомогою антрациту [1]. Це, за самими мінімальними даними, складало приблизно 400000 котлів. Це було економічно вигідно, адже, не дивлячись на високу ціну, антрацит має високу теплотворну здатність, низький вміст вологи та золи, та добувався в наших шахтах на сході. Однак з початком російської агресії в 2014 році та захопленням наших територій – ми втратили доступ до наших родовищ та були вимушені закуповувати його по завищеній ціні, використання антрациту ставало все більш невигідним. Ситуація стала ще гіршою з початком повномасштабної війни. Доступ до антрациту був втрачений. Котли, які на ньому працювали - простоювали по 2–3 місяці поспіль через відсутність необхідних марок вугілля, адже перевести котел на інший вид палива, наприклад, газ є складною задачею, через необхідність перероблювати конструкцію котла, що може бути економічно недоцільним.

**Формулювання мети.** В даній роботі представлено один зі способів вирішення цієї проблеми – заміщення антрациту на альтернативне тверде паливо – газоподібне.

Газоподібне вугілля викликає все більший інтерес в енергетичному секторі. Основні його переваги:

- воно є більш екологічно прийнятним і сприяє декарбонізації енергетичного сектору, що поліпшує якість навколишнього середовища;
- це вугілля – тверде, тому нема потреби в повній переробці конструкції котла;
- газоподібне вугілля дешевше ніж антрацит;
- це вугілля видобувається в наших родовищах у Волинському та Дніпровському басейнах, тому його не потрібно купувати за кордоном;
- воно має менший вміст сірки та більший вміст горючих речовин, через що виробляється більше тепла.

**Основна частина.** Як для прикладу, розглянемо Придніпровську ТЕС. У 2018 році вона повністю перейшла з антрациту на використання вугілля марки «Г», тобто газоподібного вугілля, що призвело до зменшення обсягів імпорту на 700 000 тон [2]. Цей перехід стосується чотирьох енергоблоків, кожен потужністю 150 МВт. За середньою ціною \$105-110 за тонну, це призвело до економії близько \$75 млн. Напередодні 2014 року ДТЕК мав чотири антрацитові станції. Найменша з них – Миронівська ТЕС, яка була переведена на газоподібне паливо у 2017 році. У 2021 році ще одна була переведена на газоподібне вугілля. Наразі перехід інших станцій є ускладненим через бойові дії.

Переведення станцій на газоподібне вугілля також є плюсом, адже дає роботу українським шахтарям. За даними ДТЕК, переведення станцій на газоподібне вугілля дозволило збільшити видобуток на шахтах, за рахунок збільшення виробітки існуючих лав та будівництва нових ділянок. Тільки в 2017 році видобуток зріс на 1,7 млн тон – до майже 23 млн тон.

Для порівняння - витрати палива марки «А» (антрацитова група) складають 440–450 грн на 1 кВт/год. У той же час для виробництва 1 кВт/год на вугіллі марки «Г» треба: на

блоках потужністю 150 МВт – 404–410 грн, на блоках 200 МВт – 400 грн, на блоках 300 МВт – 385 грн.

В цій роботі наведений розрахунок топки котла, відповідно до нормативних методів [3]. Був проведений тепловий розрахунок котельного агрегату БКЗ-75-39 ФБ який працює на антрациті та тепловий розрахунок цього ж котельного агрегату, який працює на газоподібному вугіллі. Для кращого порівняння розрахунків була задана умова, що температура димових газів – однакова. В результаті розрахунків були порівняні значення (див. рис.1-3):

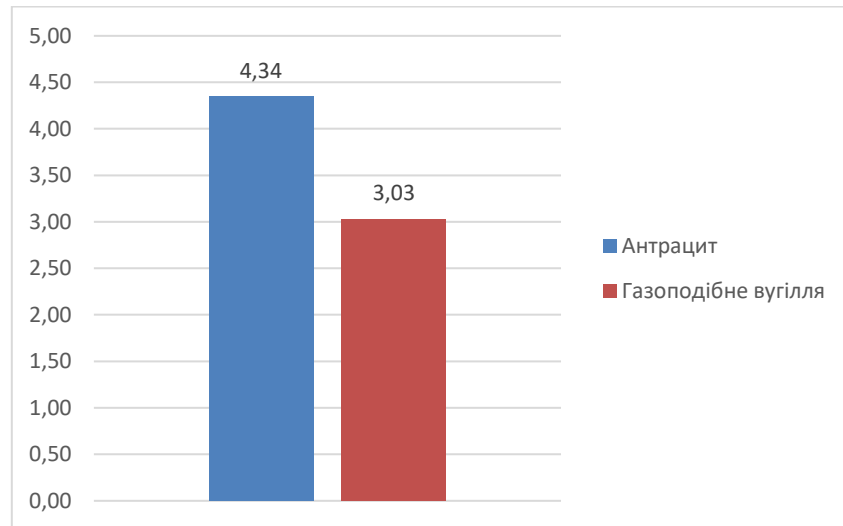


Рисунок 1 – Витрата палива, кг/с

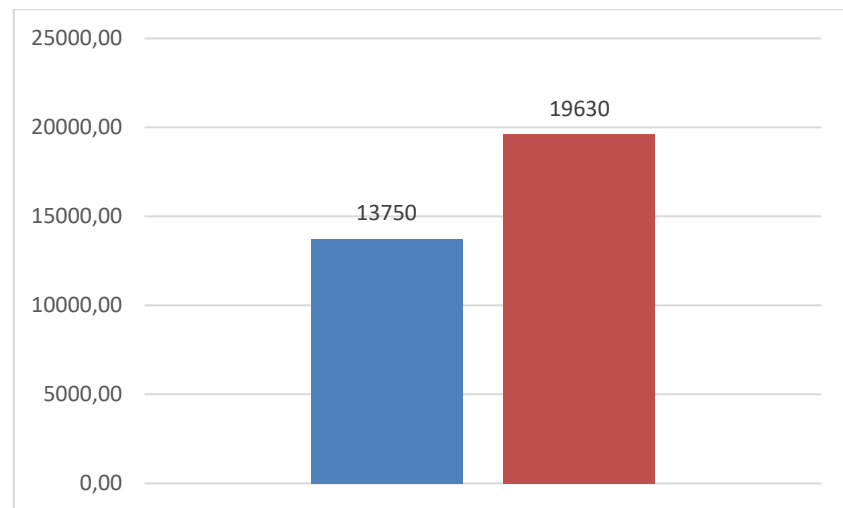


Рисунок 2 – Розподільна теплота палива, кДж/кг

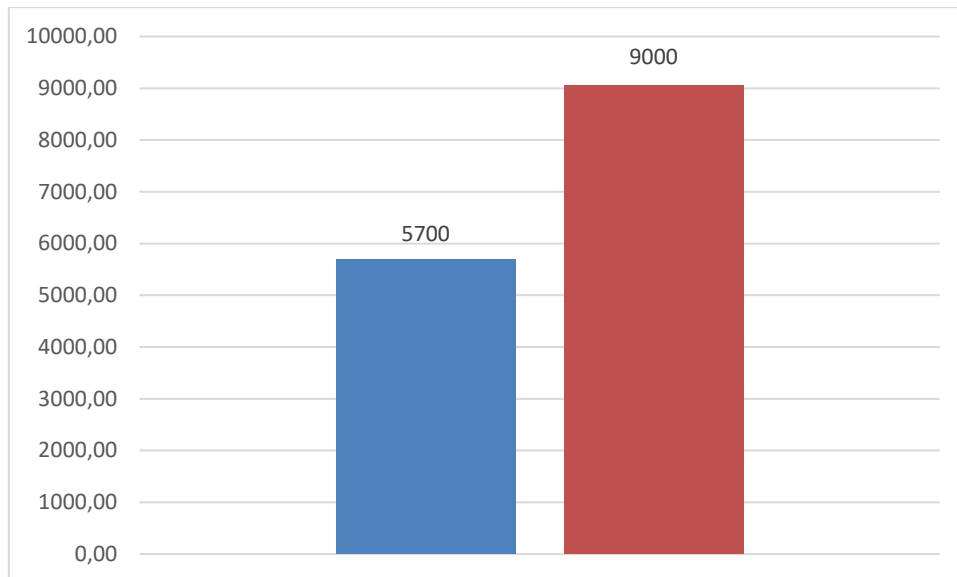


Рисунок 3 – Теплосприйняття топки, кДж/кг

**Висновки.** Заміщення антрациту в паровому котлі на газоподібне є можливим кроком для функціонування енергетичного сектора України в умовах відсутності антрациту. Це дає змогу зменшити викиди в атмосферу та отримати кращі теплові характеристики в топці при меншій витраті палива, при цьому, не купуючи його за кордоном.

**Перелік посилань:**

1. Державна служба статистики України. Енергетичний баланс України. URL: <https://ukrstat.gov.ua>. (дата звернення: 04.03.2024).
2. І. Коваль. Перехід з антрациту на газове вугілля: як ДТЕК проводить переобладнання. Mind. URL: <https://mind.ua/publications/20191262-perehid-z-antracitu-na-gazove-vugillya-yak-dtek-provodit-pereobladnannya>. (дата звернення: 09.03.2024).
3. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод, изд. 3-е. С. – П., 1998. –258 с.

## УДК 662.761

<sup>1</sup> Бакалаврант 4 курсу Євтушок В.А.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Новаківський Є.В.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

### ЗАСТОСУВАННЯ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ГАЗІВ В ПАРОВИХ КОТЛАХ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Покращення екологічності котельних установок та збільшення ефективності використання палива є основними напрямками вирішення проблем чистоти повітряного басейну. Важливість наукових досліджень у цьому напрямі обумовлена зростаючими вимогами щодо зменшення забруднення навколишнього середовища. Найбільш небезпечними викидами ТЕС і котелень є викиди  $\text{NO}_x$ . Зменшення утворення оксидів азоту є одним із шляхів покращення екологічності котельних агрегатів.

**Аналіз останніх досліджень.** За даними Державної служби статистики, оприлюдненими в 2021 році, в атмосферу було викинуто близько 200 тис. тонн оксиду і діоксиду азоту [1]. Задля виконання вимог Директиви 2010/75/EU, наведених в таблиці 1, необхідне впровадження сучасних промислових технологій, здатних зменшити вміст оксидів азоту  $\text{NO}_x$  в димових газах до 50-80% для досягнення норм ЄС [2].

Таблиця 1 - Існуючий рівень концентрацій забруднюючих речовин на ТЕС України та вимоги Директиви 2010/75/EU

Забруднююча речовина	Існуючий стан, мг/м <sup>3</sup>	Директива 2010/75/EU, мг/м <sup>3</sup>
Тверді частки	600-3200	20
Діоксид сірки $\text{SO}_2$	2000-7000	200
Оксиди азоту $\text{NO}_x$	500-1800	200

**Формулювання мети.** Існує багато способів покращення екологічних показників котельних установок. Один із таких полягає в застосуванні рециркуляції димових газів з подальшим зниженням кількості оксидів азоту  $\text{NO}_x$ . Данна технологія широко розповсюдилась ще в 70-х роках минулого століття і використовується досі.

#### Основна частина.

Процес рециркуляції відбувається шляхом відбору димових газів після водяного економайзера спеціальним рециркуляційним димососом в кількості до 20% при температурі 300...400 °С. Відібрані продукти згорання подають в топкову камеру, що сприяє зниженню температури горіння в топковому просторі котла на 120...130 °С. При зниженні температури знижується і вміст кисню, що призводить до зменшення швидкості горіння і утворення паливних  $\text{NO}_x$ . При цьому ККД котла знижується незначно (0,01...0,03% на 1% рециркуляційних газів) [3].

Введення відібраних газів відбувається у нижню частину топки, через шліци під пальниками, у повітропровід гарячого повітря, безпосередньо в пальник в один із повітряних потоків або між потоками повітря, в пальник у потік палива. [4]. Найбільш ефективною є рециркуляція продуктів згорання з паливом (приблизно в 1,5 рази більше, ніж з повітрям). Досліди Інституту газу НАН України показали, що при рециркуляції 25 % продуктів горіння з газовим паливом досягається зниження викидів  $\text{NO}_x$  до 45 % (рис. 1). Подальше збільшення об'ємів газів рециркуляції зменшує концентрацію кисню у суміші нижче 17,5% при коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha = 1,2$  [5].

Рециркуляцію димових газів радше застосовують при наявних спеціальних

модифікованих пальниках, які ще називають пальниками стадійного спалювання. Також застосовуються плоскополум'яні пальники з внутрішньою рециркуляцією газів, що мають температуру 800...1200 °С по фронту займання і дозволяють на 40...50 % знизити викиди оксидів азоту [4].

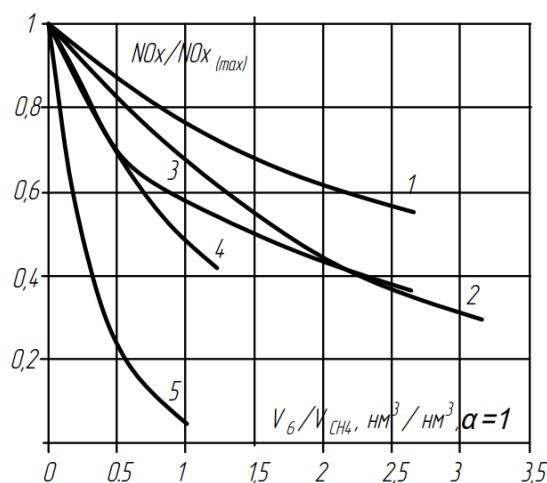


Рисунок 1 – Залежність виходу оксидів азоту при додаванні баласту різного складу та способів його подачі в зону горіння: 1 – підмішування димових газів до дуттьового повітря; 2 - підмішування  $CO_2$  до дуттьового повітря; 3 – підмішування димових газів до природного газу в пальнику; 4 – подача суміші  $N_2$  та природного газу; 5- подача суміші  $CO_2$  та природного газу;  $V_6$  - об'єм баласту,  $nm^3$ ;  $V_{CH_4}$  - об'єм природного газу,  $nm^3$ .

**Висновки.** Загалом можна зробити висновок, що технологія рециркуляції димових газів сама по собі не дає можливості досягти бажаного зменшення  $NO_x$ . До того ж, надмірне збільшення об'ємів газу рециркуляції може призвести до погіршення горіння, виносу факела в конвективну частину котла, значного збільшення втрат електроенергії та збільшення температури вихідних газів. Доцільним є поєднання одразу кількох способів зниження  $NO_x$ , наприклад, використання рециркуляції та, наведених раніше, модифікованих пальників, топкового поярусного ступеневого спалювання та ін.

#### Перелік посилань:

1. Directive 2010/75/EU of the European parliament and of the council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=%20CELEX:32010L0075>

2. Викиди забруднюючих речовин і парникових газів у атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення. *Державна служба статистики України* : веб-сайт. URL: [https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/vzap/arch\\_vzap\\_u.htm](https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/vzap/arch_vzap_u.htm)

3. Михайленко В.С., Щербінін В.А., Лещенко В.В., Харченко Р.Ю., Ложечнікова Н.В. Моделювання процесу утворення шкідливих викидів у вихідних газах суднових парових котлів. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2020. Т.10, №3–4. С. 154–166. DOI 10.15276/imms.v10.no 3-4.154

4. Глущенко О.Л., Богданович Д.В. Дослідження роботи промислових котельних агрегатів з метою розробки заходів щодо зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище. *Conference Proceedings of the 1st International Conference on Academic Research and Innovation*. Dallas, USA, 13-15 January 2021. С. 9-17. URL: [https://ispic.ngo-seb.com/assets/files/1\\_conf\\_13\\_15.01.2021.pdf](https://ispic.ngo-seb.com/assets/files/1_conf_13_15.01.2021.pdf)

5. Сігал І.Я., Сміхула А.В., Марасін О.В., Лавренцов Є.М., Домбровська Е.П. Модернізація газових котлів ТЕС, ТЕЦ та котельень відповідно до вимог екологічних директив ЄС. *Енерготехнології і ресурсозбереження*. 2017. №4 С.61-71. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ETRS\\_2017\\_4\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ETRS_2017_4_13)

<sup>1</sup> Бакалаврант 4 курсу Іванько Д.О.

<sup>1</sup> Проф., д.т.н. Сорокова Н.М.

[https://scholar.google.com.ua/citations?user=6iPYO\\_sAAAAJ&hl=ru](https://scholar.google.com.ua/citations?user=6iPYO_sAAAAJ&hl=ru)

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ В ГАЗО-РІДИННИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ БКЗ-75-39-ФБ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Теплообмінне обладнання широко застосовується в технологічних процесах в енергетичній, нафтохімічній, металургійній, харчовій, фармацевтичній та інших галузях промисловості. Інтенсифікація теплопередачі в теплообмінному обладнанні істотно впливає на ефективність роботи промислових підприємств. В результаті інтенсифікації процесів теплообміну можна досягти суттєвого зменшення маси і габаритів теплообмінного обладнання, а також забезпечити заданий температурний рівень елементів цього обладнання і підвищити надійність їх функціонування.

Для газотрубних водогрійних котлів проблема інтенсифікації теплообміну особливо актуальна, оскільки від інтенсивності теплообміну в теплообміннику залежить температура відхідних газів та середовищ, що нагріваються відхідними газами. Крім того, ефективна робота теплообмінного обладнання котельних установок зменшує витрату природного палива та підвищує її коефіцієнт корисної дії [1]. Заміна застарілого теплообмінного обладнання на підприємствах енергетичної галузі спряжена зі значними капітальними витратами, тому обґрунтування і впровадження методів модернізації працюючих теплообмінників представляє актуальну проблему для України.

**Аналіз останніх досліджень.** Останнім часом досить поширеним способом інтенсифікації теплообміну є використання різноманітних інтенсифікаторів, таких як пластини, спіральні дотові вставки, скручені металеві пластини та ін. (рис.1). Вони можуть значно підвищити інтенсивність теплообміну без значних капіталовкладень.

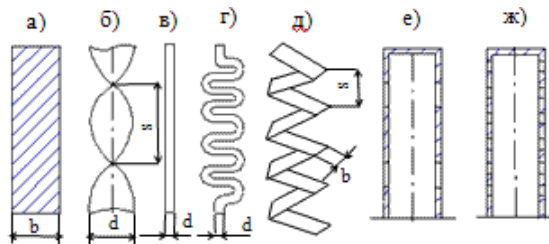


Рисунок 1— Інтенсифікатори теплообміну: а) пластина; б) скручена стрічка; в) дотова вставка; г) скручений дріт; д) зігнута пластина; е) вставка з прямокутними щілинами; ж) вставка з круглими отворами [1]

В [2] показано, що для інтенсифікації теплообміну в газотрубному теплообміннику найчастіше використовуються інтенсифікатори у вигляді пластин з різними типами закручування і згинання. Використовуються також комбіновані методи інтенсифікації, а також шнекоподібні скручені металеві пластини.

Вказані методи підвищують інтенсивність теплообміну в 1,5...4 рази, залежно від режиму руху теплоносія та геометричних параметрів інтенсифікаторів. Слід відзначити, що не для всіх зазначених методів існують розрахункові залежності для оцінки збільшення інтенсивності теплообміну в теплообміннику, зокрема для комбінованих методів. На інтенсивність теплообміну впливає відносний крок закручування інтенсифікатора, а також

режим руху теплоносія. Як зазначено в роботі [3], в ламінарному потоці інтенсифікація тепловіддачі створюється за рахунок макродії на весь потік, за рахунок порушення усєї структури потоку. Для турбулентного режиму руху найбільш ефективним способом інтенсифікації теплообміну є турбулізація пристінного ламінарного прошарку. Режим руху димових газів в теплообмінниках водогрійних котлів здебільшого ламінарний або перехідний. Тому найбільш дієвим способом підвищення інтенсивності теплообміну в конвективній частині є встановлення інтенсифікаторів, що турбулізують ядро потоку.

Ефективним способом інтенсифікації теплопередачі газо-рідинних теплообмінних апаратів є обребрення поверхонь теплообміну. Якщо обребрення задане і значення коефіцієнта тепловіддачі для обребреної поверхні відоме, то розрахунок теплопередачі через ребристу стінку не представляє затруднень [4].

Для збільшення поверхні теплообміну застосовуються різноманітні види ребер (пластинчасті ребра, насаджені на труби; ребра, навиті у вигляді стрічок; ребра, накатані на поверхні труб) і шпильок. Для розрахунку таких поверхонь теплообміну служать наступні характеристики: тепловий потік, що передається через основу ребра; ефективність ребра.

Під ефективністю ребра розуміється відношення теплового потоку, дійсно відведеного ребром, до потоку, який було б відведено ребром з такими ж геометричними і теплофізичними характеристиками з температурою рівною температурі у основі ребра. Ефективність ребра змінюється зі зміною теплопровідності, розмірів поперечного перерізу і висоти ребр [5].

Обрання способу обребрення здійснюється на базі аналізу різних видів обребрень, попередніх теплових розрахунків з метою вибору такого, яке із можливих видів краще дозволяють відводити необхідні теплові потоки.

**Формулювання мети.** Метою даної роботи є обґрунтування на основі аналізу ефективності застосування різних методів інтенсифікації теплообміну в газо-рідинних теплообмінниках моделі БКЗ-75-39-ФБ, та обрання способу його модернізації з метою підвищення їх ефективності та економічності роботи.

**Висновки.** Необхідно відзначити, що при виборі на практиці того чи іншого методу інтенсифікації теплообміну доводиться враховувати не тільки ефективність самої поверхні, але і її універсальність для різних однофазних і двофазних теплоносіїв, технологічність виготовлення поверхні, технологічність збірки апарату, вимоги на міцність, закрязняємість поверхні, особливості експлуатації і т.д.. Всі ці обставини істотно знижують можливості вибору одного з численних досліджених методів інтенсифікації [5]. Тим не менш, визначення оптимального методу інтенсифікації може значно покращити характеристики котельного агрегату, зменшити витрату палива, збільшити час експлуатації різних його елементів.

#### **Перелік посилань:**

1. Степанов Д.В., Боднар Л.А., Корженко Є.С. Котельні установки промислових підприємств : Навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2011. 120 с.
2. Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В.В., Щелчков А.В., Каськов С.И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: Монография Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 531 с.
3. Петренко В. П. Интенсификация теплообміну в аппаратах харчових виробництв та холодильних машин. НУХТ, 2010. 170 с.
4. Мигай В. К. Повышение эффективности современных теплообменников. 1980. 143 с.
5. Клімов Р. Интенсифікація теплообміну в енергоустановках. Кам'янське : Дніпр. держ. техн. ун-т, 2019. 45 с.



<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Горшколепов Я.В.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Новаківський Є.В.

<https://scholar.google.com/citations?hl=uk&user=ovbouE8AAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ФІЗИКО-ХІМІЧНІ І КОНСТРУКЦІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ

**Постановка проблеми та її актуальність.** В сучасному світі постає проблема обмеженості викопних палив, через це вчені шукають все більше альтернатив для заміни природного пального на штучне видобування «зеленого» палива.

**Аналіз останніх досліджень.** На теперішній час вчені оптимізують технологічні параметри процесу, досягаючи все більшої ефективності видобутку біопалива.

**Формулювання мети.** За допомогою анаеробного процесу можна позбутись і переробити відходи для видобутку газу, який буде слугувати заміною природного палива, і добривом.

**Основна частина.** Метантенки поділяють на 3 основні конструкційні типи:

Крита лагуна або критий відстійник (рис. 1 [5]) – Найпростіша технологія анаеробного котла, тут сировина зберігається в підземних контейнерах які можуть використовуватись як реактором так і сховищем для відходів, контейнери прикриті газонепроникною гнучкою кришкою. Іноді криті відстійники складаються з послідовно з'єднаних контейнерів. Перший контейнер виконує функцію реактора для видобутку біогазу, другий контейнер виконує функцію сховища метантенку для подальшої переробки. Ці метантенки найкраще підходять для теплих регіонів, де температура навколишнього середовища достатня для забезпечення необхідної температури зброджування. Сировина з низьким вмістом твердих речовин (0,5-2%) є оптимальною для цього типу метантенків. Типова тривалість збродження становить 30-45 днів [1].

Повне змішування (рис. 2 [5]) – це наземний резервуар зі сталі або ізольованого бетону. Жорстка або гнучка кришка використовується для утримання виробленого біогазу, який потім збирається через газозбірні труби. Теплообмінники підтримують температуру зброджування, і, як правило, для забезпечення повного перемішування сировини встановлюється механічна система перемішування. Метантенки з повним змішуванням можуть обробляти неоднорідну сировину з високим вмістом твердої фази (3-10%) і підходять для будь-яких умов навколишнього середовища. Тривалість зброджування в них нижча, ніж у критому відстійнику, і зазвичай становить від 10 до 25 днів.

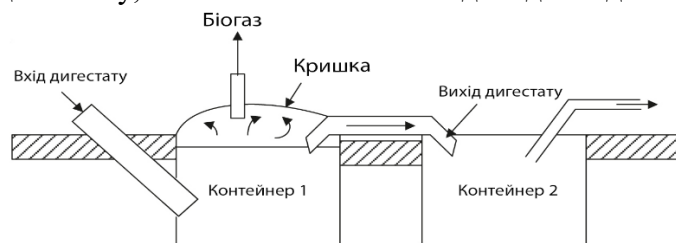


Рисунок 1 – Крита лагуна

Потоковий метантенк (рис. 3 [5]) – працює подібно до метантенків повного змішування, за винятком того що речовина не перемішується механічно. Проточний метантенк - це горизонтальний реактор циліндричної форми, в який сировина надходить з одного кінця, а дигестат виходить з іншого кінця. Сировина, що надходить, виштовхує рівну кількість субстрату, в той час як відбувається процес зброджування. Метантенки з

проточним метантенком, як правило, заглиблені в землю і накріті гнучким кожухом. Вміст твердих речовин у сировині повинен бути високим (<10-15%), щоб забезпечити рух рідини через реактор.

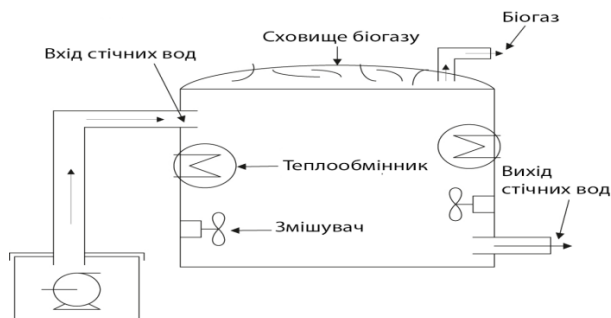


Рисунок 2 – Повне змішування

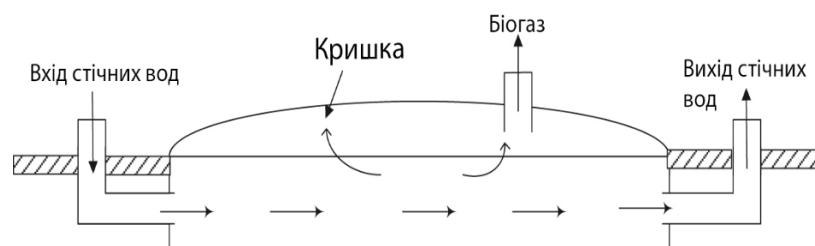


Рисунок 3 – Поточний метантенк

#### Фізико-хімічні процеси в метантенках

Температура в контейнерах може бути різною, від 55-60 до 35-40 °С. Процес бродіння при першій температурі має назву «Термофільне зброджування» - ця температура дозволяє швидше виробляти біогаз однак процес стає нестабільним. Діапазон других температур називається «Мезофільне бродіння» - при цій температурі процес стає стабільним але затрати часу, на видобуток газу, збільшується.

Концентрація Н (водню) теж неоднозначне. Метаногени працюють найбільш ефективно при 7 рН, Гідролітичні та ацидогенні бактерії працюють краще між значеннями 5,5-6,5 рН. У процесі переварювання рН може змінюватись і це є однією з проблем які вирішують вчені для стабілізації процесу через моделювання і подальшого його вивчення [3].

Етапи зброджування ділять на 4 етапи [2]:

Гідроліз – тут можна виділити гідроліз целюлози і виділення водню ( $H_2$ ).

Ацидогенез – це стадія бродіння, де утворені сполуки від першого етапу розкладаються на діоксид вуглецю ( $CO_2$ ) і водень ( $H_2$ ) за допомогою бактерій.

Ацетогенез – Виконується вивільнення водню ( $H_2$ ).

Метаногенез – Бактерії перетворюють оцтову кислоту ( $CH_3COOH$ ) і водень ( $H_2$ ) в діоксид вуглецю ( $CO_2$ ) і метан ( $CH_4$ ).

**Висновки.** У підсумку можна зазначити що на ефективність анаеробного зброджування впливає багато факторів на які треба звертати увагу в особливості до мікроорганізмів які дозволяють здійснити цей процес.

#### Перелік посилань:

1. Ружинська, Л. І.; Фоменкова, А. О.; Морозова, Є. В. Огляд конструкцій анаеробних біореакторів. Комунальне господарство міст, 2013, 107: 330-340.
2. A Review of the Chemistry of Anaerobic Digestion: Methods of Accelerating and Optimizing Process Efficiency / A. Anukam та ін. Processes. 2019. Т. 7, № 8. С. 504.
3. Trajectory tracking of two-stage anaerobic digestion process: A predictive control with guaranteed performance and saturated input, based on ultra-local model / D. He та ін. Journal of Process Control. 2023. Т. 129. С. 103039.

СЕКЦІЯ № 4

**Сучасні технології в  
тепловій та  
альтернативній  
енергетиці**

<sup>1</sup> Аспірант 3 курсу Ліщук С.Р.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Пешко В.А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=MLIjHJsAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РОТОРА СЕРЕДНЬОГО ТИСКУ ТУРБІНИ К-200-130 ПРИ ПУСКУ З ХОЛОДНОГО СТАНУ МЕТАЛУ

Характерною властивістю для енергетичної системи України є перевантаженість базовими енергогенеруючими установками та значна нестача гнучких енергоблоків. Це призводить до того, що енергоблоки потужністю від 200 до 300 МВт, які спочатку були спроектовані для роботи в режимі базового або напівбазового навантаження, активно використовуються для компенсації піків та провалів у споживанні електроенергії[1]. Результатом такої роботи є велика кількість пусків і зупинок енергообладнання.

Під час даних процесів спостерігається найскладніші умови експлуатації, адже висока температура, інтенсивні статичні та динамічні навантаження є специфічними факторами експлуатації парових турбін, які викликають втомне пошкодження конструктивних елементів ротора, а саме валів, дисків, лопаток[2].

Важливим є те що під час роботи в умовах складного термомеханічного навантаження (пуск, стаціонарний режим роботи та зупинка тощо) критичні конструктивні елементи, такі як виїмки та канавки, можуть бути схильні до пошкоджень, пов'язаних із взаємодією повзучості та втоми. Крім того, зростаюча доля пусків-зупинок обладнання електростанцій великої потужності, також, викликає занепокоєння щодо безпечної роботи роторів парових турбін[3]

Об'єктом дослідження є ротор середнього тиску парової турбіни К-200-130. Оскільки найбільш навантаженою та високотемпературною областю даного ротора є зона регулюючого ступеня, його розрахункову модель було скорочено. Розглядається частина ротора від середини шийки валу в зоні опорно-упорного підшипника до диску 5-го ступеня.

З метою визначення розподілу термічних напружень в роторі середнього тиску, вирішується задача нестационарної теплопровідності, яка в загальному випадку може бути описана рівнянням:

$$\operatorname{div}[\lambda(T) \cdot \operatorname{grad}(T)] = c(T) \cdot \gamma(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності сталі,  $c$  – питома теплоємність,  $\gamma$  – питома вага, що є функціями температури  $T$  і координат при початкових умовах  $T_0 = T(r, z, \theta, 0)$ ,  $r, z, \theta$  – циліндричні координати,  $\tau$  – розрахунковий час.

Даний розподіл температур в будь який момент часу, що отриманий в результаті досліджень в подальшому буде використаний як граничні умови при розрахунку напружено-деформованого стану ротора.

Оскільки ротор є осесиметричним, дослідження його теплового та напружено-деформованого стану виконано у двовимірній постановці.

Розрахункова модель ротора була дискретизована на 55 тис. скінченних елементів трикутного типу. І було обрано характерні області дослідження динаміки зміни температур та інтенсивності напружень в роторі : 1 – шийка валу в області першої камери ущільнень з боку паровпуску, 2 – термокомпенсаційна канавка між другим та третім сегментом переднього кінцевого ущільнення, 3 – радіусний перехід від сегментів кінцевих ущільнень до проточної частини турбіни, 4 – хвостове кріплення регулюючого ступеня, 5 – галтель регулюючого ступеня зі сторони наступного ступеня, 6 – осьовий отвір ротора під

регулюючим ступенем.

Загальна тривалість пуску турбіни з холодного стану за технологією що використовується на Бурштинській ТЕС складає (8700 с). Динаміка зміни температур в характерних областях ротора середнього тиску протягом пуску представлена на рис. 1.

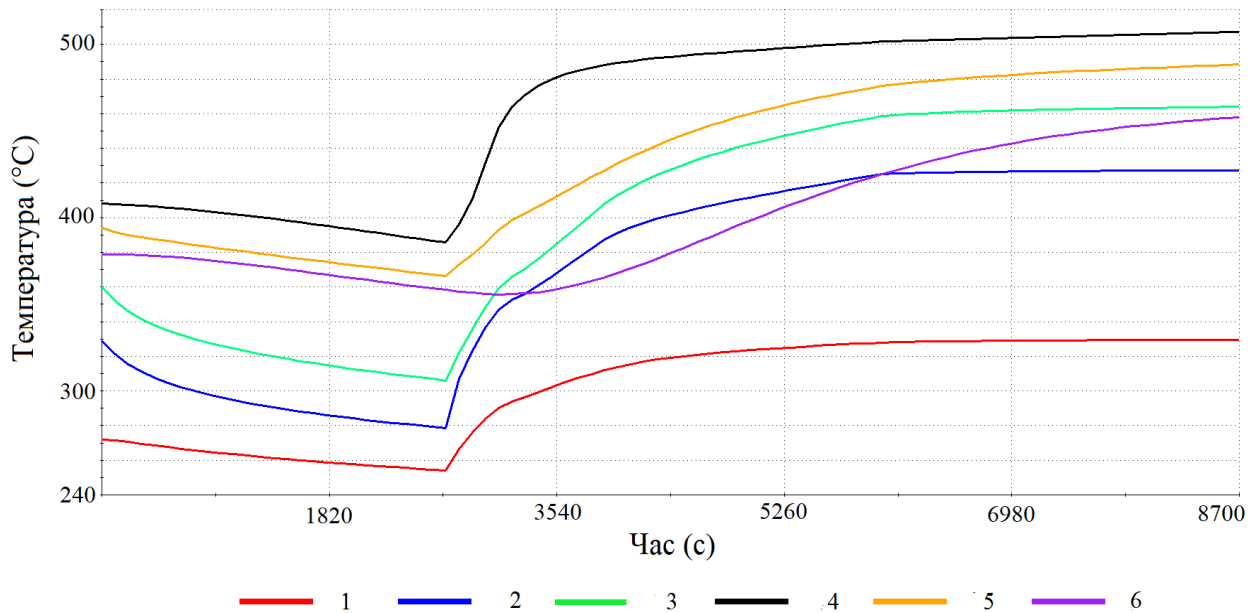


Рис. 1. Динаміка зміни температур в характерних областях ротора середнього тиску турбіни К-200-130 при пуску з гарячого стану

При пуску з ГС металу спостерігається цікава обставина – заохолодження досліджуваної області протягом перших 3000 с пуску. Це пов'язано з тим, що на початкових етапах пуску основний метал ротора охолоджується протіканнями ущільнюючої пари в проточну частину, а потім значно дросельованою свіжою парою в органах паророзподілення при достатньо високій температурі металу. В подальшому відбувається зростання температури до моменту стабілізації.

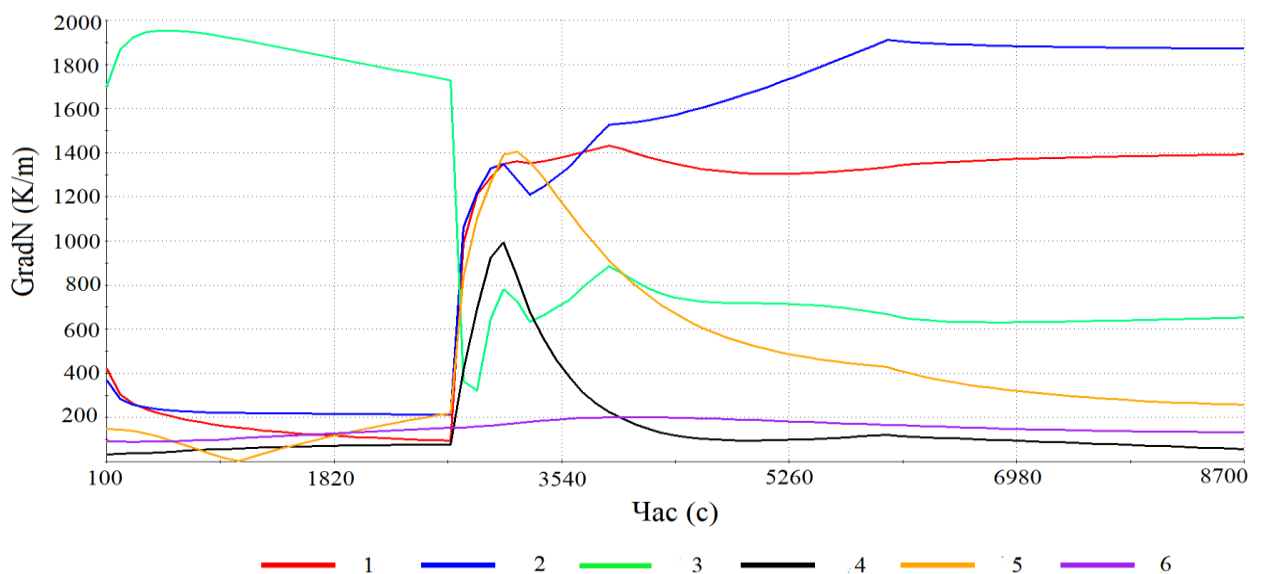


Рис. 2. Динаміка зміни градієнтів температур в характерних областях ротора середнього тиску турбіни К-200-130 при пуску з гарячого стану

Найбільша нерівномірність температурного поля помітна в моменти часу 2800-3500 с для всіх областей дослідження окрім осевого отвору ротора (т. 6). Винятком є радіусний перехід від сегментів кінцевих ущільнень до проточної частини турбіни де значними є значення градієнта температури в момент часу 100-2800 с. Найбільший рівень градієнтів температур характерних для областей кінцевих ущільнень ротора (т. 1-3 ), що пов'язано зі значним дроселюванням пари в сегментах ущільнень. Отриманий розподіл градієнтів температур дозволяє встановити періоди найбільшого впливу напружень від нерівномірності температурного поля на загальний складний напружено-деформований стан ротора.

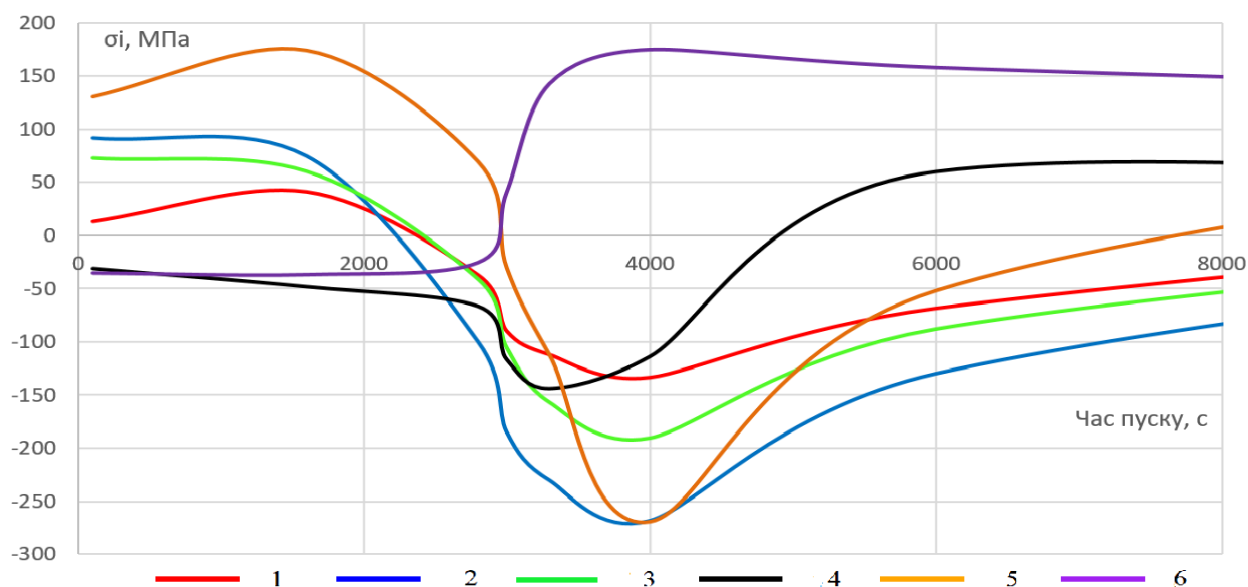


Рис. 3. Динаміка зміни інтенсивності напружень в характерних областях ротора середнього тиску турбіни К-200-130 при пуску з гарячого стану

Найбільші за модулем напруження характерні для областей 2(термокомпенсаційна канавка між другим та третім сегментом переднього кінцевого ущільнення) та 3 (радіусний перехід від сегментів кінцевих ущільнень до проточної частини турбіни) та складають 250 МПа. В цілому, високі напруження спостерігаються в усіх теплових канавках ущільнень та галтелях ступенів турбіни. Ці області є найбільш вірогідними зонами зародження кільцевих тріщин під час пускових операцій турбіни.

У цілому, зміни напружень для визначених точок у часі мають кілька спільних рис: невеликі напруження під час попереднього прогріву ротора, їх різке збільшення під час запуску турбіни до режиму холостого ходу та послідовне зменшення з завершенням стабілізації теплового поля після пуску.

Отримані результати щодо розподілу температур і напружень в роторі середнього тиску представляють великий інтерес для прогнозування тривалості роботи турбіни К-200-130 та продовження її експлуатації понад нормативний термін служби.

#### Перелік посилань:

1.Пешко В. А., Ліщук С. Р. (2023). Управління витратою палива енергоблока 200 МВт при роботі в режимі частих пусків. Енергетика: економіка, технології, екологія, 4, 128-133. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290940>

2.Andrzej Rusin., Grzegorz Nowak , Henryk Łukowicz , Wojciech Kosman , Tadeusz Chmielniak , Maciej Kaczorowski(2021) Selecting optimal conditions for the turbine warm and hot start-up. Energy, Volume 214. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118836>

3. Yang Liu , Weizhe Wang(2020) Evolution of principal stress of a turbine rotor under cyclic thermo-mechanical loading. Engineering Failure Analysis, Volume 109, January 2020, 104242. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104242>

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Джежулей В.О.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Пешко В.А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=MLIjHJsAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВПЛИВ ПРИТИСКНИХ ЗУСИЛЬ В ФЛАНЦЯХ ТУРБІНИ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН

Напружено-деформований стан для корпусних елементів формується внаслідок взаємодії температурних напружень, сил, що виникають від парового тиску, та реакцій опору. Забезпечуючи парову щільність верхньої та нижньої частин корпусу, використовується фланцеве з'єднання цих частин за допомогою шпильок. Під час монтажних робіт та планово-попереджувальних ремонтів, при затягуванні шпильок, розвиваються значні зусилля, які досягають великих значень. Саме ці зусилля повинні бути обов'язково враховані при оцінці напружено-деформованого стану корпусних елементів оскільки вони значно впливають на напружено-деформований стан корпусних елементів турбіни.

Оцінку теплового та напружено-деформованого стану корпусних елементів буде проведено на турбіні К-800-240-2. При розробці геометричної моделі зовнішнього корпусу циліндру високого тиску враховано пошкодження, яке виникає у зоні тріщин, шляхом провадження відповідних зон позначення вибірок металу.

В ході дослідження, було виявлено що у початкові моменти часу спостерігається максимальна інтенсивність напружень у зоні розточки під першою обоймою діафрагми зовнішнього корпусу 159 МПа. З часом ці напруження послаблюються і стабілізуються на рівні  $\sigma$  67,1 МПа при номінальному режимі роботи. Під час навантаження турбоагрегату на потужність 120 МВт найбільш напруженими зонами стають передні та задні кінцеві ущільнення, місця кріплення першої ступені тиску та область зовнішнього корпусу, де основний потік пари зазнає розвороту (рис.1). Найбільш напруженим періодом під час запуску з номінального стану є момент початку навантаження турбоагрегату до досягнення потужності 800 МВт після перебування на потужності 360 МВт. Інтенсивність напружень досягає максимальних значень в області передніх кінцевих ущільнень ( $\sigma_i=317,1$  МПа). Однак із завершенням процесу запуску інтенсивність напружень зменшується і стабілізується на рівні  $\sigma_i=110,7$  МПа для цієї зони.

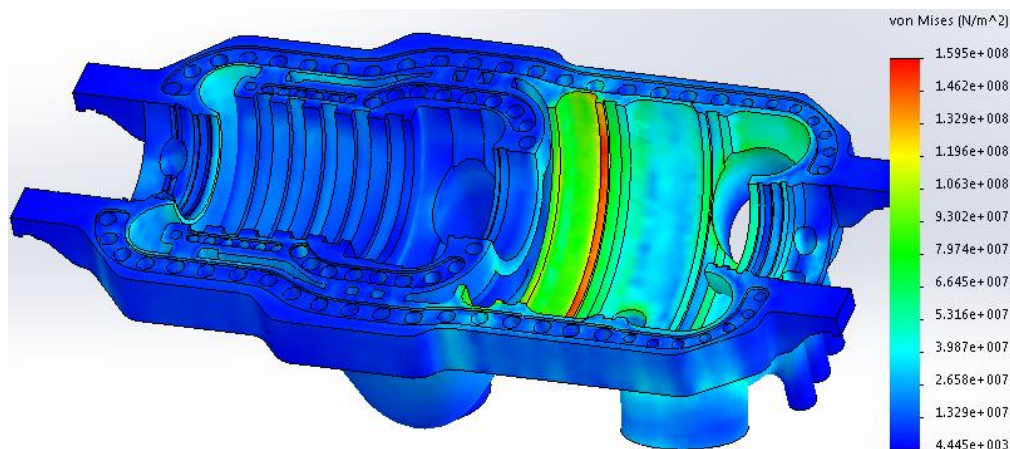


Рисунок 1 – НДС корпусних елементів в момент часу 300 с

Врахування реального поточного зусилля затяжки шпильок вносить вагомi зміни до

НДС корпусних елементів і збільшує максимальну інтенсивність напружень на 17,7% в зоні задніх кінцевих ущільнень. Для решти областей проточної частини спостерігається незначне збільшення місцевих напруженостей. Для зовнішньої поверхні корпусу врахування зусиль затягування шпильок спричинило збільшення значень інтенсивностей напружень в областях прилягання вихлопних патрубків на 14–16 %, а також безпосередньо в самому фланцевому з'єднанні, через появу контактних напруженостей металу фланців з гайками шпильок (70–80 %).

У парових турбінах з початковим тиском пари 23,6 МПа здебільшого використовуються шпильки з легованої сталі 25Х2М1Ф. Поточні зусилля затягування для кожної групи шпильок залежать від їхнього діаметру і становлять приблизно  $Q_z=3-4$  МН. Врахування зусиль затягування шпильок призвело до збільшення максимальної інтенсивності напружень зі значення  $\sigma_i=136,4$  МПа (рис.2) до  $\sigma_i=160,6$  МПа (на 17,7%), причому зоною максимальних напружень на стаціонарному режимі залишаються задні кінцеві ущільнення. Для інших областей проточної частини спостерігається невелике (2-4%) місцеве збільшення напружень. Щодо зовнішньої поверхні корпусу, врахування зусиль затягування шпильок призвело до збільшення інтенсивностей напружень в областях прилягання вихлопних патрубків на 14–16%, а також безпосередньо в самому фланцевому з'єднанні через появу контактних напружень металу фланців з гайками шпильок.

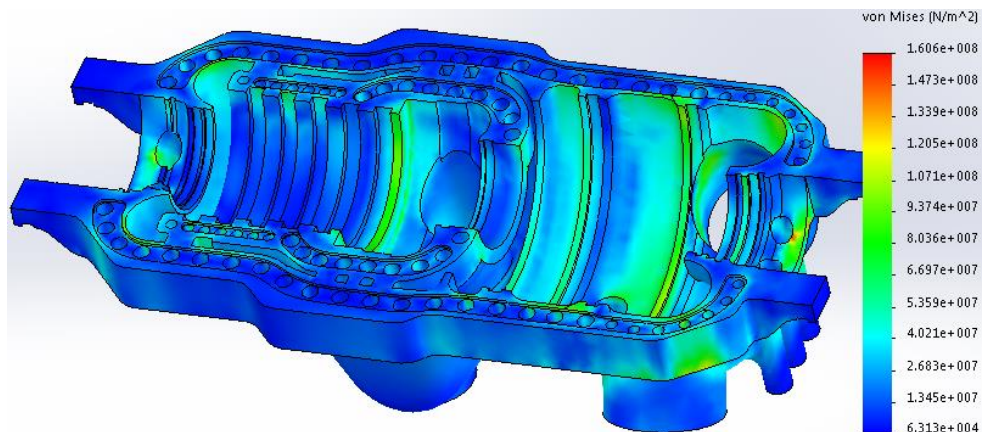


Рисунок 2 – НДС корпусу ЦВТ турбіни К-800-240-2 з врахуванням зусиль затягування шпильок на номінальному режимі експлуатації

**Висновки.** Здатність зменшити величину інтенсивності напружень шляхом обмеження впливу зусиль затягування шпильок при забезпеченні парової щільності може позитивно вплинути на ресурсні характеристики корпусу і має бути розглянута як метод управління залишковим ресурсом.

**Перелік посилань:**

1. Рационалізація притискових зусиль у фланцях циліндрів турбін для забезпечення довговічності роботи / Джежулей В.О., Пешко В.А. // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. У 2-х т.: Матеріали ХХ Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і студ., м.Київ, 25–28 квіт. 2023 р. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. – Т. 1. – С. 157–158.
2. Черноусенко О.Ю. Вплив роботи енергоблоків ТЕС в маневреному режимі на вичерпання ресурсу енергетичного обладнання / О.Ю. Черноусенко, В.А. Пешко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 10(1182). – С. 6–16.
3. Peshko, V., Chernousenko, O., Nikulenkova, T., Nikulenkov, A. (2016). Comprehensive rotor service life study for high & intermediate pressure cylinders of high power steam turbines. *Propulsion and Power Research*, Volume 5, Issue 4, 302–309.



<sup>1</sup> Аспірант 1 курсу Коновалюк О.Л.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Пешко В.А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=MLljHJsAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВПЛИВ ПУСКОВОГО ГРАФІКА ЕНЕРГОБЛОКА НА ТЕПЛОВИЙ СТАН РОТОРА ПАРОВОЇ ТУРБІНИ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Забезпечення надійної експлуатації енергосистеми вимагає наявності достатньої кількості маневрових потужностей. Високою маневреністю характеризуються гідроакumuлюючі електростанції та газотурбінні установки. Однак енергосистеми багатьох країн світу, таких як Китай, США, Україна, мають недостатній відсоток таких потужностей у своєму балансі. З цієї причини, енергоблоки теплових електростанцій (ТЕС) часто залучаються до роботи в піковій та напівпіковій частині графіка електричних навантажень. Однак, така експлуатація супроводжується погіршенням економічності, екологічності, надійності та довговічності роботи обладнання [1]. Тому робота спрямована на оцінку впливу характеру пускового графіка турбіни на тепловий стан її найбільш напружених роторів є актуальною, оскільки саме тепловий стан визначає рівень температурних напружень в основному металі та загальну довговічність експлуатації парової турбіни [2].

**Аналіз останніх досліджень.** При плануванні раціональних режимів експлуатації маневрених потужностей в енергосистемах, багато авторів відмічають що необхідно враховувати фактор накопичення малоциклової втоми у відповідальних елементах обладнання [1–4]. Зокрема в роботі [2] виконано оптимізацію реального графіку електричного навантаження парогазової установки потужністю 400 МВт. В результаті вдалось суттєво скоротити циклічне пошкодження парової та газової турбіни при роботі. Разом з цим відмічається що збільшується перевитрата палива через необхідність стабілізації температурних полів та більш плавного навантаження установок. Однак сумарні витрати на експлуатацію установки при роботі по оптимізованому графіку є меншими.

Моделюванню малоциклової втоми роторної сталі FB2 для парових турбін присвячено роботу [3]. Дослідження виконувались для широкого діапазону температур (20–600 °С) та амплітуд деформацій (0,8–1,2%). Авторами встановлено допустиме число циклів ізотермічного навантаження для заданого діапазону змінних параметрів. Також розроблено експериментальні криві малоциклової втоми сталі, які представляють високий інтерес при розрахунках залишкового ресурсу турбінного обладнання [4].

**Формулювання мети.** Метою роботи є порівняння впливу двох реально-існуючих пускових графіків енергоблока 200 МВт на тепловий стан ротора середнього тиску турбіни К-200-130, що представляє значний інтерес при оцінці малоциклової втоми, яка накопичується в основному обладнанні.

**Основна частина.** Тепловий стан ротора в нестационарній постановці отримується шляхом вирішення крайової задачі теплопровідності, що в загальному випадку має вид:

$$\operatorname{div}[\lambda(T) \cdot \operatorname{grad}(T)] = c(T) \cdot \gamma(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

де  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\gamma$  – функції температури і координати при початковій умові  $T_0 = T(x, y, z, 0) = f_0(x, y, z)$  і граничних умовах I, II, III, IV роду.

Розрахунок граничних умов теплообміну є окремою складною задачею, яка була виконана авторами раніше.

Розглянемо два графіки пуску з холодного стану (ХС) металу, що використовуються

на реально існуючих енергоблоках потужністю 200 МВт (рис. 1). Пуск з ХС виконується при температурі металу в області регулюючого ступеня турбіни  $t_m < 150^\circ\text{C}$ . Такий пуск виконується на ковзаючих параметрах пари.

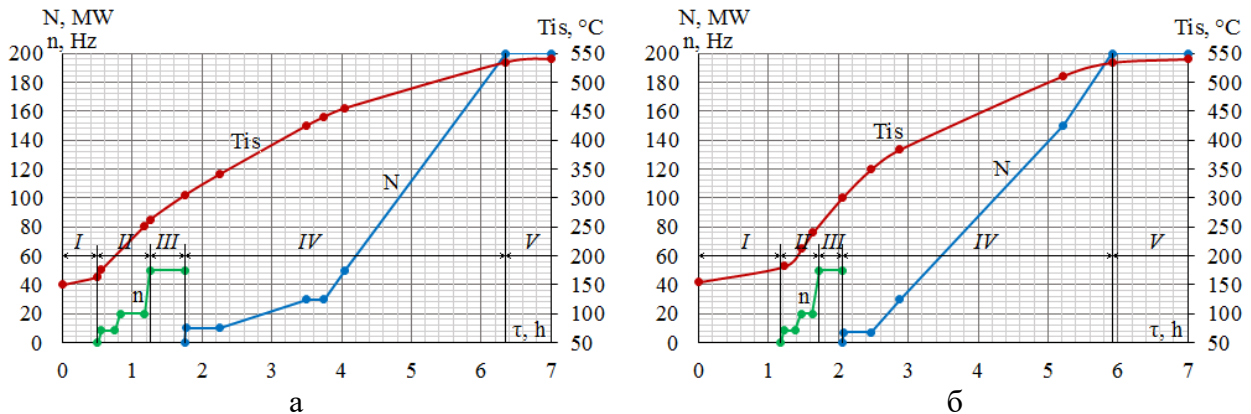


Рисунок 1 – Графік пуску енергоблока 200 МВт:

а – Блок 1, б – Блок 2.  $N$  – електрична потужність блока,  $n$  – частота обертання ротора,  $T_{is}$  – температурна промперегріву

Основними етапами пуску для турбінної установки можна вважати (рис. 1): I – попередній прогрів паропроводів та подальший прогрів проточної частини, II – поштовх турбіни до виходу на холостий хід (обертання роторів з частотою 50 Гц), III – синхронізація турбогенератора з електромережою, IV – набір навантаження до номінальної потужності 200 МВт, V – стабілізація температурного поля. Тривалість режиму стабілізації не регламентується та може складати декілька годин. Для зручності порівняння графіків пуску блоку №1 та №2 режим стабілізації триває до сьомої години пуску та в подальших розрахунках не враховувався. Це пов'язано з тим, що після виходу енергоблоку на потужність 200 МВт рівень напружень в усіх досліджуваних областях ротора поступово зменшується.

Нерівномірність температурного поля на змінних режимах роботи турбіни є однією з причин появи високих напружень. Для дослідження динаміки зміни градієнтів температур було обрано характерні області ротора (рис. 2), в яких спостерігався високий рівень напружень або поява кільцевих тріщин.

Порівнюючи загальну динаміку зміни градієнтів температур (рис. 3), слід зауважити, що найбільша нерівномірність поля температур припадає на період поштовху роторів від 5 об/хв до 3000 об/хв, що відповідає II етапу на пускових графіках (рис. 2). В ці моменти часу суттєво зростає витрата пари на турбоустановку, що збільшує інтенсивність теплообміну між паром та основним металом.

Максимальні значення градієнтів температур для обох енергоблоків подібні –  $\text{grad}T_1 = 4080 \text{ K/m}$  та  $\text{grad}T_2 = 4060 \text{ K/m}$ . Максимум спостерігається в області вибірки тріщини в галтельному скругленні між 1 сегментом ущільнення і 13 ступенем та припадає на момент поштовху ротору до частоти холостого ходу після витримки на частоті 1200 об/хв, коли витрата пари зростає найбільш стрімко за короткий проміжок часу.

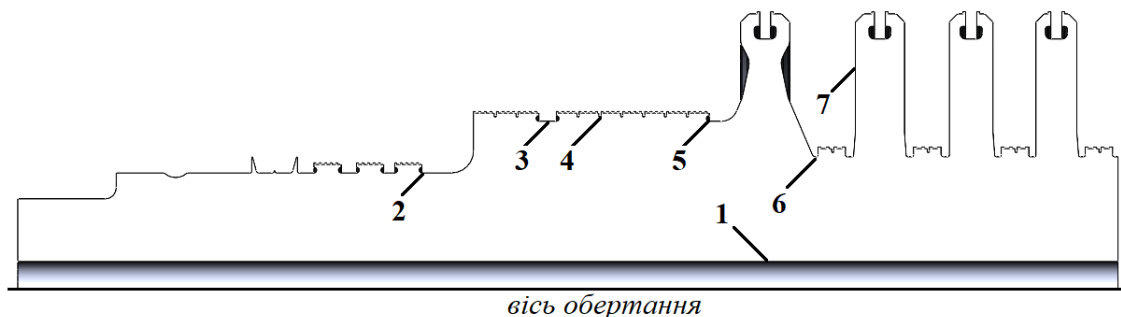


Рисунок 2 – Области дослідження градієнтів температур в роторі турбіни

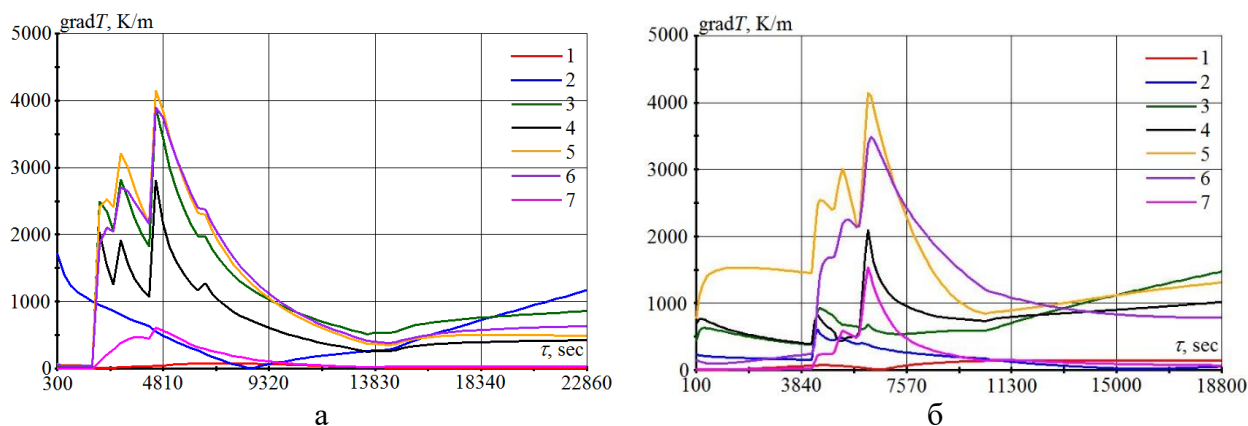


Рисунок 3 – Динаміка зміни градієнтів температур в характерних областях ротора середнього тиску під час пуску з ХС за різними графіками: а – Блок 1, б – Блок 2.

Для решти досліджуваних областей помітний суттєво менший рівень градієнтів температур для енергоблоку № 2 в порівнянні з № 1, а також менш значне коливання цієї величини. Причиною покращення рівномірності температурного поля блоку № 2 слугує більш тривалий етап прогріву проточної частини при пуску (етап I на рис. 2).

Із закінченням пускового режиму нерівномірність температурного поля зменшується для обох енергоблоків.

Додатково слід зауважити, що такі високі значення градієнтів температур в усіх областях пов'язані з тим, що досліджувались вони на поверхні металу. Значення градієнтів температур суттєво зменшуються для глибших шарів металу та є достатньо рівномірними для осевого отвору турбіни (зона 1 на рис. 2). Проте в той же час, верхні шари металу представляють найвищий інтерес, оскільки саме в них утворюються мікро пошкодження при експлуатації.

**Висновки.** Отримані результати свідчать про значний вплив характеру пускового графіка на тепловий стан ротора середнього тиску турбіни. Найбільша нерівномірність теплового поля спостерігається на етапі поштовху турбіни до холостого ходу та під час синхронізації генератора з мережею. Різна тривалість етапів прогрівання та відмінна температура робочої пари формують різну динаміку зміни градієнтів температур. Зменшення нерівномірності температурного поля дозволяє суттєво скоротити рівень термічних напружень в основному металі та уповільнити темпи накопичення малоциклової втоми. Такий підхід можна розглядати як один з методів управління ресурсом, що є перспективним напрямом дослідження.

#### Перелік посилань:

1. O. Chernousenko, V. Peshko, "Influence produced by the operation of the power units of thermal power plants in the maneuver load mode on the reliability and accident rate of power equipment," *Power and heat engineering processes and equipment*, 2016, vol. 8(1180), pp. 100–106, <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2016.08.14>
2. S. Wogrin, D. Galbally, and A. Ramos, "CCGT unit commitment model with first-principle formulation of cycling costs due to fatigue damage," *Energy*, 2016, vol. 113, pp. 227–247, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.014>
3. A. Azeez, R. Eriksson, M. Calmunger, S. B. Lindström, and K. Simonsson, "Low cycle fatigue modelling of a steam turbine rotor steel," *Procedia Structural Integrity*, 2019, vol. 23, pp. 149-154, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.078>
4. P. Yue, J. Ma, H. Huang, Y. Shi, and J. W. Zu, "Threshold damage-based fatigue life prediction of turbine blades under combined high and low cycle fatigue," *International Journal of Fatigue*, 2021, vol. 150, 106323, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106323>

<sup>1</sup> Аспірант 1 курсу Шахбазов І.О.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Сірий О.А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=FmKF8DsAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ АМІАЧНОГО ПАЛИВА В ЕНЕРГЕТИКУ УКРАЇНИ

**Постановка проблеми та її актуальність.** З часів промислової революції спалювання було основним методом перетворення енергії для людської діяльності, включаючи виробництво електроенергії та транспорт. На сьогоднішній день ці сектори продовжують значною мірою покладатися на вуглеводневе паливо [1]. Найбільший абсолютний приріст викидів діоксидів вуглецю (CO<sub>2</sub>) у 2022 році був від виробництва електричної та теплової енергії [2]. При збільшенні глобального попиту на електроенергію на 2,7%, викиди в енергетичному секторі зросли на 1,8% (або 261 Мт), досягнувши історичного максимуму в 14,6 Гт (Рис. 1).

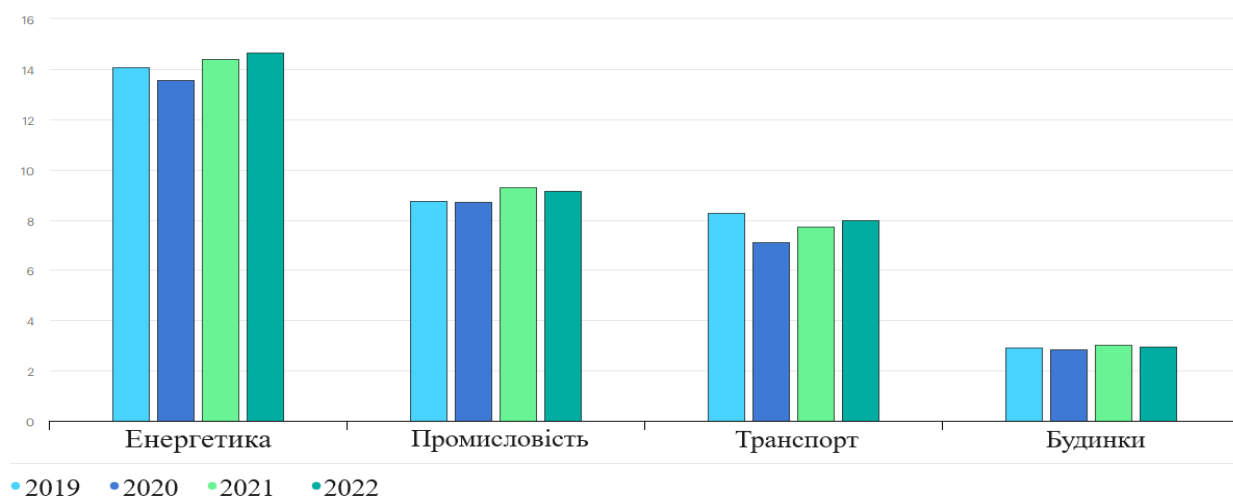


Рисунок 1 – Глобальні викиди CO<sub>2</sub> за секторами, 2019–2022 [2]

Таким чином, значна частина викидів CO<sub>2</sub> виробляється через енергетичний сектор, що є головним винуватцем глобального потепління, підриваючи боротьбу зі зміною клімату.

Майбутнє безвуглецевого виробництва електроенергії залежить головним чином від використання відновлюваних, низьковуглецевих або безвуглецевих видів палива, які можуть задовольнити збільшення потреби в енергії, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище.

**Аналіз останніх досліджень.** Аміаку (NH<sub>3</sub>) приділяється все більша увага як одному з найпривабливіших енергоносіїв через його безвуглецеву природу та створену надійну інфраструктуру для його зберігання та розподілу.

Спочатку аміак розглядався як носій і постачальник водневої енергії, лінія подачі в цьому контексті включає його розкладання на водень і азот в точці доставки [3]. Однак в останні кілька років використання аміаку тепер включає його безпосереднє використання в якості палива [4–7].

Аміак має здатність горіти і, оскільки молекула NH<sub>3</sub> не містить вуглецю, горить без викидів CO<sub>2</sub>, таким чином створюючи інтерес до аміаку як палива. Це можна побачити зі

стрімкого збільшення наукових публікацій, пов'язаних із спалюванням аміаку, після оглядової статті Hideaki Kobayashi та ін. [4].

На той час в Японії вже розглядали роботу паливоспалювальних установок із застосуванням аміаку. Інститут відновлюваної енергетики Фукусіми повідомив про успішне виробництво електроенергії за допомогою газотурбінної установки, що працює на чистому аміаку [5]. Дослідницька група Інституту провела дослідно-конструкторські роботи над газовою турбіною і постачанням аміаку, в результаті чого створила газову турбіну потужністю 41,8 кВт, використовуючи аміак основним паливом, та провела демонстраційне випробування. Основними цілями ефективності було збереження сумісності з існуючою системою виробництва електроенергії та мінімізація викидів оксидів азоту (NO<sub>x</sub>).

**Формулювання мети.** Зважаючи на посилений інтерес до аміаку та окреслену проблему забруднення атмосфери, метою даної роботи є висвітлення можливості використання аміаку як альтернативного палива задля досягнення низьковуглецевого розвитку держави та посилення боротьби з парниковими газами.

**Основна частина.** Аміак є важливим вектором енергетичної безпеки під час декарбонізації різних енергетичних секторів кінцевих споживачів.

Варто зазначити, що аміак володіє різними характеристиками горіння порівняно з іншими видами палива, і важливо зрозуміти, чим вони відрізняються від метану чи водню. Для порівняння у таблиці 1 наведено теплові властивості та основні характеристики горіння аміаку та інших газоподібних видів палива [4].

Таблиця 1 – Термодинамічні характеристики аміаку та інших вуглеводневих палив

Паливо	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
Нижча теплотворна здатність, МДж/кг	18,6	120	50	46,4
Межа займистості (коефіцієнт надлишку палива)	0,63–1,4	0.1–7,1	0,5–1,7	0,51–2,5
Адіабатична температура полум'я, °С	1800	2110	1950	2000
Максимальна швидкість ламінарного горіння, м/с	0,07	2,91	0,37	0,43
Мінімальна температура самозаймання, °С	650	520	630	450

Як видно з таблиці 1, теплотворна здатність і максимальна швидкість ламінарного горіння чистого аміачно-повітряного полум'я дуже низькі порівняно з типовим вуглеводневим паливом. Через відсутність CO<sub>2</sub> в продуктах згорання аміаку, радіаційні властивості низькі відносно вуглеводневого полум'я.

У галузі виробництва теплової енергії закордоном вивчаються характеристики горіння аміаку та його застосування в газових турбінах і вугільних котлах.

На відміну від газотурбінних установок малого та середнього розміру, очікується, що великі газові турбіни матимуть суворіші обмеження щодо розміру камери згорання для повного згорання аміаку та складніший контроль NO<sub>x</sub> в умовах високотемпературного горіння. Компанія Mitsubishi Power оголосила про початок розробки аміачної газової турбіни потужністю 40 МВт у березні 2021 року та має на меті вивести її на комерційне виробництво у 2025 році після проходження робочих процесів горіння та відповідних випробувань [6]. Технічною проблемою спалювання NH<sub>3</sub> є утворення NO<sub>x</sub> через азотний компонент палива, і Mitsubishi намагається вирішити цю проблему за допомогою нової камери згорання аміаку у газовій турбіні серії H-25 та селективного каталітичного

відновлення (СКВ) після неї.

У той час коли в газових турбінах досліджують чисте використання аміачного палива, в енергетичних котлах розглядають варіант застосування аміаку у суміші палив.

Компанія Chugoku Electric Power спробувала побудувати вугільно-аміачну електростанцію на 2-му блоці японської електростанції Mizushima (потужність 156 МВт) [7]. У цьому демонстраційному тесті викиди CO<sub>2</sub> були зменшені за рахунок кількості аміаку, що спалюється разом з вугіллям, і не було жодних змін у температурі металу теплообмінника. Аміачне паливо повністю згорало і не викидалося назовні. Було підтверджено, що екологічні стандарти були задоволені без будь-якої різниці. Таким чином, технологію спільного спалювання вугілля й аміаку можна застосовувати на електростанціях в комерційній експлуатації, як засіб зменшення викидів парникових газів.

У вітчизняній літературі вагомий внесок стосовно аміаку як безвуглецевого майбутнього України зроблено Інститутом теплоенергетичних технологій. Зокрема, одне з досліджень присвячено особливостям виробництва зеленого аміаку для України [8]. Наводиться зелений енергетичний перехід України до 2050 року, що передбачає низку енергетичних трансформацій, включаючи декарбонізацію, а також здійснено оцінку необхідної кількості енергії для виробництва зеленого аміаку станом на 2020 рік. Підкреслюється, що це потребує великих витрат електроенергії: для річного виробітку 5 млн т NH<sub>3</sub> споживання становить 55 млрд кВт·год.

**Висновки.** Теплові електростанції, включаючи вугільні електростанції та газові турбіни, є великим джерелом викидів CO<sub>2</sub>, і ефект скорочення викидів вуглецю може бути максимізований, якщо в системах спалювання використовується аміак.

Щоб сприяти декарбонізації енергетичного сектора, використання аміаку як палива безпосередньо, або змішаного з іншими видами палива, може мати значні переваги. Завдяки добре налагодженій виробничій і транспортній інфраструктурі аміак є привабливим стійким енергоносієм. Однак використання аміаку при спалюванні не позбавлене проблем, включаючи низьку швидкість полум'я, вузькі межі займистості, схильність до утворення NO<sub>x</sub>.

Оскільки спалювання аміаку характеризується високими викидами NO<sub>x</sub> і низькою стабільністю полум'я, потрібне ретельне дослідження робочого процесу горіння перед широким застосуванням аміаку у паливоспалюючому обладнанні.

#### **Перелік посилань:**

1. Data and statistics – IEA. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser/?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&>.
2. CO<sub>2</sub> Emissions in 2022 – Analysis – IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>.
3. A Roadmap to the Ammonia Economy / D. R. MacFarlane та ін. 2020. Т. 4, № 6. 1186–1205. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.04.004>.
4. Science and technology of ammonia combustion / Н. Kobayashi та ін. Proceedings of the Combustion Institute. 2019. Т. 37, № 1. 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>.
5. Micro gas turbine firing ammonia / N. Iki та ін. In Proceedings of the 12th Annual NH<sub>3</sub> Fuel Conference, м. Chicago, IL, 20–23 вер., 2015 р.
6. Mitsubishi Power Commences Development of World's First Ammonia-fired 40MW Class Gas Turbine System – Targets to Expand Lineup of Carbon-free Power Generation Options with Commercialization around 2025. Mitsubishi Power. URL: <https://power.mhi.com/news/20210301.html>.
7. Yoshizaki T. Test of the co-firing of ammonia and coal at Mizushima power station. J. Combust. Jpn. 2019. – № 61. – С. 309–312.
8. Вольчин І.А., Ращепкін В., & Череватський Д. (2022). Виробництво зеленого амоніаку для зеленого вибору України. *Системні дослідження в енергетиці*, 1-2 (68-69), 127-138. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.127>.

<sup>1</sup> Аспірант 2 курсу Арзікулов Т.С.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Баган Т.Г.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&pli=1&user=THGfTTsAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІАТЕ - АЕП

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ГАЗОВОГО ФАКЕЛУ ЗАСОБАМИ Й МЕТОДАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Проблема ідентифікації газового факелу є однією з ключових проблем оптимізації процесу спалення газів в промислових котлах більше тридцяти років. Через агресивне середовище всередині факела, яке спричинене високою температурою та наявністю окисників, безпосереднє розташування аналізаторів в полум'ї, для визначення його поточного стану не є можливим. Через це, зазвичай використовують аналіз вторинних параметрів, такі як: концентрація кисню в димових газах; температура димових газів; концентрація чадного газу; тощо, які мають інертний характер порівняно з самим швидкоплинним процесом спалення. Засоби комп'ютерного зору дозволяють зафіксувати зміну параметрів спалення майже миттєво за рахунок впливу якісного режиму процесу горіння та продуктів спалення на його візуальні прояви.

**Аналіз останніх досліджень.** На сьогодні, процес ідентифікації полум'я за допомогою засобів комп'ютерного зору широко досліджується зарубіжними вченими з Великої Британії, Південної Кореї, Китаю та інших країн. Так, в [1] розглядається використання засобів комп'ютерного зору для побудови моделі пропанового факелу. Тема роботи фактично збігається з дослідженням, що проводиться мною, за виключенням умов згорання палива.

В дослідженні [1] наочно приведено зображення залежності геометричного розміру факела, його форми, від режиму згорання. Результати дослідження наведено на Рисунку 1.

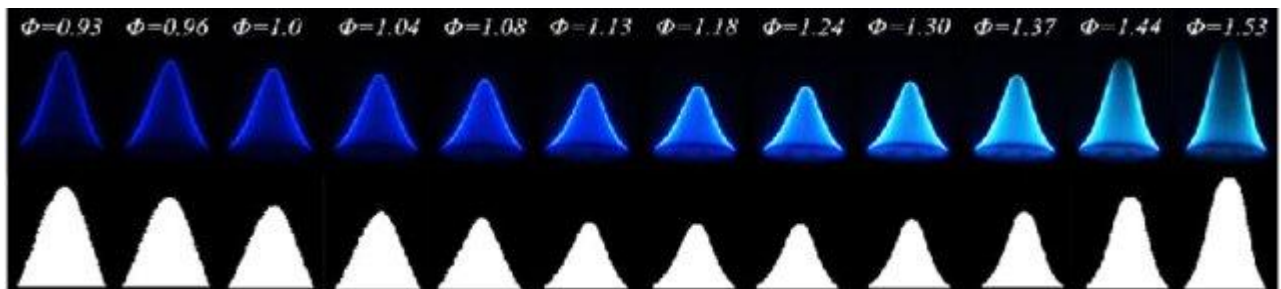


Рисунок 1 - Залежність геометричних параметрів факелу пропану від якості згорання

**Формулювання мети.** . Оскільки на процес спалення палива (газу) впливає велика кількість параметрів, процес ідентифікації факелу, його режимів горіння, є унікальним для кожного окремого об'єкту. Метою дослідження є продемонструвати залежності, що можуть бути виявлені засобами комп'ютерного зору й використані для подальшого процесу керування та оптимізації процесу спалення газу (палива). А також, в подальшому, вивести загальні принципи та рекомендації щодо побудови подібних систем керування..

**Основна частина.** Як було визначено, на процес спалення газу впливає багато параметрів. В залежності від режиму подачі газо-повітряної суміші, форми сопла, тиску, співвідношення паливо/повітря та концентрації сторонніх речовин поведінка факелу та його візуальне відображення буде різнитись. Проте, завдяки сталості хімічного складу палива, відсутності зважених частинок у димових газах, та іншим характеристикам, що

відрізняють газоподібне паливо від інших його видів, ідентифікація газового факелу простіша в багатьох аспектах.

Досить детально, питання використання засобів комп'ютерного зору для ідентифікації газового факела розглянуто в роботі [2].

Оскільки процес ідентифікації факела носить суто експериментальний характер, доцільним буде навести структуру установки, що буде використовуватись. Створена для експерименту камера спалення аналогічна до тої, що використовувалась в роботі [1], структура якої наведена нижче. Проте має наступні відмінності: ручний підпал, ущільнені дверцята із великим оглядовим вікном, більшу потужність полум'я (1-2,5 кВт).

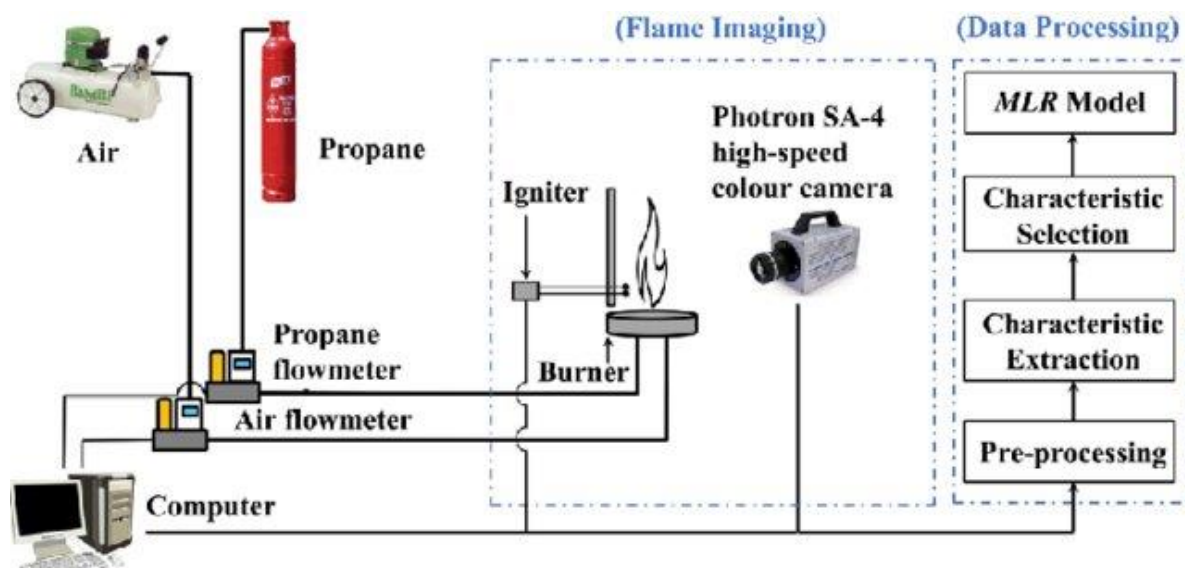


Рисунок 2 - Структура випробувального стенду

Основними завданнями експерименту є отримання набору зображень газового факелу в різних режимах горіння при різній потужності спалення. Відпрацювання алгоритмів відділення факелу від фону [3] та встановлення залежностей між візуальними проявами факела та його якісними показниками [1, 4].

**Висновки.** Загалом, за рахунок великої кількості варійованих параметрів, що різняться від об'єкта до об'єкта, проведення експериментальної ідентифікації факела є одним з основних та обов'язкових кроків при побудові системи оптимізації спалення, що заснована на засобах комп'ютерного зору.

#### Перелік посилань:

1. Hao Yang, Yufeng Lai, Xuanqi Liu, and others. Equivalence Ratio Modelling of Premixed Propane Flame by Multiple Linear Regression Using Flame Color and Spatial Characteristics. MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, 23, (2023), No. 1, 40-46
2. Hao Yang, Yuwen Fu, Jiansheng Yang. Review of Measurement Techniques of Hydrocarbon Flame Equivalence Ratio and Applications of Machine Learning. MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, 22, (2022), No. 3, 122-135.
3. Xiao Jiang, Fan Wang. Background removal in a fire detection system on videos based on CUDA. International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. Volume: 60, June 2014.
4. Mahdi Najarnikoo, Mohammad Zabetian Targhi, Hadi Pasdarshahri. Experimental study on the flame stability and color characterization of cylindrical premixed perforated burner of condensing boiler by image processing method. Energy: Volume 189, 15 December 2019.



<sup>1</sup> Магістрант 2 курсу Будя Ю.С.

<sup>1</sup> Ст.викл., к.т.н. Шелешей Т.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=bKA7mfgAAAAJ&hl=ru>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## КІЛЬКІСНІ ПОКАЗНИКИ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВИКОПНОГО ПАЛИВА

**Ель-Ніньйо, вуглецева нейтральність, «зелені технології», eco-friendly** – всі ці екзотичні слова ми чули хоча б раз у нашому повсякденному житті. За останні кілька років вони стали настільки поширеними, що жоден випуск всесвітньо відомих новинних журналів не обходиться без них. І не дарма. Людство все більше починає розуміти, що перехід до більш чистих енергоресурсів – життєво необхідний. Звісно, швидко здійснити перехід від вуглецевої індустрії до вуглецевої нейтральності не вдасться.

Не оминуть ці зміни і Україну. Згідно Енергетичної стратегії України до 2035 року: **«Безпека, Енергоефективність, Конкурентноспроможність»** (затверджена Кабміном 18 серпня 2017 року) споживання енергії вугілля має зменшитись з 30,3% (2015 р.) до 12,5% (2035 р.); природного газу – збільшитись з 28,9% до 30,2%; атомної енергії – зменшитись з 25,5% до 25%; нафтопродуктів – зменшитись з 11,8% до 7,3%; біомаси, біопалива та відходів – збільшитись з 2,3% до 11,5%; сонячної та вітрової енергії – збільшитись з 0,1 до 10,4%. Помітно, що стратегія явно накладається на загально світові тенденції розвитку енергетики. Вже станом на кінець 2019 року загальна частка у виробництві електроенергії ВЕС, СЕС, біопалива (біомаса, біогаз і т.д.) становила майже 4%.

З усього вище сказано видно – не можливо швидко і повністю відмовитись від вичопного палива. Однак можливо мінімізувати шкідливий вплив на навколишнє середовище, що особливо актуально зараз.

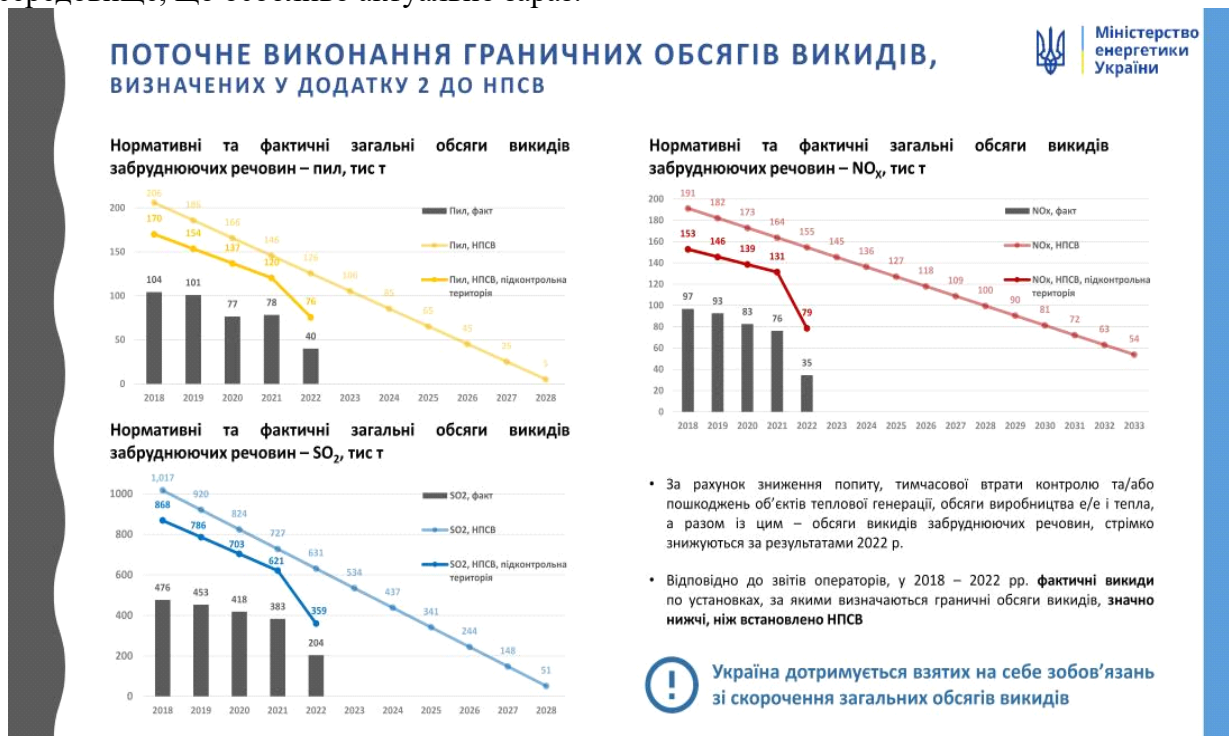


Рисунок 1 – Графіки викидів шкідливих речовин згідно НПСВ

Згідно НПСВ (Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок) Україна має забезпечити скорочення викидів пилу, діоксиду сірки та оксидів азоту і домогтися граничних концентрацій викидів цих забруднювачів. На рис.1 помітна тенденція до зменшення викидів усіх згаданих у Нацплані. Так, оператори ТЕС, ТЕЦ та великих котельень, які розташовані на підконтрольній території України і мають зобов'язання стосовно щорічного планового скорочення викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря, минулого року здійснили емісію 40,1 тис. т пилу, 203,7 тис. т діоксиду сірки та 34,5 тис. т оксидів азоту, що відповідно на 47,1%, 43,3% та 56,1% менше дозволених граничних обсягів.

Отже зменшення шкідливих викидів та покращення технологій спалювання палива – один із ключових напрямів. Одним із найважливіших завдань є зменшення викидів оксидів азоту.

Оскільки викиди діоксидів азоту впливає не лише на природу, але й на людину напряму. Оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ) утворюють смог і кислотні дощі.  $\text{NO}_x$  реагує з аміаком, вологою та іншими сполуками, утворюючи пари азотної кислоти та пов'язані з ними частинки. Вплив  $\text{NO}_x$  на здоров'я людини включає пошкодження легеневої тканини, утруднене дихання та респіраторні проблеми.

Оксид азоту ( $\text{NO}$ ) не вважається небезпечним для здоров'я за звичайних умов навколишнього середовища. Однак надлишок оксиду азоту та його продуктів може викликати респіраторні захворювання, гематологічні побічні ефекти, порушення метаболізму, низький кров'яний тиск, нудоту, блювоту та діарею.

Діоксид азоту ( $\text{NO}_2$ ) у високих концентраціях викликає запалення дихальних шляхів. Вдихання високих рівнів  $\text{NO}_2$  може збільшити ймовірність респіраторних захворювань: хрипів, кашлю, застуди, грипу та бронхіту. Люди з астмою схильні до більш інтенсивних нападів. Тривалий вплив високих рівнів  $\text{NO}_2$  може спричинити незворотні пошкодження дихальної системи.

Є кілька основних способів зменшити викиди оксидів азоту.

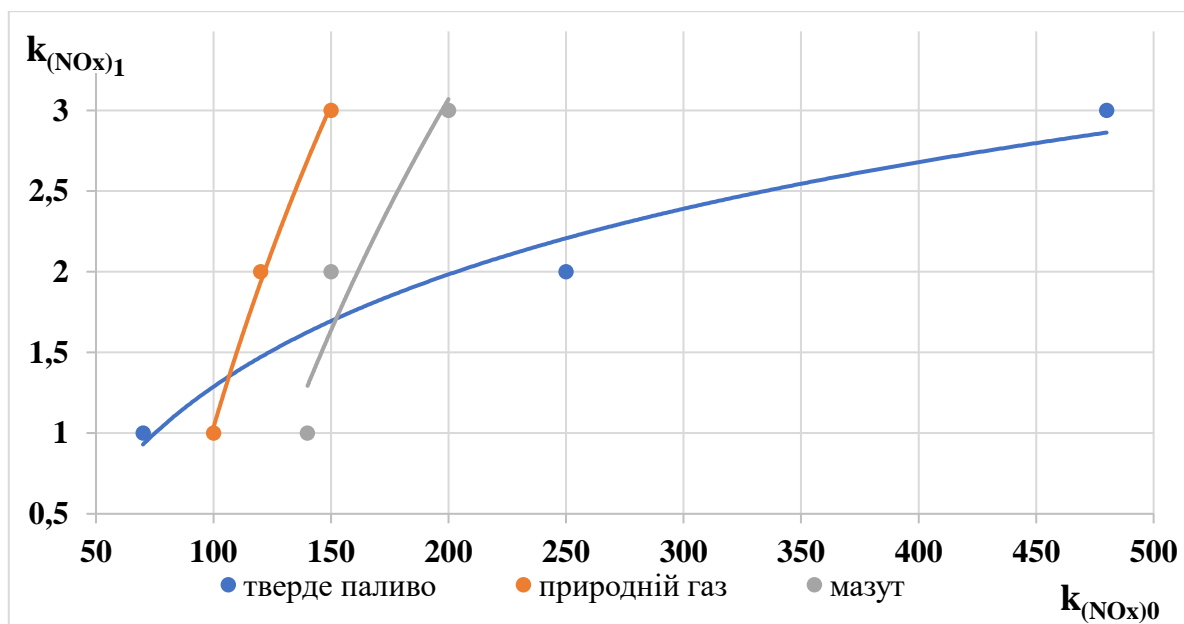


Рисунок 2 – Порівняння загального показника емісії оксидів азоту до специфічного

На рис. 2 продемонстровано викиди оксидів азоту при різних технологіях спалювання, а саме: при спалюванні твердого палива у ЦКШ (циркулюючий киплячий шар) – 70 г/ГДж; при спалюванні антрациту з рідким шлаковидаленням – 250 г/ГДж; при спалюванні кам'яного вугілля з ГЦТ (горизонтальною циклонною топкою) – 480 г/ГДж; при спалюванні природного газу за теплової потужності котла <300 МВт – 100 г/ГДж; при

спалюванні газу у камері згорання газової турбіни – 120 г/ГДж; при факельному спалюванні газу (за теплової потужності котла <300 МВт) – 150 г/ГДж; при спалюванні мазуту (за теплової потужності котла <300 МВт) – 140 г/ГДж; при спалюванні мазуту у камері згорання газової турбіни – 150 г/ГДж; при факельному спалюванні мазуту (за теплової потужності котла 300 МВт) – 200 г/ГДж.

Відмітимо, що саме при спалюванні вугілля в ГЦТ (горизонтальна циклонна топка) присутній найвищий показник емісії оксидів азоту. Це пов'язано з високою температурою, яка розвивається в циклонній камері (1700–1800 °С).

До недоліків спалювання в ГЦТ також можна віднести:

- збільшення втрати з фізичним теплом шлаку;
- підвищена витрата енергії на дуття.

До переваг відносяться:

- висока об'ємна густина тепловиділення;
- здатність роботи з малим коефіцієнтом надлишку повітря, що призводить до зниження втрати т-ти з відхідними газами.

Найменший показник емісії оксидів азоту отримуємо при спалюванні твердого палива в **циркулюючому киплячому шарі (ЦКС)**. Це, насамперед, пов'язано із технологією спалювання – воно відбувається в гарячому псевдозрідженому шарі, в який повітря для горіння вводиться в нижню частину топки. Як матеріал киплячого шару зазвичай використовується пісок, особливо при пуску. Шар, що включає паливо (від 1% до 3% матеріалу шару), золу та сорбенти, псевдозріджується повітрям, що надходить знизу вгору, а температура шару забезпечує горіння палива. Завдяки температурам горіння приблизно від 750 до 950 °С та тривалому часу перебування, ступінь вигорання палива дуже високий і тому відповідні викиди продуктів горіння відносно низькі.

**Переваги спалювання в киплячому шарі:**

- низька емісія NO<sub>x</sub>, можливість зв'язування з'єднань сірки вапняком;
- можливість спалювання подрібненого вугілля з розміром частинок до 25 мкм.

**Недоліки технології:**

- висока неповнота горіння;
- високий аеродинамічний опір;
- відносно вузький якісний діапазон регулювання котла.

**Висновки.** Все більше ознак глобального потепління фіксують учені. Як відомо, під час спалювання природного газу виділяються багато парникових газів – вуглекислий газ, оксиди азоту і т.д. Наразі, по всьому світу відбувається перехід від пиловугільного палива до газу. Тож подальший розвиток технологій спалювання газу, покращення первинних і вторинних технологій зменшення викидів має стати пріоритетом розвитку цієї галузі.

**Перелік посилань:**

1. Міністерство енергетики України. «Україна дотримується взятих зобов'язань щодо скорочення загального обсягу викидів» URL: <https://mev.gov.ua/novyna/ukrayina-dotrymuetsya-vzyatykh-zobovyazan-shchodo-skorochennya-zahalnoho-obsyahu-vykydiv> (від 31.03.2023)

2. Питомі показники викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від основних виробництв промисловості та сільського господарства. Київ: Мінекоресурсів України, 2001.

3. ГДК 34.02.305-2002. Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. – К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2002.

4. Бойчук Ю.Д. Екологія і охорона навколишнього середовища: навчальний посібник / Ю.Д. Бойчук, Е.М. Солошенко. – Київ: Видавничий дім “Княгиня Ольга”, 2005. – 302 с.

<sup>1</sup> Аспірант 2 курсу Дульський А.І.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Сірий О.А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=FmKF8DsAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ОСОБЛИВОСТІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПОЛУМ'Я В СТРУМЕНЕВО-НІШОВІЙ СИСТЕМІ ГОРІННЯ ПАЛИВА

**Постановка проблеми.** В сучасному інженерному виробництві, особливо у галузі енергетики, велика увага приділяється питанням підвищення ефективності процесів згоряння палива. Для уникнення "зриву" полум'я необхідно забезпечити умови для його стабілізації, тобто постійне займання горючої суміші у фіксованих ділянках топкового простору. Що впливає на ефективність спалювання палива, зниження емісії шкідливих речовин та забезпечення безпечної роботи устаткування [1, 3].

**Аналіз останніх досліджень,** присвячених горінню в потоці, дозволяє виділити кілька способів стабілізації фронту полум'я.

Перший спосіб полягає у стабілізації за допомогою підведення енергії від зовнішнього джерела постійної дії, такого як черговий факел або форсажна камера. Другий спосіб досягається за рахунок підведення енергії з зони горіння, що утворюється під час закручення потоку за системою погано обтічних тіл різної геометричної форми або гідродинамічної взаємодії течій.

У першому випадку енергія подається ззовні, в другому – використовуються внутрішні джерела енергії, що виникають у зоні горіння. Обидва способи спрямовані на стабілізацію фронту полум'я та забезпечення безперервного горіння горючої суміші.

Ефективним методом стабілізації полум'я є використання перпендикулярної системи струменів разом з нішевою порожниною. Цей підхід має декілька переваг в порівнянні зі стабілізацією погано обтічними тілами. По-перше, він дозволяє плавно регулювати фізичні розміри так званого «струменевого екрану». По-друге – автоматизованість процесів сумішоутворення в ЗЗС, що виникає в затіненій зоні екрану і зони циркуляції в ніші на пускових режимах [1, 2].

**Метою роботи** є ознайомлення з особливостями процесу стабілізації полум'я в струменево-нішевій системі спалювання (СНС).

**Основна частина.** Основним місцем горіння при запуску є зона циркуляції в ніші, а при горінні - загальна вихорова структура, яка охоплює нішу та область в підструменевому просторі. Розрахункова схема наведена на рисунку 1.

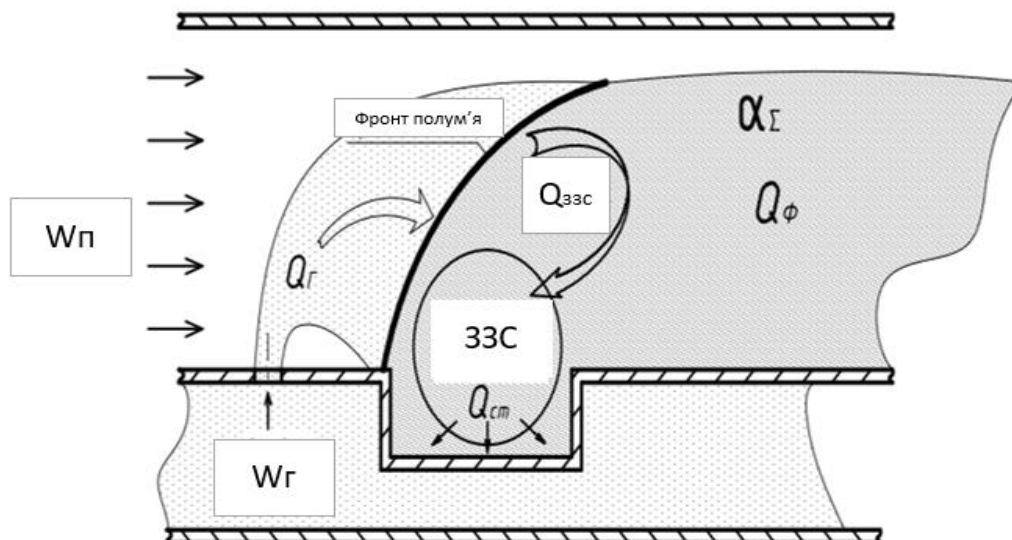
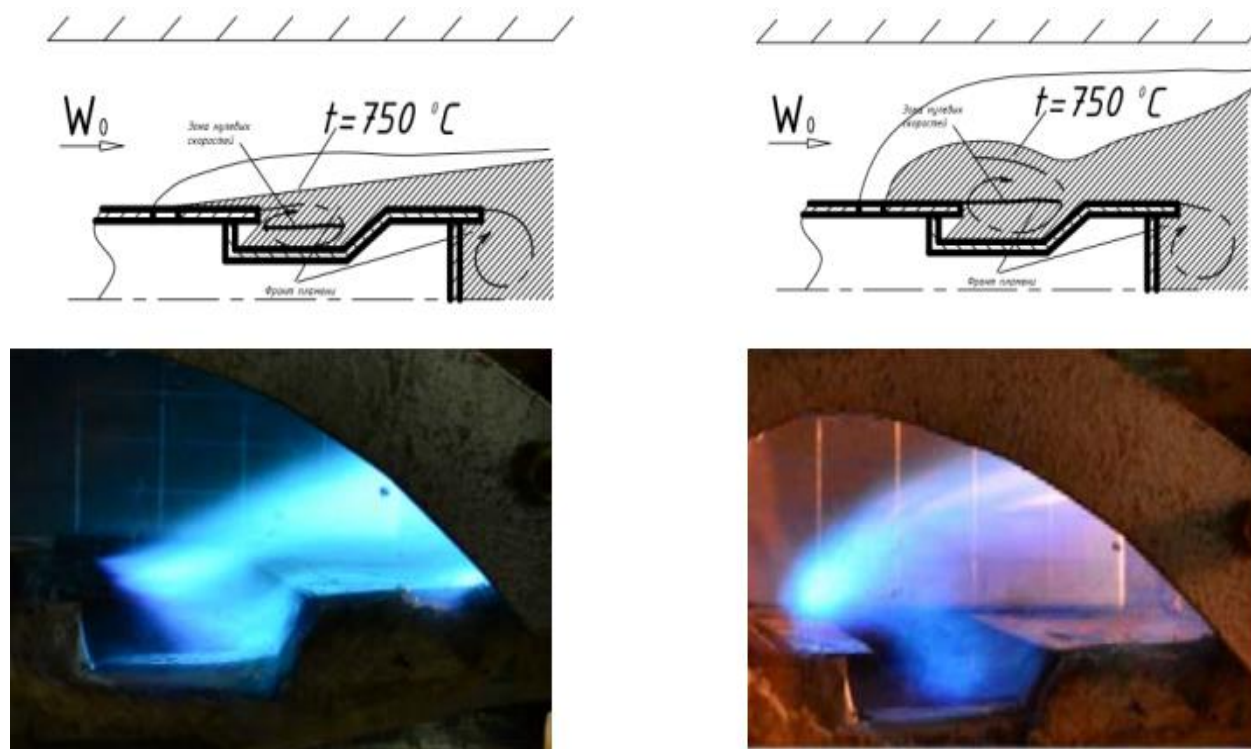


Рисунок 1 – Теплова схема процесу стабілізації полум'я в СНС, де:  $Q_{ззс}$  – тепло, що виділяється в ЗЗС (ЗЗС – зона зворотних струменів);  $Q_{ф}$  – тепло факела;  $Q_{ст}$  – тепло що йде на підігрів стінок;  $Q_{г}$  – тепло від газу

Під час дослідження стійкості горіння в СНС спостерігалися два види початкової зони факела. Перший – це локалізація полум'я в нішевій порожнині, а потім розповсюдження факела вздовж потоку (рис. 2а). Поступово, при збільшенні швидкості вихідного газу, виникає другий режим – "стабілізація полум'я на струменях" (рис. 2б). Цей режим характеризується переміщенням факела до газоподавальних отворів, пульсаціями полум'я та збільшенням шуму. "Стабілізація на струменях" може відбуватися і при зниженні швидкості вихідного окислювача. Це визначається значенням гідродинамічного параметра. При певній швидкості палива полум'я стабілізується за системою струменів, виходячи за межі нішевої порожнини.



а) б)  
Рисунок 2 – Фізична модель робочого процесу в СНС

Основним фактором є величина далекобійності паливних струменів  $h_c$ , при якій починається перебудова циркуляційної структури течії. Горіння локалізується не лише в ніші, але й за системою струменів, що виконує функцію гідродинамічного стабілізатора полум'я. Перебудова пов'язана з трансформацією стійкого циркуляційного руху в ніші в складну вихрову структуру, що охоплює не лише нішу, але й увесь підструменевий простір.

Збільшення діаметра газоподаючих отворів в СНС призводить до зміщення зони стабілізації полум'я в бік багатого зриву. Це пояснюється впливом ступеня подрібнення струменів, особливо при подачі палива через отвори діаметром більше 3,0 мм. Експерименти показали, що збільшення відстані газоподавального колектору від зривної кромки ніші більше 60 мм дозволяє ефективно гомогенізувати горючу суміш до входу у нішеву порожнину. Зміни в геометрії СНС впливають на процес горіння: наприклад, діаметри струменів більше 3,0 мм значно зміщують зону стабілізації полум'я в бік багатого зриву. Довжина ніші також важлива: ніша довжиною 23 мм має ширший діапазон роботи до стабілізації полум'я на струменях, ніж коротші ніші. Оцінка впливу глибини ніші показала меншу чутливість системи до цього параметру. Згідно з рекомендаціями, отриманими під час вивчення стабілізаційних властивостей СНС, варто використовувати нішеву порожнину з параметрами  $L/H=4-6$  і обирати ці значення з точки зору ефективної адаптації СНС до геометрії пальникового пристрою, де, очевидно, довжина і глибина ніші буде знаходитися у межах 20–25 мм та 4–7 мм відповідно [2, 4].

**Висновок.** З дослідження сталості горіння у струменево-нішевій системі випливає, що існують два основних режими початкової зони факела: локалізація полум'я в нішевій порожнині та "стабілізація полум'я на струменях". Перехід від одного режиму до іншого залежить від швидкості вихідного газу та гідродинамічного параметра. Збільшення діаметра газоподавальних отворів може призвести до зміщення зони стабілізації полум'я, важливою є також глибина та довжина нішевої порожнини. Раціональна геометрія СНС сприяє ефективнішому горінню та стабілізації полум'я.

#### **Перелік посилань:**

1. Абдулін М. З., Сірий О.А. Дослідження сталості процесу горіння у струменево-нішевій системі спалювання палива. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2018. – Том 29 (68), № 1(2). – С. 55-60.
2. Абдулін М.З., Принципи організації робочого процесу камер згоряння / М.З. Абдулін, О.А. Сірий // Авіаційно-космічна техніка та технологія, 2014.– № 35. – С. 22–25.
3. Абдулін М. З., Фіалко Н. М., Шеренковський Ю. В., Меранова Н. О., Бутовський Л.С., Юрчук В. Л., Іваненко Г. В., Кліщ А. В., Тимошенко О.Б. Структура течії у системі турбулізатор – нішова порожнина. Науковий вісник НЛТУ України, 2017. – Т.27, № 3. С. 131–135.
4. Сірий О.А. Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес пальникових пристроїв. дис. канд. техн. наук: 05.14.14 / НТУУ „КПІ”. Київ, 2016. – 199 с.

<sup>1</sup> Магістрант 2 курсу Мітрошин А.В.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Рачинський А.Ю.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=QSIPFOMAAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ ПЛАСТИНЧАСТОГО ТЕПЛООБМІННОГО АПАРАТУ

### Постановка проблеми та її актуальність.

Пластинчасті теплообмінні апарати широко використовуються в промисловості для перенесення теплоти між теплоносіями. Їхнє ефективне функціонування залежить від різних факторів, зокрема від міцності їхніх структурних елементів. Відомо, що внутрішні та зовнішні фактори можуть впливати на міцність пластинчастих теплообмінників. В відомій літературі майже не проводяться теплогідравлічні та міцності характеристики пластинчастих теплообмінних апаратів. У зв'язку з цим, для забезпечення надійної роботи таких апаратів важливо проводити дослідження міцнісних характеристик цих апаратів з використанням сучасних методів моделювання.

**Аналіз останніх досліджень.** Результати проведених з цієї теми досліджень [1] показують, що CFD-моделювання дозволяє проводити детальний аналіз різних аспектів роботи пластинчастого теплообмінника, надає базу для розрахунків пластинчастих теплообмінників з більш складними профілями міжпластинчастих каналів, надає можливість швидко проводити інженерні розрахунки та вносити необхідні зміни до документації та в цілому спрощує та прискорює весь процес розробки та виготовлення нових конструкцій пластинчастих теплообмінників.

**Формулювання мети.** Визначити міцності характеристики конструкції пластинчастого теплообмінного апарату за допомогою CFD-моделювання з використанням програмного інструменту ANSYS-Fluent студентської версії, котра із 2015 року є безкоштовною.

**Основна частина.** Розроблена тривимірна модель, котра була верифікована та використовується для аналізу теплових, гідравлічних та міцнісних характеристик у пластинчастому теплообмінному апараті. Цей підхід дозволяє досліджувати ефективність теплообміну та враховувати особливості гідравлічного опору потоків всередині апарату. Використання адаптивної сітки у моделюванні сприяє точнішому відтворенню фізичних процесів усередині пристрою. Розв'язання базується на чисельних методах, що включають у себе усереднені рівняння Нав'є-Стокса та спеціальні турбулентні моделі для більш точного опису турбулентних потоків.

Створено розрахункові сітки всередині міжпластинчастого каналу. Варто зауважити, що вздовж усього периметру об'єму, що моделює поточне середовище, розташована область Boundary Layer, яка включає в себе 20 осередків у формі паралелепіпеда. Окрім цього, за межами зони Boundary Layer, простір розрахункової області заповнений неструктурованою розрахунковою сіткою, кожен елемент якої має форму тетраедра. Цей підхід забезпечує точність та надійність при моделюванні складних теплообмінних процесів.

Поставлене завдання було успішно вирішено у стаціонарній постановці, забезпечивши незалежність рішення від щільності розрахункової сітки. На вході до теплообмінного апарату були встановлені параметри витрат і температур для середовищ, що брали участь у процесі теплообміну. На виході з апарату забезпечувалася сталість витрат середовищ та температурних градієнтів через нього. Всі ці процеси моделювалися з

використанням програмного забезпечення ANSYS-Fluent, що дозволило досягти точних та надійних результатів.

Для оцінки міцності теплообмінника потрібно вивчити розподіл інтенсивності напруг  $\sigma_i$  та деформацій  $\varepsilon_i$ . Згідно з отриманими результатами досліджень представлених на рис. 1, можна зазначити, що найбільші значення напруг та деформацій спостерігаються в корпусі теплообмінника, який виготовлений зі сталі 3.

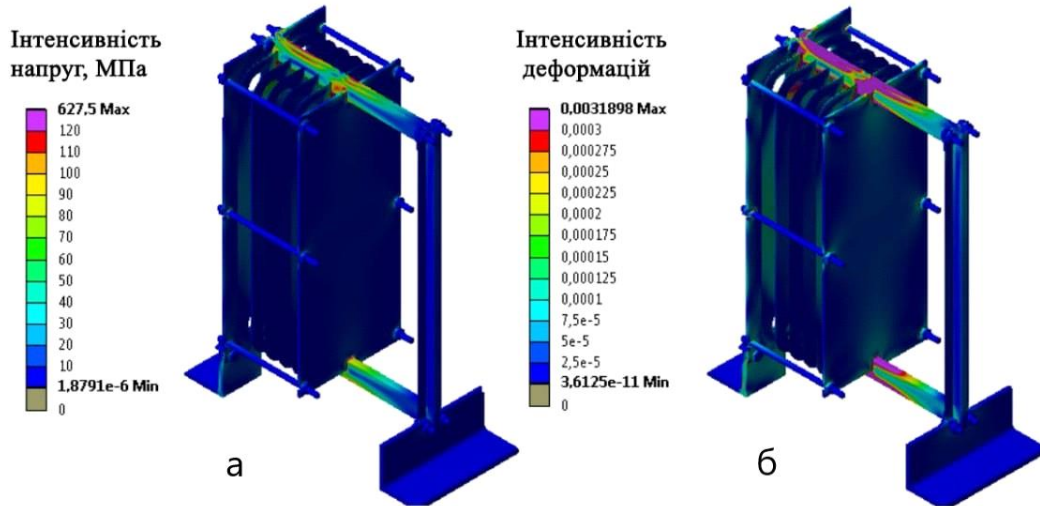


Рисунок 1 – Розподіл інтенсивності напруг (а) та інтенсивності деформацій (б) у теплообмінному апараті

Згідно з вимогами ГОСТ Р 52857.1-2007, при робочій температурі теплообмінника 150 °С, максимально допустима напруга для матеріалу сталі 3 складатиме  $[\sigma] = 145$  МПа.

Для оцінка міцності конструкції використано четверту енергетичну теорію міцності. Ця теорія, також відома як теорія найбільшої питомої потенційної енергії формозміни, вона передбачає, що кількість потенційної енергії формозміни, накопиченої на момент настання небезпечного стану (наприклад, текучості матеріалу), однакова як при складному напруженому стані, так і при простому розтягуванні. Для визначення наведених напружень при об'ємному напруженому стані, відповідно до Г.С. Писаренка[2], будуть визначатися визначаються як:

$$\sigma_{\text{ред}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_{\text{e}} \quad (1)$$

де  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – основні напруги.

Із результатів отриманих досліджень можна визначити, що  $\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{н}} = 120$  МПа <  $[\sigma] = 145$  МПа. Умова міцності за четвертою енергетичною теорією виконується.

**Висновки.** Сучасне використання передових систем автоматизації разом із автоматизованими системами проектування відкриває нові інженерні перспективи у сфері розробки та створення нових пластинчастих теплообмінників, сприяючи швидкому, точному та креативному процесу створення інноваційних рішень.

#### Перелік посилань:

1. Баранюк, О.В., Рачинський А.Ю. (2019). CFD-моделювання характеристик міцності пластинчастого теплообмінного апарату з прямою схемою руху теплоносіїв. *Сучасні проблеми моделювання*, (15), 28–35. <https://doi.org/10.33842/2313-125X/2019/15/28/35>
2. Pisarenko, G.S. The Department of the Strength of Materials of Kiev Polytechnic Institute. *Strength Mater* 6, 1974. – 398 h.
3. Naseem Ahmad Khan and Wasi ur Rahman. Modeling and Simulation of Plate Heat Exchanger // *International Journal of Mechanical Engineering* ISSN: 2277-7059 Volume 2 Issue 1. P. 22–30.



<sup>1</sup> Бакалаврант 2 курсу Ракута І.О.

<sup>1</sup> Асист., д.ф.-м.н. Власенко О.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=-Ih8IfYAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ В ЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Сталий розвиток біоенергетики дає можливість зменшити залежність України від дорогих імпортованих енергоносіїв і забезпечити ефективне використання місцевого ресурсного потенціалу. Перехід на використання біомаси для енергетичних потреб сприятиме розвитку місцевої економіки завдяки надходженню податків і зборів, а на державному рівні приведе до поліпшення торговельно-платіжного балансу країни через зменшення обсягів імпорту енергоносіїв. Очікується також позитивний соціальний вплив, пов'язаний зі створенням нових робочих місць, зниженням тарифів на теплову енергію та підвищенням надійності теплопостачання. Біоенергетика відіграє важливу роль у скороченні викидів парникових газів, що особливо актуально у зв'язку з проблемою глобального потепління та зміни клімату [1].

**Аналіз останніх досліджень.** За даними дослідження Біоенергетичної асоціації України близько двох третин біогазу, виробленого в усьому світі, використовувалося для виробництва електроенергії та тепла, третина — у житловому секторі. Невеликий відсоток біогазу очищували до біометану, закачували в газову мережу або використовували як паливо. Біогаз можна використовувати для заміни викопного палива в енергетиці, транспорті та житловому секторі. Біогаз і біометан мають численні переваги, зокрема зниження енергетичної залежності Європи. Ці гази здійснюють важливий внесок у виробництво електроенергії базового навантаження [2].

**Формулювання мети.** Метою роботи є аналіз перспективи виробництва і використання біогазу, як однієї зі складових відновлюваної енергії, та визначення перспективних шляхів застосування біометану в енергетиці України.

**Основна частина.** Біогаз – газ, отриманий з біомаси, що використовується як паливо. Виробництво енергії з біогазу не шкідливе для оточуючого середовища, оскільки не спричиняє додаткову емісію парникового газу CO<sub>2</sub> і зменшує кількість органічних відходів. На відміну від енергії вітру і сонячного випромінювання, біогаз можна отримувати незалежно від кліматичних і погодних умов, а на відміну від викопних джерел енергії біогаз в Україні має дуже великий відновлюваний потенціал. Річний теоретичний потенціал біогазу в Україні становить 3,2 млрд м<sup>3</sup> [3].

Основою біомаси є органічні сполуки вуглецю, які під час спалювання при з'єднанні з киснем виділяють тепло. Початкова енергія системи «біомаса—кисень» виникає під дією сонячного випромінювання в процесі фотосинтезу, що є природним способом перетворення сонячної енергії. За допомогою хімічних або біохімічних процесів біомасу можна трансформувати в інші види палива або в кінцеву енергію. Під час спалювання біомаси або її похідних продуктів органічний вуглець, що міститься в ній, та кисень з атмосфери вступають у реакцію з утворенням двоокису вуглецю та води. Процес є циклічним, оскільки двоокис вуглецю, який виділився при спалюванні, може брати участь у виробництві нової біомаси [1].

Отже, біологічні види палива (біопаливо) – тверде, рідке та газове паливо, виготовлене з біологічно відновлювальної сировини (біомаси), яке може використовуватися як паливо або компонент інших видів палива [1].

В свою чергу, біометан — це газоподібне паливо, отримане з біогазу, концентрація

метану в якому становить 95–98%. Збагачений біометан не відрізняється від природного газу, тому його можна транспортувати та використовувати із мінімальною модернізацією інфраструктури. Біометан має переваги природного газу, залишаючись при цьому вуглецево нейтральним [4].

Ефективним шляхом доповнення та заміни традиційних паливно-енергетичних ресурсів є виробництво та використання біогазу, який утворюється в результаті застосування технологій метанового зброджування тваринницької біомаси і на 60–70% складається з метану. Іншим джерелом біогазу є звалища сміття на полігонах твердих побутових відходів. Крім цього, джерелом біогазу є стічні води. Утилізація відстоїв міських і промислових стічних вод забезпечує вирішення важливих екологічних, енергетичних і соціальних проблем міст, особливо мегаполісів. Відстої міських і промислових стічних вод мають у своєму складі велику кількість органічних речовин [3].

Загальний потенціал виробництва біогазу з відходів сільського господарства, харчової промисловості, ТПВ, стічних вод комунального господарства та промислових підприємств України при сучасному рівні виробництва та споживання оцінюється в 3,2 млрд м<sup>3</sup> СН<sub>4</sub> на рік. Ще 3,3 млрд м<sup>3</sup> СН<sub>4</sub> можна отримати при вирощуванні енергетичної кукурудзи (або інших енергетичних культур) на площах 1 млн га (3% від загальної площі орних земель України)[5]. Також експерти Біоенергетичної асоціації України оцінюють потенціал біогазу з соломи зернових культур у 3,8 млрд м<sup>3</sup>, з силосу кукурудзи — 2,7 млрд м<sup>3</sup>, з інших відходів тваринництва та переробної промисловості — 1,3 млрд м<sup>3</sup>. Більшість біогазових заводів в Україні зараз використовують як сировину відходи тваринництва або жом цукрових буряків. Потенціал поживних рештків і силосу кукурудзи наразі залишається невикористаним [4].

Біогаз за своїм складом є тотожним природному газу, однак може поступатися або перевищувати його за теплотворністю – залежно від способу виробництва та наступної очистки. Принципова відмінність – у способі отримання, адже природний газ добувають із надр, а біогаз – з біологічних відходів або спеціально вирощеної сировини. Таким чином біогаз є відновлюваним джерелом енергії. За підрахунками фахівців світових запасів природного газу при нинішніх темпах споживання вистачить ще на 50 років. Тому біогаз може бути рівноцінною альтернативою. Особливо якщо очистити його до стану біометану, з концентрацією метану 95-98% [6].

За даними Держенергоефективності, сьогодні в Україні діє 49 установок, що виробляють енергію з біогазу та працюють за “зеленим” тарифом. Загальна встановлена потужність таких установок – 86 МВт, що майже у 5 разів більше, ніж наприкінці 2015 року (18 МВт). З них 59 МВт (21 установка) працюють на відходах сільського господарства, 27 МВт (28 установок) – на твердих побутових відходах [4].

Протягом 2020 року було введено 12 МВт біогазових потужностей (12 установок), протягом 2021 року – 40 МВт (16 установок). При цьому, за даними НКРЕКП, упродовж 2021 року біогазовими установками вироблено 247 млн кВт-год електроенергії. Таким чином, темпи зростання біогазових потужностей в Україні в 2022 році майже в 3,5 рази перевищили показники 2020 року. Загальна кількість інвестицій у цей сектор протягом 2012–2019 років – 140 млн євро [7].

Головною метою біогазової промисловості є скорочення споживання викопного палива з кінцевою метою пом'якшення глобального потепління. Виробництво біогазу підвищує енергетичну безпеку країни завдяки вирішенню трьох завдань. По-перше, зниження питомої витрати палива на одиницю одержуваного енергоресурсу. По-друге, забезпечення резервування електроенергії та підвищення надійності енергопостачання. По-третє, зниження емісії парникових газів в атмосферу (метану, двоокису вуглецю), що запобігає глобальному потеплінню, зменшує забруднення стічних вод та знижує епідеміологічну небезпеку від зберігання відходів [8].

Виробництво біогазу та біометану сприяє вирішенню двох глобальних проблем сучасного життя: зростання кількості органічних відходів, що виробляються сучасними

суспільствами та економіками, та негативного впливу викидів парникових газів на клімат. Найбільш масштабні біогазові проєкти, що будуються в Україні, – потужністю 10–20 МВт, коштують 2–2,5 тис. євро/кВт. Основними складовими інвестиційних вкладень в біогазові проєкти, що орієнтовані на комбіноване виробництво теплової та електричної енергії є витрати на блок генерації енергії (30–40%), будівництво реакторів та інших технологічних споруд (35–45%), а також технологічне обладнання (15–25%). Окупність біогазових проєктів в Україні може становити до 4 років, навіть за реалізації лише електричної енергії за «зеленим» тарифом. Втім, потенціал будівництва таких масштабних проєктів є обмеженим, а ефективність роботи діючих в Україні біогазових проєктів часто не перевищує 50–60% (за КВВП). Окупність більшості біогазових проєктів в Україні, у кращому випадку, оцінюється на рівні 5–6 років, а з урахуванням рівня ефективності – не менше 7–8 років.

Виробництво біометану з біогазу пов'язано з додатковими витратами на розділення метану і вуглекислого газу. Тому одиниця енергії в біометані коштує дорожче, ніж у біогазі. Біогаз, як правило, використовують лише для виробництва електроенергії, а в окремих випадках частково й для виробництва тепла. Водночас для біометану відкриваються нові можливості, які передбачають:

1. Виробництво електроенергії і тепла з біометану з використанням газотранспортної мережі.
2. Зберігання біометану в мережі природного газу для виробництва електроенергії на балансуєчому ринку.
3. Використання біометану як моторного палива для комунального транспорту та в сільському господарстві.
4. Заміна природного газу біометаном.
5. Експорт біометану в ЄС з використанням Національного реєстру виробництва і споживання біометану.

Наразі виробництво біометану в Україні не є конкурентоспроможним з ринковою ціною на природний газ та потребує підтримки [8].

**Висновки.** Оцінюючи сучасний стан, Україна може конкурувати з будь-якою країною у виробництві біогазу та біометану, може запропонувати найдешевшу сировину, так як має найбільшу в Європі площу с/г угідь і, відповідно, один із найкращих у світі потенціалів сировини для їх виробництва. Інвестиції в біогазові та біометанові установки з виробництвом електроенергії майже ідентичні. Як зазначає Держенергоефективності, прийнятий законопроект також дозволить скоротити імпорт природного газу та сприяти розвитку внутрішнього енергетичного ринку.

#### **Перелік посилань:**

1. Г. Г. Гелетуша. Виробництво енергії з біомаси в Україні. Київ. АКАДЕМПЕРІОДИКА 2022. 7с, 9с, 11 с.
2. Біоенергетична асоціація України, URL: <https://uabio.org/materials/analytics/13064/>
3. Сайт державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <https://saee.gov.ua/uk/ae/bioenergy>.
4. Спецпроект «GREEN DEAL UA». URL: <https://www.epravda.com.ua/projects/greendeal/2021/09/15/677735/>
5. Г. Г. Гелетуша, П. П. Кучерук, Ю. Б. Матвеев, Аналітична записка БАУ № 11 Перспективи виробництва та використання біометану в Україні. 22 с.
6. ЕКОполітика. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/dekarbonizaciya-ta-zamishhennyu-prirodnogo-gazu-yak-biometan-mozhe-zminiti-ukrainu/>
7. Сайт національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. URL: <https://www.nerc.gov.ua/derzhavnij-kontrol/formivzvitnosti-nkrekp>
8. Біоенергетична асоціація України. URL: <https://uabio.org/biogas-and-biomethane/>

<sup>1</sup> Бакалаврант 2 курсу Ракута І.О.

<sup>1</sup> Асист., д.ф.-м.н. Власенко О.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=-Ih8IfYAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВИДИ ВІДХОДІВ ДЛЯ БІОМАСИ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Ситуація з реальним споживанням біомаси для виробництва енергії та біопалив в Україні фактично є протилежною структурі потенціалу. Потужному розвитку енергетичного використання побічних продуктів та відходів в Україні перешкоджає низка бар'єрів. Серед них найбільш істотними є відсутність у агровиробників техніки для заготівлі відповідних видів біомаси, складність організації ланцюжка «заготівля—поставка», загальна нерозвиненість ринку біопалива (відсутність біопаливної біржі) та деякі інші [1].

**Аналіз останніх досліджень.** Аналіз структури споживання біомаси для енергетичних потреб свідчить про необхідність більш широкого використання біомаси аграрного походження та енергетичних культур. Паралельно з цим слід залучати до цього процесу деревну біомасу з так званих додаткових джерел, зокрема відходи від обрізування та викорчовування багаторічних сільськогосподарських насаджень, а також біомасу від реконструкції й відновлення полезахисних та інших захисних лісосмуг [1].

**Формулювання мети.** Метою роботи є висвітлення теоретичних даних стосовно відходів біомаси, перспективи їх енергетичного потенціалу та підходів, які дозволять в майбутньому більш ефективно та результативно створювати та втілювати в життя проекти, які сьогодні вже повною мірою використовуються в країнах Європи.

**Основна частина.** Біомаса є одним із найбільш перспективних відновлюваних джерел енергії, проте її використання в Україні обмежене, незважаючи на позитивну тенденцію протягом останніх років. Основою біомаси є органічні сполуки вуглецю, які під час спалювання у процесі з'єднання з киснем виділяють тепло. Початкова енергія системи "біомаса-кисень" виникає під дією сонячного випромінювання в процесі фотосинтезу, що є природним варіантом перетворення сонячної енергії. За допомогою хімічних або біохімічних процесів біомаса може бути трансформована в інші види палива або в кінцеву енергію. Під час спалювання біомаси або її похідних продуктів органічний вуглець, що міститься в ній, та кисень з атмосфери вступають у реакцію з утворенням двоокису вуглецю та води. Процес є циклічним, тому що двоокис вуглецю, який виділився при спалюванні, може брати участь у виробництві нової біомаси. Таким чином, біомаса є відновлюваним джерелом енергії [1].

Однією з головних переваг енергетичного використання біомаси є її мультиваріантність як за технологіями перетворення енергії, так і за способами її кінцевого використання. Біомасу можна використовувати в енергетичних цілях шляхом безпосереднього спалювання (деревина, солома), а також у переробленому вигляді рідких (ефіри ріпакової олії, спирти, рідкі продукти піролізу) або газоподібних біопалив (біогаз із відходів сільського господарства та рослинництва, осадів стічних вод, органічної частини твердих побутових відходів, продукти газифікації твердих палив). Конверсія (перетворення) біомаси в інші види енергоносіїв або кінцеву теплову чи електричну енергію може відбуватись фізичними, хімічними і біохімічними методами [1].

Слід зазначити, що ряд технологій перетворення енергії біомаси є комерційними та широко апробованими. Це, наприклад, перестерифікація олійних сільськогосподарських культур (виробництво біодизелю), ферментація цукро- та крохмаловмісних культур

(виробництво біоетанолу), піроліз лігноцелюлозної біомаси, метанове бродіння (виробництво біогазу). Ряд інших технологій, як, наприклад, виробництво біоетанолу 2-го покоління з сільськогосподарської лігноцелюлозної сировини чи виробництво біодизелю з мікроводоростей, знаходяться на різних етапах розвитку і можуть зайняти свою нішу в майбутньому [1].

Походження біомаси може бути досить різноманітним, починаючи з відходів та залишків сільського господарства, харчової промисловості, домашнього господарства і закінчуючи відходами комунального господарства. Джерелом біомаси є також відходи деревини в лісовому господарстві, деревообробній та целюлозно-паперовій промисловості. Для виробництва біомаси використовуються також спеціальні енергетичні культури, що дають швидкий приріст маси (верба, тополя, платан), або певних сортів трав'янистих рослин (міскантус, просо, сорго та ін.). До енергетичних культур також можна віднести ріпак, соняшник для виробництва рідких моторних палив. З метою енергетичного використання може вирощуватись і кукурудза та сорго як для виробництва твердого біопалива так і біогазу. Важливим джерелом біомаси є відходи тваринництва (гноївка, гній, інші відходи), а також відходи комунального господарства (стічні осади, відходи домашнього господарства, органічна фракція твердих побутових відходів, тощо), що можуть бути використанні для виробництва твердого біопалива та біогазу [2].

Таблиця 1 – Потенціал енергії з біомаси

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн. тонн	Потенціал доступний для енергетики	
		Частка теоретичного потенціалу, %	лн т н.е.
Солома зернових культур	32,8	30	3,36
Солома ріпаку	4,9	40	0,68
Відходи виробництва кукурудзи на зерно (стебла, стрижні)	46,5	40	3,56
Відходи виробництва соняшнику (стебла, корзинки)	26,9	40	1,54
Вторинні відходи с/г (лушпиння соняшника)	2,4	100	1,00
Деревна біомаса (дрова, порубкові залишки, відходи деревообробки)	8,8	96	2,06
Деревна біомаса (сухостій, деревина із захисних лісосмуг)	8,8	45	1,02
Біодизель (з ріпаку)	-	-	0,39
Біоетанол (з кукурудзи та цукрових буряків)	-	-	0,82
Біогаз з агровідходів	1,6 млрд м <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	50	0,68
Біогаз з полігонів твердих побутових відходів	0,6 млрд м <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	34	0,18
Біогаз із стічних вод (промислових та комунальних)	1,0 млрд м <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	23	0,19
Енергетичні культури: верба, тополя, міскантус (1 млн га*)	11,5	100	4,88
Енергетичні культури: кукурудза на біогаз (1 млн га*)	3,0 млрд м <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	100	2,58
<b>ВСЬОГО</b>			<b>23</b>

\*За умови вирощування на 1 млн га незадіяних сільськогосподарських земель

За оцінкою Біоенергетичної асоціації України, станом на 2018 р. потенціал енергії з біомаси складає 23 млн т н.е.

Основними складовими цього потенціалу є побічні продукти рослинництва (загалом 10 млн т н.е. або 44% від загального потенціалу біомаси) та енергетичні культури (загалом 7,5 млн т н.е. або 32% від загального потенціалу).

Згідно з прогнозами UABIO у період 2020-2050 років в Україні використання деревної біомаси залишатиметься на такому ж рівні, проте зростатиме частка використання соломи, стебел, лушпиння соняшника, сільськогосподарських залишків, енергокультур, рідких біопалив, твердих побутових відходів для виробництва енергії. Такий прогноз ґрунтується на розрахунках, які показують, що потенціал деревної біомаси та лушпиння соняшника в Україні у 2020 році вже використано на понад 90% [3].

**Висновки.** Одна із головних цінностей біоенергетики полягає в тому, що вона позитивним чином впливає на екологічну ситуацію, так як за допомогою використання біосировини, відбувається утилізація органічних відходів, зменшується забруднення навколишнього середовища, а також отримання альтернативної енергії.

**Перелік посилань:**

1. Г. Гелету́ха, С. Драгнєв, Пю Кучерук, Ю. Матвєєв. Практичний посібник з використання біомаси в якості палива у муніципальному секторі України. 27с., 8 – 9 с., 14-15 с. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2018/01/biofin.pdf>

2. Є. Олійник, В. Антоненко, С. Чаплигін, В. Зубенко. Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні.– 6 с. URL: <https://rea.org.ua/wp-content/uploads/2020/08/posibnyk-onovlenyi-2016.pdf>

3. Біоенергетична асоціація України, URL: <https://uabio.org/bioenergy-transition-in-ukraine/>

<sup>1</sup> Магістрант 2 курсу Рудик М.А.; <sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Доросевич В.С.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Бутовський Л.С.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=AaТВрх0AAAAJ&hl=en>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## СТЕНДОВІ ВИПРОБУВАННЯ ДВОЗОННОЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Одним з найбільш ефективних шляхів підвищення економічності парогазових і газотурбінних установок є зростання тиску та температури газів перед турбіною. Так, за розрахунками, збільшення температури до 1300–1500 °С дає можливість підвищити коефіцієнт корисної дії циклу до 45–50%. В той же час сучасні метали дозволяють збільшити температуру газів тільки у разі використання значної долі повітря на охолодження елементів установки. Це призводить до втрати робочого тіла і, практично зводить нанівець вигаи у економічності. Відомо також, що при підвищенні температури газів збільшується концентрація токсичних оксидів азоту в продуктах згоряння.

**Аналіз останніх досліджень.** Використання мікродифузійних камер згоряння у вигляді системи стабілізаторів, що оббігають повітряним потоком, є одним з найбільш перспективних методів «сухого» подавлення оксидів азоту. Фронтний пристрій камери працює при збільшеному коефіцієнті надлишку повітря і зменшеній температурі газів у факелі, що дозволяє знизити викиди оксидів азоту. Підвищення температури газів без подачі повітря на охолодження високотемпературних елементів камери згоряння можливе тільки при їх виготовленні з керамічних і композитних матеріалів. Використання різнойменної закрутки повітряного потоку, що оббігає стабілізатор, дозволяє зменшити довжину вогневого простору камери [1].

**Формулювання мети.** Проведення стендових випробувань з визначення характеристик двозонної модельної високотемпературної камери згоряння з керамічною жаровою трубою із карбиду кремнію і мікрофакельним спалюванням газу при різнойменній закрутці повітряного потоку, що оббігає стабілізатор.

**Основна частина.** Камера згоряння була розроблена і виготовлена на кафедрі теплової та альтернативної енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського. Для зменшення викидів оксидів азоту була використана двозонна організація робочого процесу – мікрофакельне дифузійне горінні частини витрати палива в одній зоні та спалювання «бідної» гомогенної горючої суміші в другій зоні.

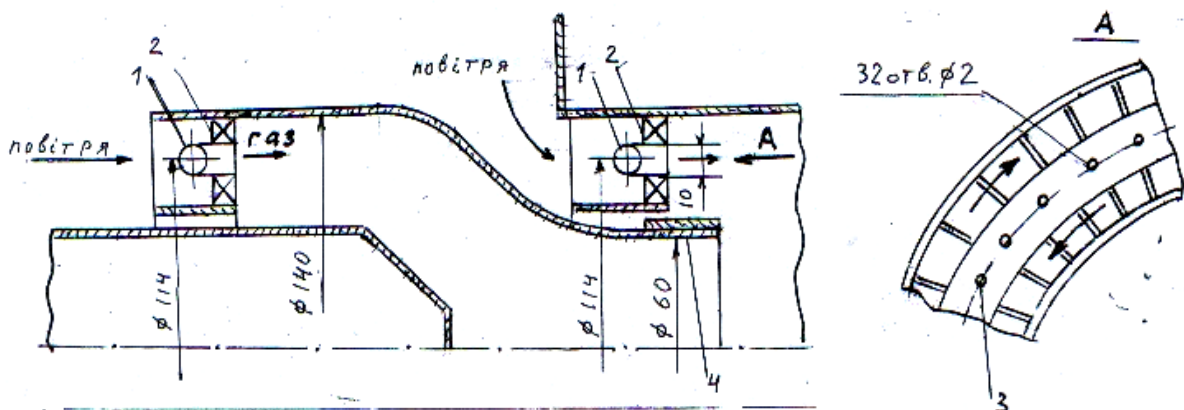


Рисунок 1 – Схема двозонного фронтного пристрою камери згоряння  
1 – колектор-стабілізатор; 2 – реєстр; 3 – газоподаючі отвори; 4 – центральне сопло

Загальний фронтний пристрій складається, фактично, з двох послідовно розміщених і паралельно працюючих фронтних пристроїв першої (1) та другої (2) зон. Фронтні пристрої мають ідентичну конструкцію і кожен складається із кільцевого стабілізатора шириною 10 мм, який є одночасно газовим колектором, та лопаток двох реєстрів висотою по 8 мм з обох боків стабілізатора. Лопатки реєстрів повертають повітряний потік у різні боки під кутом 60°. Газ подається в рециркуляційну зону за стабілізаторами через систему отворів діаметром 2,0 мм. При роботі на розрахунковому режимі фронтний пристрій першої зони служить для отримання паливо-повітряної суміші та подачі її через сопло (3) діаметром 50,0 мм в центральну частину камери. Фронтний пристрій другої зони служить для роботи при часткових навантаженнях та запалювання суміші першої зони, яка виходить із сопла. Характеристики повноти згоряння показані на рис. 2. При горінні газу для одночасного горіння в обох зонах залежність повноти згоряння від коефіцієнту надлишку повітря має звичайний вигляд для дифузійних камер згоряння (крива 1).

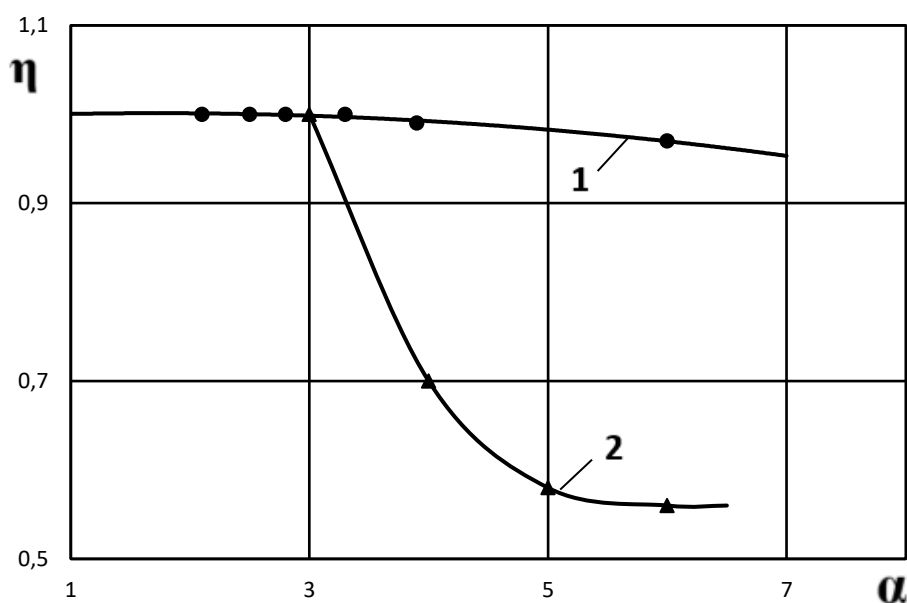


Рисунок 2 – Повнота згоряння палива при подачі газу в обидві зони:  
 $X=720$  мм;  $t_{\text{п}}=250$  °С;

- 1 – мікродифузійне горіння за стабілізаторами в обох зонах;
- 2 – дифузійне горіння в другій зоні і подача «бідної» суміші через сопло першої зони.

Результати випробувань показали, що при коефіцієнті надлишку повітря в камері  $\alpha \leq 3$  в камері відбувається повне вигорання палива (крива 2).

На рис. 3 приведені дані по комбінованій роботі з подачею паливо-повітряної суміші через сопло першої зони на одному з режимів роботи другої зони ( $\alpha^{\text{II}}=2,36$ ,  $t_{\text{п}}=250$  °С). Як видно, поступове підключення суміші з першої зони дає можливість підвищувати температуру газів баз зростання викидів оксидів азоту аж до температури  $t_{\text{п}}=1250$  °С. Рівень викидів оксидів азоту складає 11–12 мг/м<sup>3</sup>, що відповідає показникам кращих камер згоряння сучасних газотурбінних установок.



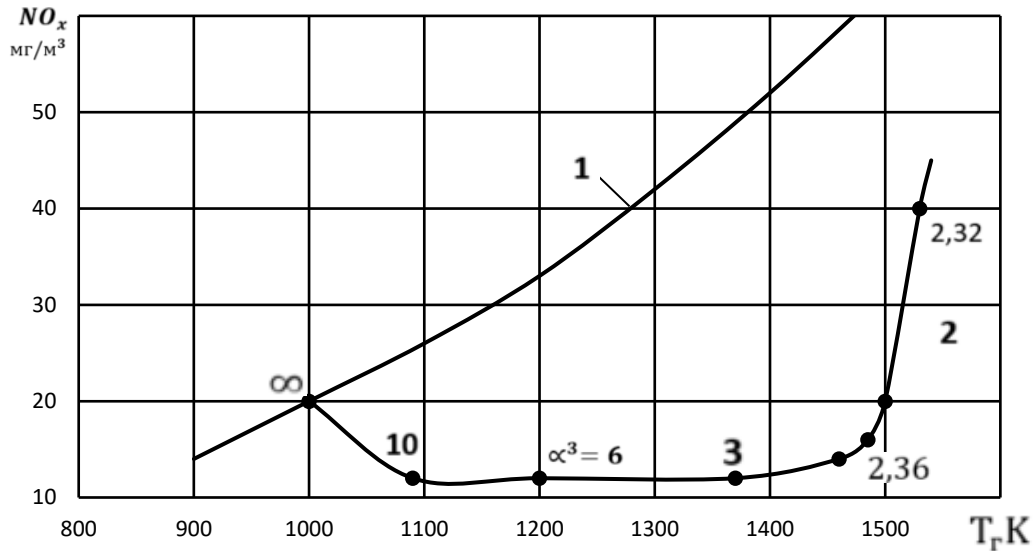


Рисунок 3 – Вихід оксидів азоту при комбінованій роботі:

$$\alpha^{\text{II}}=2,36, t_{\text{II}}=250 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

1 – мікродифузійне горіння в обох зонах;

2 – мікродифузійне горіння у другій зоні, подача «бідної» суміші з першої зони; цифри на графіку – коефіцієнт надлишку повітря у першій зоні.

**Висновки.** Випробування камери згорання показали високу ефективність робочого процесу, низькі викиди оксидів азоту при температурі газів до 1250 °С і надійну роботу жарової труби із карбіду кремнію.

**Перелік посилань:**

1. Черноусенко О.Ю., Бутовський Л.С., Грановська О.О., Мороз О.С., Старченко О.С. Вплив різнойменної закрутки повітряного потоку на межі сталої роботи стабілізаторного пальника при мікродифузійному спалюванні газу / *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Том 31 (70). № 4. 2020. С. 155-161. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-41/2020.4/22>.

<sup>1</sup> Аспірант 2 курсу Сторожук М.С.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Сірий О.А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=FmKF8DsAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОМІШКИ ВОДНЮ НА ГОРІННЯ СУМІШНИХ З ВОДНЕМ ПАЛИВ В СТРУМЕНЕВО-НІШЕВОМУ СТАБІЛІЗАТОРІ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Спалювання традиційних видів палива, таких як вугілля, нафта та природний газ, відіграє важливу роль у задоволенні енергетичних потреб сучасного суспільства. Однак, разом з цим, зазначені процеси супроводжуються викидами різноманітних шкідливих речовин у атмосферу, що має серйозні наслідки для навколишнього середовища та здоров'я людини. Сучасний стан шкідливих викидів від спалювання традиційних видів палива є предметом постійного дослідження та обговорення вченими, екологами та правозахисними організаціями.

Зростаюча кількість вуглекислого газу, оксидів азоту, сірководню та інших токсичних речовин у атмосфері призводить до зміни кліматичних умов, забруднення повітря та інших негативних наслідків. Це спонукає до пошуку нових, більш екологічно чистих та ефективних джерел енергії, а також до розробки технологій, спрямованих на зменшення шкідливих викидів від спалювання традиційних видів палива.

Метан, який збагачений воднем, вважається перспективним альтернативним паливом з метою зменшення викидів парникових газів. Паливо, яке містить домішку водню, також може мати комплексний вплив на викиди оксидів азоту. Сполучення водню з природним газом вважається одним з оптимальних методів підвищення ефективності технології з одночасним зниженням витрат на зберігання та транспортування водню.

**Аналіз останніх досліджень.** Для вивчення характеристик горіння метану, збагаченого воднем, було проведено ряд експериментальних досліджень. Зокрема, покращення сталості горіння збагаченого воднем палива у пальнику з вихровим стабілізатором [1]. Було виявлено, що додавання водню значно збільшує межу збідненого горіння полум'я. Проведено експериментальне дослідження спалювання збагаченого воднем природного газу в радіально-ступінчастому пальнику та проаналізовано вплив додавання водню на термоакустичну нестабільність [2]. Вплив збагачення воднем на висоту підйому факела, форму полум'я та термоакустичну динаміку досліджували у камерах згоряння зі збідненою сумішшю [3, 4, 5]. Крім того, були досліджені неоднорідні радіальні розподіли коефіцієнта еквівалентності палива, викликані зменшенням густини внаслідок збагачення воднем, у пальнику з вихровим стабілізатором [6], а також проаналізовані механізми стабілізації полум'я при спалюванні збагаченого воднем метану [7].

**Формулювання мети.** Масштабне постачання природного газу з водневою сумішшю вважається одним із найкращих способів покращити якість газу та скоротити викиди вуглецю. Важливою науково-практичною задачею є дослідження параметрів робочого процесу спалювання сумішних традиційних паливних газів (природного газу та пропан-бутану) з воднем в прямотокових пальникових пристроях мікродифузійного типу.

**Основна частина.** Однією з перспективних розробок КПІ, в галузі використання палив є струмінево-нішева технологія спалювання палива (СНТ). Ефективність робочого процесу пальників СНТ досягаються за рахунок вдалого конструктивного розміщення струмінево-нішевої системи (СНС) [8] на автономному колекторі-пілоні.

Важливим показником ефективності робочого процесу пальникових пристроїв є рівні температур факелу та продуктів згоряння. В лабораторних умовах виконано

дослідження впливу концентрації водню в об'ємі природного газу на рівні температур факелу виміряні на осі футерованої циліндричної ділянки. Для вимірювання використовувались термоелектричні перетворювачі типу ТПП та ТХА, вторинний прилад Регмик И8. Наведені результати стосуються горіння природного газу та пропан-бутану і їх сумішей з воднем в об'ємному співвідношенні 50/50.

Дослідження ефектів режимних параметрів на характеристики температур "закритого" стехіометричного факела показали їх визначальний вплив. При горінні природного газу або його суміші з воднем при стехіометричних умовах ( $\alpha=1,1$ ), розподіл температур майже однаковий. Однак при "збідненому" горінні ( $\alpha=1,5$ ) спостерігаються значні відмінності: температури в області початку факела підвищуються на 5%, а в "хвостовій" частині вони нижчі на 30–50°C. Перехід до збіднених паливних сумішей збільшує температури на осі факела, з різницею від 90 до 20°C від устя пальника до хвоста факела. На виході з футерованої ділянки температури для природного газу та його суміші практично однакові.

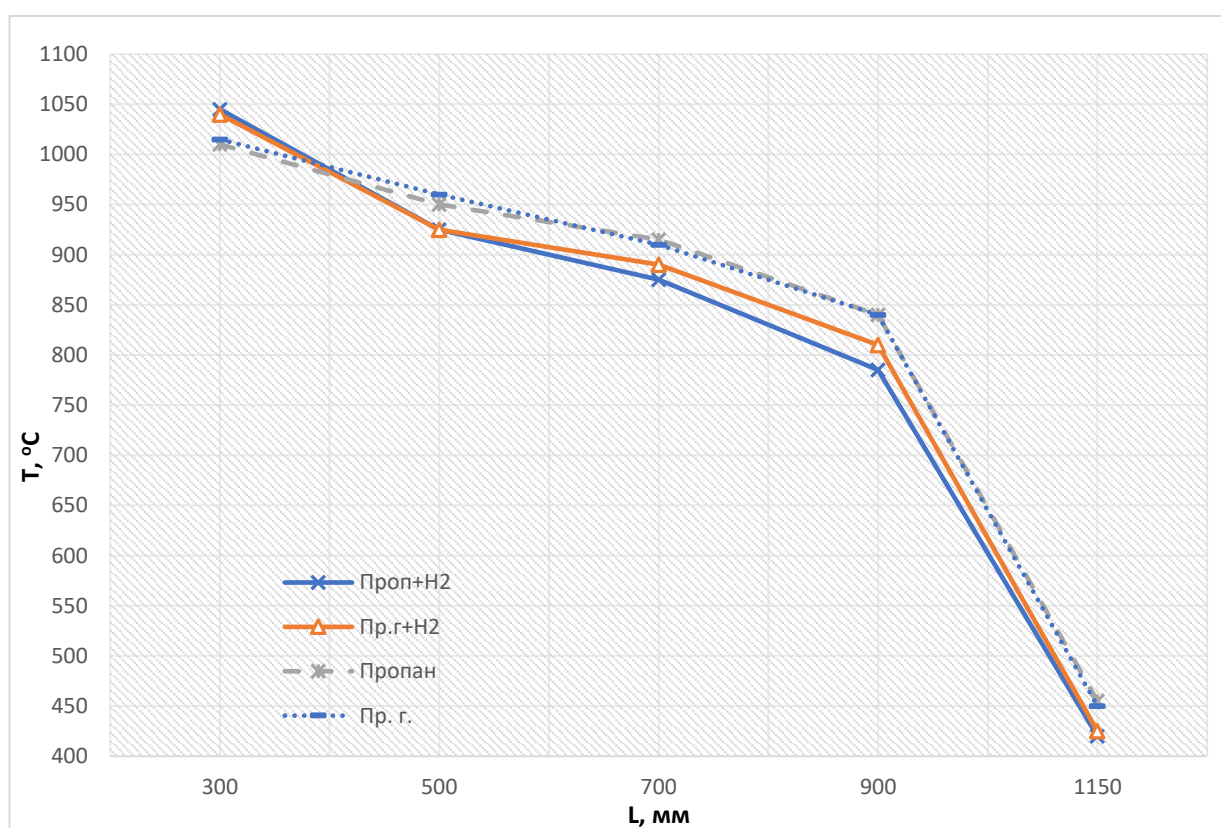


Рисунок 1 – Графік залежності температури на осі факелу від відстані до струмінво-нішевого стабілізатору при умовах  $\alpha=1,5-1,65$ ,  $N=30$  кВт

Температурний розподіл для зрідженого пропану-бутану має значні відмінності в порівнянні з природним газом. При  $\alpha=1,1-1,5$  температури на початковій ділянці факела вищі на 45–85°C, а хвостова ділянка має нижчі або подібні температури до "чистого" газу. При  $\alpha>1,85$  максимальні температури зміщуються до стабілізатора, зменшуючись по довжині факела з різницею у 12–17%. Для сумішного зрідженого газу температура на виході з футерованої ділянки також нижча на 25–40 °C у всіх режимах.

**Висновки.** Додавання водню призводить до скорочення довжини факела приблизно на 4–12%, особливо помітно при переході до горіння збідненої пальної суміші. Це свідчить про значний вплив домішок водню на температурний режим та конфігурацію факела, що може бути ефективним методом впливу на технологічний процес паливоспалювального устаткування.

Інтенсифікація процесів горіння із збільшенням температур високотемпературної зони суттєво впливає на екологічні показники устаткування. Подальші дослідження мають розкрити особливості емісії оксидів азоту та вуглецю при спалюванні сумішевих газів.

**Перелік посилань:**

1. Schefer R. Hydrogen enrichment for improved lean flame stability. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2003. Vol. 28, no. 10. P. 1131–1141. [https://doi.org/10.1016/s0360-3199\(02\)00199-4](https://doi.org/10.1016/s0360-3199(02)00199-4).
2. Experiment study on the combustion performance of hydrogen-enriched natural gas in a DLE burner / B. Ge et al. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44, no. 26. P. 14023–14031. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.257>.
3. H<sub>2</sub> enrichment of CH<sub>4</sub> blends in lean premixed gas turbine combustion: An experimental study on effects on flame shape and thermoacoustic oscillation dynamics / E. Karlis et al. *Fuel*. 2019. Vol. 254. P. 115524. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.107>.
4. Effect of hydrogen enrichment on swirl/bluff-body lean premixed flame stabilization / S. Guo et al. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45, no. 18. P. 10906–10919. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.020>.
5. Investigation of turbulent premixed methane/air and hydrogen-enriched methane/air flames in a laboratory-scale gas turbine model combustor / X. Liu et al. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, no. 24. P. 13377–13388. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.087>.
6. Analysis of the partially premixed combustion in a lab-scale swirl-stabilized burner fueled by a methane-hydrogen mixture / M. Stefanizzi et al. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 312. P. 11004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131211004>.
7. Stabilization mechanisms of CH<sub>4</sub> premixed swirled flame enriched with a non-premixed hydrogen injection / D. Laera et al. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.378>.
8. Siryi, O., Zhuchenko, A., Abdulin, A.: Improvement of reliability of fire engineering equipment based on a jet-niche technology. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.* 2/8(92), 12-19 (2018). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126917>.

<sup>1</sup> Магістрант 2 курсу Юрчук В.С.; <sup>1</sup> Мол. вчений Шелешей Т.В.

<sup>1</sup> Проф., д.т.н. Абдулін М.З.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=nkLa3cgAAAAJ&hl=ru>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ПОКАЗНИКИ ВИКИДУ ОКИСЛУ ВУГЛЕЦЮ ТА ОКСИДІВ АЗОТУ КОТЛА КВГМ-20 ПРИ ВИКОРИСТАННІ СТРУМЕНЕВО-НІШЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Енергетика тривалий час займає основне місце в нашому житті. На сьогоднішній день людині важко уявити своє життя без електроенергії і всіх тих можливостей, які вона нам дає. Так як попит на електроенергію зростає кожен день, відповідно енергосистема нашої країни потребує прогресивного розвитку. Ефективність розвитку полягає в підвищенні економічності, ефективності та екологічності.

Актуальність питання енергетичної безпеки зростала з моменту отримання незалежності і свого піку досягла з моменту початку повномасштабної агресії Росії по відношенню до України. На постійній основі почались погрози про припинення постачання різних енергетичних ресурсів, що змусило нас кардинально переглянути погляди на проблему, яка стосується енергетичної безпеки - це вагомий вплив на існування держави в цілому.

Для запоруки прогресивного розвитку енергосистеми та енергетичної безпеки необхідно зосередити свою увагу на підвищенні стійкості енергетичного сектору, розвивати здорову конкуренцію на енергоринку України та залучати все більше інвестицій для сучасних, екологічно чистих енерготехнологій.

На даний момент наша енергосистема працює в екстремальних умовах з мінімальним запасом міцності, як енергомереж, так і генерацій і критично потребує глобальних відновлень та модернізацій.

У нинішній час, в умовах війни, виникає все більше перепон для покращення та модернізації наявних систем енергопостачання, так як до деяких ми втратили доступ, деякі потрапили під руйнацію або взагалі були знищені.

Війна має негативний вплив на всі аспекти нашого життя та функціонування нашої країни. Непомірну шкоду було нанесено економіці та екології, саме тому більшість варіантів удосконалення різних типів установок направлено саме в дану галузь. Кожен день досліджуються різні варіації для досягнення збільшення економічності та екологічності без шкоди для потужності агрегатів. Одним з прогресивних методів є струменево-нішева технологія спалювання палива.

**Аналіз останніх досліджень.** Струменево-нішева технологія – універсальна технологія спалювання газоподібного палива, яка застосовується на всіх типах газоспалювального обладнання.

В струменево-нішеві технології відбувається зміна певних режимних факторів, такі як швидкість газу, повітря, тиск та температура, в досить широких межах, відбувається реалізація стійких та легкокеруємих вихрових структур з високою інтенсивністю турбулентності потоків палючого та окиснювача, а також зона зворотних потоків, яка в свою чергу забезпечує якісне сумішоутворення де є потрібний рівень паливної концентрації та аеродинамічну стабілізацію горіння, яка є напроцуд надійною. У зв'язку з тим, що об'єм вихорів є на декілька порядків менше, ніж у звичних вихрових ПП, їх вплив на пульсації в топці котла, ерозійний вплив на амбразуру та інші важливі елементи котла досягає відносно малих показників. Менший об'єм вихорів дозволяє виконувати пуск та подальшу

експлуатацію пального пристрою з меншою витратою газу, що в свою чергу забезпечує безпечність пуску та зводить до нуля кількість теплових ударів. Поліпшення змішувальних властивостей пального пристрою сприяє покращенню надійності роботи за умови гранично малих коефіцієнтів надлишку повітря, що в свою чергу сприяє зростанню значень середньої температури факелу в просторі топки.

Всі вищевказані переваги струменево-нішевої технології, дозволяють збільшити теплосприйняття радіаційної частини і призводить до зниження температури відхідних газів, так як кількість тепла, яке передається радіаційним випромінюванням в топці, пропорційне температурі факелу в четвертому ступені.

**Основна частина.** Для дослідження впливу СНТ на певний перелік параметрів, які мають безпосередній вплив на екологію було проведено дослідження на котлоагрегатах малої потужності. За основу дослідження було обрано котел КВГМ-20, після виміру всіх ключових параметрів було отримано режимну карту на основі якої були побудовані нижчезазначені графіки, які складають графічну складову висновку для дослідження даної технології.

Водогрійний газомазутний котел КВГМ-20 призначений для отримання гарячої води, використовується в системах опалення, вентиляції та гарячого водопостачання промислового та побутового призначення, а також для технологічних цілей.

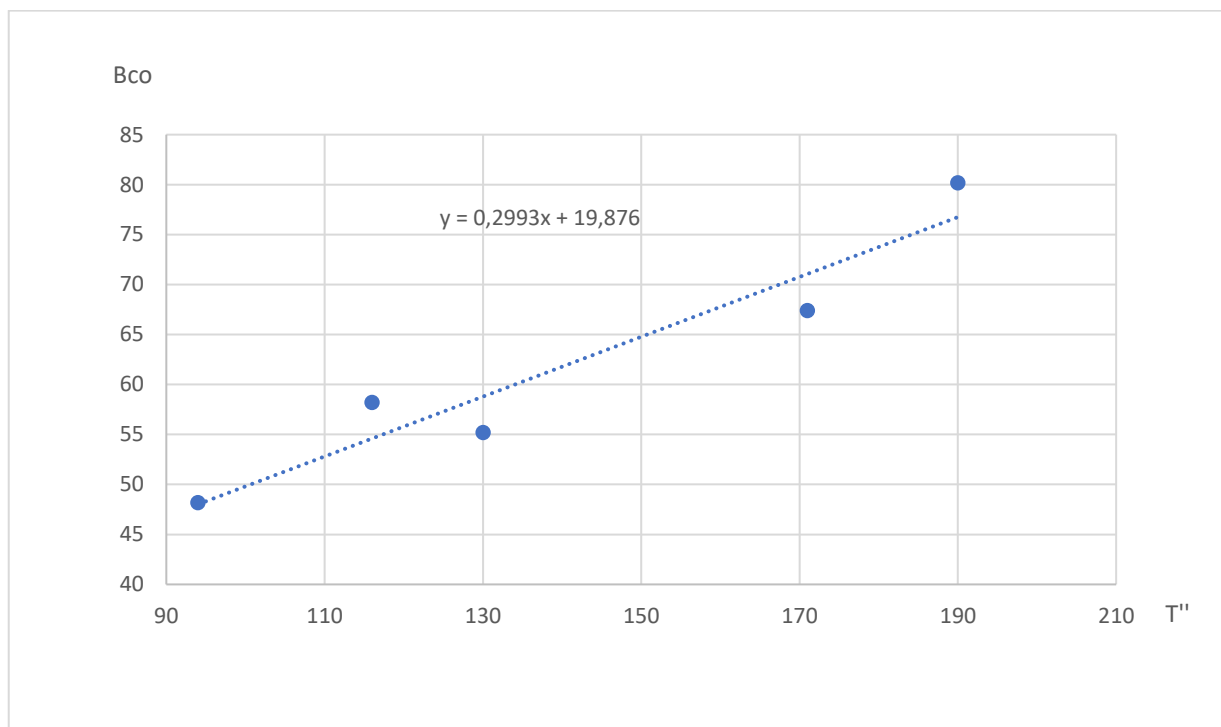


Рисунок 1 –Залежність викиду окислу вуглецю від температури димових газів

На даному графіку видно, що в діапазоні зміни температури димових газів від 94 °С до 190 °С зміна кількості викидів окислу вуглецю становить 32 г/Гкал. Викиди СО при спалюванні палива в котлах малої потужності досить високі, якщо порівнювати їх з роботою великих котлоагрегатів.

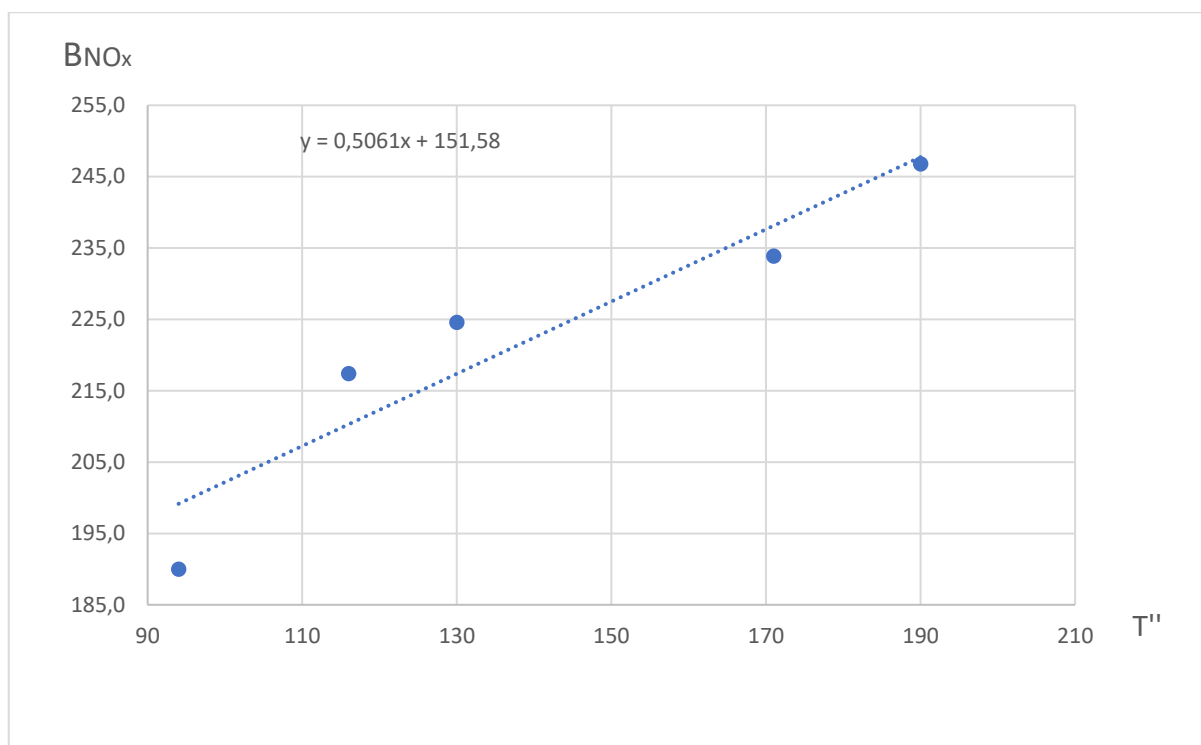


Рисунок 2 – Залежність викиду оксидів азоту від температури димових газів

На рисунку під номером 2 зображена зміна кількості оксидів азоту, які потрапляють в атмосферу при відповідній температурі димових газів. В результаті проведених розрахунків та вимірів отримано, що кількість викидів азоту змінюється від 190 г/Гкал до 246,8 г/Гкал в період зміни температури димових газів від 94 °С до 190 °С.

Розглянуто використання струменево-нішевої технології спалювання на прикладі котлоагрегату КВГМ-20. Проведено аналіз рівню викидів оксидів азоту та окислу вуглецю в навколишнє середовище.

**Висновки.** Дані, що ми отримали, свідчать про певні аналогічні тенденції в зростанні кількості шкідливих газів, як і CO, так і NO<sub>x</sub> при зростанні температури димових газів. В свою чергу СНТ зменшує температуру димових газів, що призводить до зменшення кількості викидів.

Використання даної технології дозволяє не тільки покращити екологічні показники пального пристрою, а й має значний вплив на економічний фактор, а саме зменшення кількості спалюваного палива до 50%. Струменево-нішева технологія широко використовується на промислових підприємствах України та має досить високі показники ефективності, екологічності та економічності.

**Перелік посилань:**

1. Збірник «Показники емісії викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря» Друга редакція. Том 1–3. Донецьк.– 2008 р.
2. Кандидатська дисертація, за ред. М.З. Абдуліна. «Струменево-нішева система сумішоутворення та стабілізація полум'я»

<sup>1</sup> Аспірант 3 курсу Мітченко І.О.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Романова К.О.

<https://scholar.google.ru/citations?user=L1WpB4AAAAAJ>

<sup>1</sup> НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського"

## ПРОЦЕСИ УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВОДНЕВОГО ПАЛИВА

**Постановка проблеми та її актуальність.** Водневе паливо широко досліджується як одне з джерел екологічно чистої енергії для потреб теплопостачання, яке можна отримати шляхом електролізу за рахунок використання надлишку енергії в періоди низького навантаження. Крім того, водневі системи опалення розглядаються як частина заходів по децентралізації системи теплопостачання. В процесі горіння чистого водню не утворюється жодних викидів CO і CO<sub>2</sub>, але можуть продукуватись оксиди азоту NO<sub>x</sub>. Саме утворення більшої кількості термічних NO<sub>x</sub> при спалюванні водню є однією з основних проблем для масового застосування водневого палива, так як ці викиди перевищують аналогічні показники для обладнання, що спалює природний газ.

**Аналіз останніх досліджень.** Експериментальні дослідження процесу спалювання водню показують, що викиди NO<sub>x</sub> значно більші ніж при горінні метану [1]. Наприклад у дослідженні, проведеному на газовому пальнику, модернізованому для спалювання водню, рівень викидів NO<sub>x</sub> при використанні чистого водню був у 10–100 разів вищим у порівнянні з чистим метаном при будь-якому коефіцієнті надлишку повітря [2]. Так само інше дослідження, в якому порівнювалась суміш 80% природного газу та 20% водню з чистим воднем, показало збільшення емісії NO<sub>x</sub> у 6,5 разів при застосуванні чистого водню [3]. Проте, дослідження залишають ряд питань щодо залежності викидів від температури факелу, коефіцієнту надлишку повітря та тепловою потужності установок, так як перелічені фактори мають критичний вплив на викиди оксидів азоту [4].

**Формулювання мети.** Визначення закономірностей утворення оксидів азоту при використанні водневого палива є важливою частиною дослідження водневого палива. Для цього враховуються температури для різних паливних сумішей при різних коефіцієнтах надлишку повітря та теплової потужності обладнання.

**Основна частина.** Викиди оксидів азоту при спалюванні кількісно визначаються двома способами. Спочатку розраховується маса виробленого NO<sub>x</sub> на одиницю енергію, вивільнену паливом через значення нижчої теплоти згорання; результуючі викиди NO<sub>x</sub> виражені в нанограмах на джоуль (нг/Дж) підведеної теплоти палива. При розрахунках та моделюванні процесу горіння важливо враховувати точні значення коефіцієнтів надлишку повітря та адіабатичних температур, оскільки різниця температур 10–20 К може повністю змінити характер утворення оксидів азоту.

Основний механізм утворення NO<sub>x</sub> - це механізм Фенімора, який складається з двох етапів:



Перша стадія реакції (1) є стадією обмеженої швидкості. Для збідненої паливної суміші термічний NO<sub>x</sub> утворюється шляхом перетворення HCN в NO<sub>x</sub> в чотири етапи:

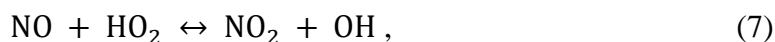




Ці реакції відбуваються у факелі. Оскільки HCN зрештою перетворюється на NO, цю сполуку можна вважати основним чинником викидів оксидів азоту.

Зі збільшенням частки водню в паливній суміші кількість вуглецю, доступного для утворення HCN, також зменшується, отже сам по собі водень не є причиною збільшення викидів оксидів азоту.

Викиди зростають при використанні водню і є значними лише при нижчому тиску та високих температурах полум'я (вище ніж 1900 К). Для горіння чистого водню основним механізмом є реакції 7,8:



Приклад моделювання виробництва термічних NO<sub>x</sub> в процесі спалювання метану та водню в програмному середовищі Ansys Chemkin наведено на рис. 1.

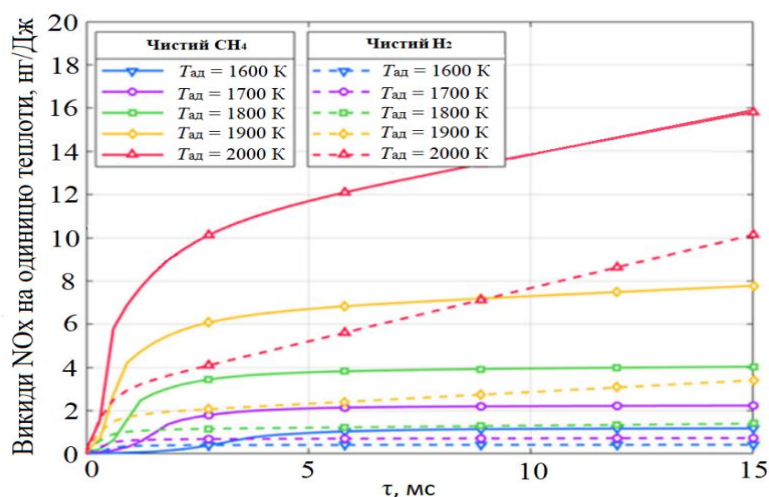


Рисунок 1 – Викиди NO<sub>x</sub> на одиницю теплоти при спалюванні метану та водню за сталих адіабатичних температур

З рисунку 1 видно, що при підвищенні температури факелу від 1900 К до 2000 К в швидкість утворення NO<sub>x</sub> збільшується приблизно з 0,11 нг/Дж-мс до приблизно 0,49 нг/Дж-мс, тобто більш, ніж у чотири рази і цей вплив може повністю домінувати над впливом складу палива. Це демонструє, що обчислення викидів NO<sub>x</sub> є комплексною задачею, що вимагає створення та дослідження кількох математичних моделей та подальшого порівняння отриманих результатів.

**Висновки.** Отже, швидкість виробництва NO<sub>x</sub> слабо пов'язана з вмістом водню H<sub>2</sub>, а основну роль при цьому грає температура факелу. Таким чином, при зменшенні температурного рівня факелу можна забезпечити рівень викидів оксидів азоту навіть менший, ніж при спалюванні природного газу. А водень є перспективним джерелом екологічно чистої енергії, проте ці технології потребують подальших всебічних досліджень.

#### Перелік посилань:

1. M. Ilbas, I. Yilmaz, Experimental analysis of the effects of hydrogen addition on methane combustion, *Int. J. Energy Res.* 2012. №36. P.643–647.
2. M.S. Cellek, A. Pinarbas, i, Investigations on performance and emission characteristics of an industrial low swirl burner while burning natural gas, methane, hydrogen-enriched natural gas and hydrogen as fuels, *Int. J. Hydrog. Energy.* 2018. № 43. P.1194–1207.
3. R.L. Hoekstra, P. Van Blarigan, N. Mulligan, NO<sub>x</sub> emissions and efficiency of hydrogen, natural gas, and hydrogen/natural gas blended fuels, *SAE Trans.* 1996. № 105. P. 761–773.
4. D. Noble, D. Wu, B. Emerson, S. Sheppard, T. Lieuwen, L. Angello, Assessment of current capabilities and near-term availability of hydrogen-fired gas turbines considering a low-carbon future, *ASME J. Eng. Gas Turb. Power.* 2021. № 143.

<sup>1</sup> Аспірант 3 курсу Носаль О.Ю.

<sup>1</sup> Проф., д.т.н. Бовсуновський А.П.

<https://scholar.google.com/citations?user=9D3UWjcAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВІБРАЦІЙНА ДІАГНОСТИКА ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ЛОПАТОК ТУРБІН

**Постановка проблеми та її актуальність.** Є актуальним вирішення проблем які виникають при експлуатації газотурбінних двигунів. Ці питання стосуються надійності експлуатації теплоенергетичного обладнання, що зазнає широкого діапазону статичних і динамічних навантажень у поєднанні з високою температурою та корозійним середовищем.

Найбільш доцільними для виявлення пошкоджень є вібраційні методи, які засновані зокрема на зміні власних частот, появі нелінійних резонансів, зміні коливального спектру та інші. Проте основною проблемою вібродіагностики є відносно низька чутливість до виявлення критичного пошкодження типу тріщини втоми, що виникає через тривале накопичення пластичної деформації. Перший спосіб підвищення надійності вібраційної діагностики пошкодження ґрунтується на виникненні нелінійних резонансів (суб- і супергармонійних) та значної нелінійності вібраційного відгуку при цих резонансах. Другий – на тому, що в деяких випадках може спостерігатися досить помітне підвищення характеристики демпфування, що викликане тріщиною.

**Аналіз останніх досліджень.** В основі вібродіагностики лежить той факт, що механічне пошкодження у вигляді локальної пластичної деформації або тріщини змінює жорсткість і демпфуючу здатність механічної системи. Ця зміна використовується як інформативна ознака пошкодження [5].

Нелінійні ефекти дуже чутливі до тріщини, що закривається. Їхньою проблемою щодо виявлення пошкоджень є зниження чутливості зі збільшенням затування. Високий рівень демпфування дозволяє майже повністю знизити прояв нелінійних ефектів. Це явище демонструється на (Рис. 1) збільшенням логарифмічного декременту коливань в діапазоні  $\delta=0,05-0,465$ .

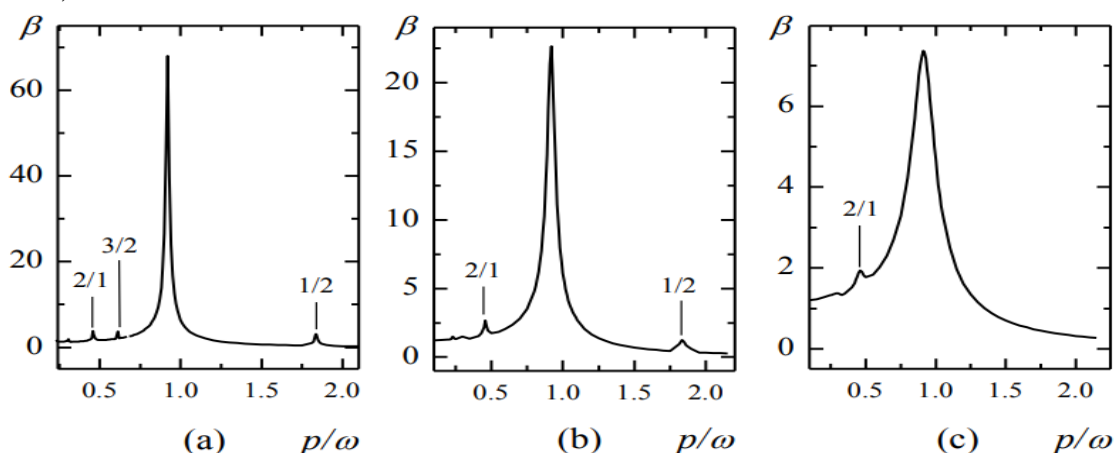


Рисунок 1 – Частотні залежності коефіцієнта динамічного відгуку конструкції із тріщиною, що закривається при різному затуванні

**Формулювання мети.** Метою дослідження є демонстрація ефективності методу вищих гармонік і характеристик демпфування для виявлення пошкоджень на ранніх стадіях лопаток газотурбінних двигунів, визначення умов, за яких ці методи є достатньо чутливими для надійної діагностики.

**Основна частина. Метод вищих гармонік.** Амплітуди нелінійних резонансів є дуже малими, тому вони мало придатні для діагностики пошкоджень. Водночас нелінійність коливань тіла з тріщиною при суб- та супергармонічних резонансах, проявляється у появі вищих гармонік у спектрі.

У результаті чисельних досліджень [2] було показано, що нелінійне в'язке та гістерезисне тертя призводить до появи непарних гармонік у спектрі вібраційного відгуку системи. Водночас порушення характеристики відновлювальної сили викликає появу парних гармонік, найбільша з яких, друга, є достовірною ознакою закриття тріщини. Нелінійність спектра вібровідповіді на прискорення в декілька разів перевищує нелінійність спектра вібровідповіді на деформацію, що підтверджують результати чисельних досліджень [3].

Проблема методу вищих гармонік полягає в тому, що, згідно з [3], супергармонійні резонанси набагато вужчі за головний резонанс.

Як видно з (Рис. 2), друга гармоніка спектра прискорювальної вібровіддачі при супергармонічному резонансі для лопаті зі сплаву EI-961 дещо вища, ніж для лопаті зі сплаву VT-3-1, незважаючи на те, що тріщина в ньому менша. Тут грає роль рівень демпфування: чим менше демпфування в системі, тим чутливіший метод вищих гармонік до наявності тріщини.

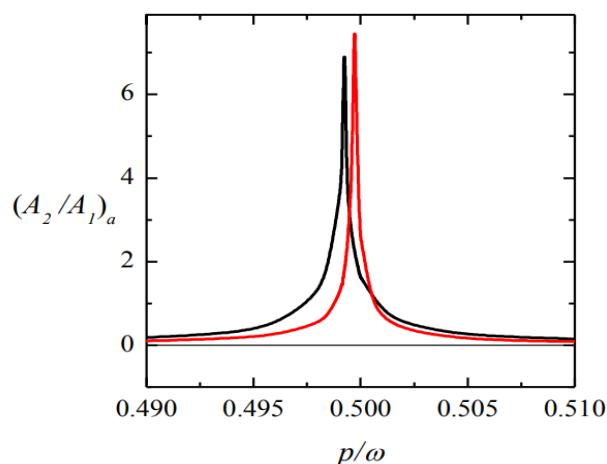


Рисунок 2 – Частотна залежність другої гармоніки спектра прискорення при супергармонічному резонансі порядку 2/1 для лопатей

**Демпфування.** Амплітудні залежності логарифмічного декременту коливань для непошкоджених лопаток і для двох рівнів пошкодження наведено на (Рис. 3).

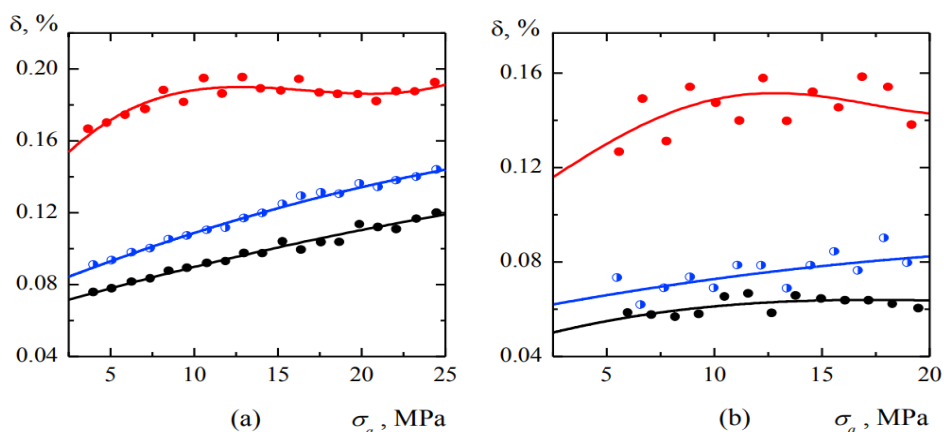


Рисунок 3 – Амплітудні залежності логарифмічного декременту коливань для лопатей зі сплаву VT-3-1 (а) та EI-961 (б): непошкоджений стан – чорні криві; перший рівень пошкодження – сині криві; другий рівень пошкодження – червоні криві.

Як видно, навіть перший рівень пошкодження призводить до збільшення демпфуючої характеристики на 21- 28% в діапазоні амплітуд напружень  $\sigma_a=5-20$  МПа [1].

Другий рівень пошкодження в тому ж діапазоні амплітуд напружень зумовлює підвищення демпфувальної характеристики лопаток зі сплаву ВТ-3-1 та EI-961 у 2,2–1,7 і 2,4–2,2 рази відповідно.

Як було показано в [4], чутливість демпферної характеристики до наявності тріщини суттєво залежить від початкового рівня демпфування конструкції в непошкодженому стані.

**Висновки.** Випробування лопаток, які були проведено при низькому рівні амплітуди напружень, продемонстрували високу чутливість другої гармоніки в спектрі деформаційно-прискореної вібраційної реакції при супергармонійному резонансі порядку 2/1 до наявності невеликої тріщини. Метод вищих гармонік вимагає значно більше часу для перевірки лопаті, ніж для визначення характеристики демпфування. Для структурних елементів з низьким демпфуванням, таких як досліджувані лопаті, пошук головного і супергармонійного резонансу потребує часу. Крім того, різкий супергармонійний резонанс викликає помітну помилку визначення другої гармоніки у вібраційній реакції пошкодженої лопаті. Однак метод вищих гармонік не вимагає вихідних даних для непошкодженої лопаті.

Визначення логарифмічного декременту коливань вимагає знаходження головного резонансу, збудження коливань заданої амплітуди та реєстрації процесу затухання коливань. Його обробка практично миттєво виконується ПК зі спеціальним програмним забезпеченням для отримання амплітудної залежності характеристики демпфування. Таким чином, процес діагностики пошкоджень на основі визначення характеристики демпфування є швидшим і легшим у реалізації, ніж метод вищих гармонік. Однак для визначення пов'язаної з тріщиною зміни характеристики демпфування необхідно знати її початкове значення для непошкодженої лопаті.

Загалом супергармонійний резонанс другого порядку демонструє більшу чутливість до наявності тріщини, ніж характеристика демпфування.

Сучасні тенденції підвищення достовірності вібраційної діагностики пошкоджень базуються на застосуванні кількох методів одночасно. Ця ідея щодо розглянутих у роботі методів може бути реалізована шляхом розробки автоматизованої системи діагностики на основі методу вищих гармонік, що є предметом майбутніх досліджень.

#### **Перелік посилань:**

1. Bovsunovsky, A.P., Kratko A.G., 1998. The shape of mechanical hysteresis loops for metals under harmonic loading. *Journal of Testing and Evaluation* 26, 31–37.
2. Bovsunovsky, A.P., 1999. Numerical study of vibrations of a nonlinear mechanical system simulating a cracked body. *Strength of Materials* 31, 571–581.
3. Bovsunovsky, A.P., 2001. Vibrations of a nonlinear mechanical system simulating a cracked body. *Strength of Materials* 33, 370–379.
4. Bovsunovsky, A.P., 2004. The mechanisms of energy dissipation in the non-propagating fatigue cracks in metallic materials. *Engineering fracture mechanics* 71, 2271–2281.
5. Bovsunovsky, A., Surace, C., 2015. Non-linearities in the vibrations of elastic structures with a closing crack: A state of the art review. *Mechanical Systems and Signal Processing* 62-63, 129–148.
6. Pisarenko, G.S., Yakovlev, A.P., Matveev, V.V., 1971. Vibration absorbing properties of structural materials (Handbook). Kyiv, Naukova Dumka.

<sup>1</sup> Бакалаврант 4 курсу Ніколенко М.М.

<sup>1</sup> Асист., д.ф.-м.н. Власенко О.В.

<https://scholar.google.com/citations?user=-Ih8IfYAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ЖИТЛОВИХ ТЕПЛОВИХ ПУНКТИВ М. КИЄВА

**Постановка проблеми та її актуальність.** Житлові теплові пункти міста Києва відіграють важливу роль у забезпеченні комфортних умов проживання для мешканців. Проте, існуючі системи теплопостачання часто потребують вдосконалення для досягнення оптимальної ефективності, енергоефективності та екологічності. Розглянемо ключові аспекти вдосконалення проектування індивідуальних систем теплопостачання для житлових теплових пунктів міста Києва та запропонуємо шляхи їх поліпшення [1].

У зв'язку з постійним зростанням енергоефективності та підвищенням екологічних стандартів у житловому будівництві міста Києва, виникає необхідність удосконалення проектування індивідуальних систем теплопостачання для житлових теплових пунктів. Наявні системи мають свої недоліки, такі як великі втрати тепла, низька ефективність, недостатня адаптивність до змін погодних умов та інші технічні проблеми [2]. Це призводить до високих витрат на опалення та негативного впливу на довкілля через збільшення викидів CO<sub>2</sub>. Актуальність удосконалення проектування індивідуальних систем теплопостачання для житлових теплових пунктів міста Києва обумовлена кількома факторами. По-перше, це необхідність зменшення споживання енергії та підвищення енергоефективності будівель з метою виконання енергетичних стандартів та зниження витрат на опалення. По-друге, це потреба у зменшенні негативного впливу на довкілля шляхом зменшення викидів CO<sub>2</sub> та інших шкідливих речовин [3]. По-третє, це підвищення комфорту для мешканців, забезпечення стабільного та ефективного опалення протягом всього опалювального періоду. Таким чином, удосконалення проектування індивідуальних систем теплопостачання є актуальним завданням, яке відповідає сучасним вимогам енергоефективності, екологічної безпеки та комфорту життя громадян [4].

**Аналіз останніх досліджень.** Останні дослідження в галузі удосконалення проектування індивідуальних систем теплопостачання для житлових теплових пунктів відображають актуальні тенденції та інновації у цьому напрямку. Дослідження показують, що застосування новітніх технологій, таких як смарт-контролери, системи автоматизації, теплові насоси та використання відновлюваних джерел енергії, може значно підвищити ефективність і енергоефективність систем теплопостачання.

**Формулювання мети.** Метою роботи є вдосконалення проектування індивідуальних систем теплопостачання для житлових теплових пунктів.

**Основна частина.** Одним із ключових аспектів вдосконалення індивідуальних систем теплопостачання є ефективне управління тепловими потоками в будівлі. Забезпечення оптимального рівня ізоляції та мінімізація теплових втрат можуть значно покращити енергоефективність та комфортність обслуговування житлових об'єктів [5]. Оптимізація теплових потоків – теплові потоки в будівлі визначаються теплопередачею через конструкційні елементи, такі як стіни, вікна, дахи та двері.

Інвестиції в нові потужності централізованого теплопостачання та нову розподільчу інфраструктуру централізованого теплопостачання мають скласти 13,2 млрд євро для джерел тепла та 47,6 млрд євро для теплових мереж у 2030 році. Інвестиції в енергоефективний будівельний фонд мають велике значення і мають скласти 427,3 млрд євро у 2030 році [6].

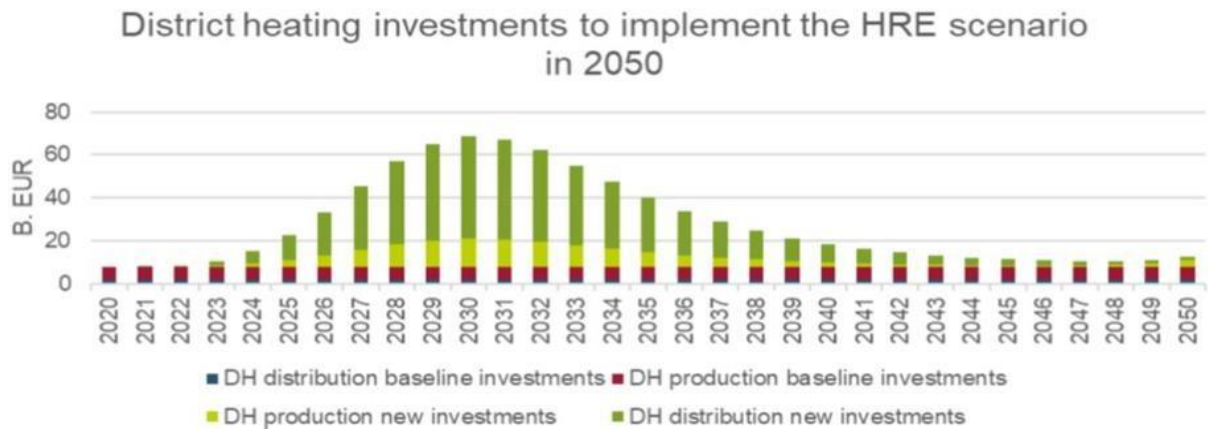


Рисунок 1 – Оцінка розподілу інвестицій у централізоване тепlopостачання для досягнення сценарію HRE 2050 [6]

Ефективне управління цими потоками дозволяє зберігати тепло в приміщенні взимку та зберігати прохолоду влітку, зменшуючи при цьому витрати на опалення та кондиціонування повітря. Одним із основних аспектів вдосконалення систем тепlopостачання є оптимізація теплових потоків. Для цього важливо враховувати теплові втрати через конструкційні елементи будинку. Для досягнення цього можна використовувати різноманітні математичні моделі та формули.

1. Розрахунок теплового опору стін. Важливим аспектом оптимізації теплових потоків є ізоляція будівлі. Використання матеріалів з високим тепловим опором дозволяє зменшити тепловтрати через стіни, дах та підлогу. Один із показників, який допомагає визначити ефективність ізоляції будівлі – це тепловий опір  $R_{total}$  стіни:

$$R_{total} = \frac{\Delta t}{Q} \quad (1)$$

де  $\Delta t$  – різниця температур між внутрішнім та зовнішнім середовищами,  
 $Q$  – тепловий потік через стіну.

2. Одним із методів вдосконалення проектування індивідуальних систем є теплопередача через стіну. Теплопередача через стіну будівлі може бути розрахована за допомогою формули Фур'є:

:

$$Q = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{d}, \quad (2)$$

де  $k$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стіни,  
 $A$  – площа стіни,  
 $\Delta T$  – різниця температур,  
 $d$  – товщина стіни.

3. Теплопередачі крізь вікна

Для вікон можна використовувати формулу для розрахунку теплопередачі:

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta T, \quad (3)$$

де  $k$  – коефіцієнт теплопередачі,  
 $A$  – площа вікна,  
 $\Delta T$  – різниця температур.

Для втрат тепла через двері можна використовувати формулу для розрахунку теплопередачі:

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta T, \quad (4)$$

де  $k$  – коефіцієнт теплопередачі,  
 $A$  – площа дверей,  
 $\Delta T$  – різниця температур.

4. Використання відновлювальних джерел енергії. Для зменшення залежності від традиційних джерел енергії, важливо розглядати можливість використання відновлювальних джерел. Наприклад, сонячні колектори можуть бути використані для нагрівання води для опалення та гарячого водопостачання. Ефективність сонячних колекторів:

$$\eta = \frac{Q_{sun}}{A \cdot I_{sun}}, \quad (5)$$

де  $\eta$  – ефективність сонячного колектору,  
 $Q_{sun}$  – теплова енергія, отримана від сонячного проміння,  
 $A$  – площа колектора,  
 $I_{sun}$  – інтенсивність сонячного проміння.

5. Впровадження енергоефективних технологій. Енергоефективні технології, такі як теплові насоси, можуть значно покращити ефективність систем теплопостачання. Коефіцієнт продуктивності теплового насосу COP:

$$COP = \frac{Q_{output}}{W_{input}}, \quad (6)$$

де  $Q_{output}$  – тепловий вихід,  
 $W_{input}$  – електрична потужність, спожита тепловим насосом.

**Висновки.** Вдосконалення проектування індивідуальних систем теплопостачання для житлових теплових пунктів міста Києва потребує ретельного аналізу теплових потоків в будівлі. Застосування вищезазначених формул дозволяє ефективно визначити оптимальні параметри ізоляції та енергоефективності системи.

**Перелік посилань:**

1. Крючков Є. М. Проектування систем теплопостачання: навчально-методичний посібник. - Запоріжжя: ЗДІА, 2010. – 250 с.
2. European Environment Agency. (2021). Energy consumption and energy efficiency. [Online]. Available: [<https://www.eea.europa.eu/>](<https://www.eea.europa.eu/themes/energy>).
3. International Energy Agency. (2020). Energy Efficiency 2020. [Online]. Available: [<https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2020>](<https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2020>).
4. United Nations Environment Programme. (2019). Emissions Gap Report 2019. [Online]. Available: [<https://www.unep.org/emissions-gap-report-2019>](<https://www.unep.org/emissions-gap-report-2019>).
5. World Green Building Council. (2021). Advancing Net Zero: Strategies for Cities. [Online]. Available: [<https://www.worldgbc.org/>](<https://www.worldgbc.org/resources/advancing-net-zero-strategies-cities>).
6. «Розробка схем теплопостачання населених пунктів України». Проект енергетичної безпеки USAID.– Київ, 2021.

## УДК 662.6

<sup>1</sup> Бакалаврант 4 курсу Степанченко А.А.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Риндюк Д.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=SAMbKroAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

### ПРОЄКТУВАННЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Через значне зростання цін на традиційні паливні енергоресурси, постійні ракетні обстріли енергетичних об'єктів України, що призводять до нестабільності централізованого забезпечення громадян теплом та електричною енергією на перше місце виступають альтернативні шляхи подолання цієї проблеми. Використання електрогенераторів, що працюють на традиційному паливі (бензині, газі, дизелі) є досить дорогим через значне зростання ціни внаслідок проблем з імпортом. Для невеликих приватних господарств та населення сільської місцевості доцільно використовувати технології газифікації, де в якості палива можливе використання відновлюваних ресурсів.

Відновлювальні джерела енергії, такі як, біопаливо стають дедалі популярнішими, оскільки біомаса та відходи промислової діяльності, наприклад залишки сільськогосподарської, деревообробної, харчової промисловості та комунальних господарств, широко доступні та є відновлюваними, і їх можна розглядати як стійкі ресурси.

**Аналіз останніх досліджень.** Процес термохімічної конверсії біомаси з метою отримання газоподібного палива досить відомий та неодноразово досліджений [1, 2, 4]. Проте дані технології не набули широкого розповсюдження в світі. Але в умовах енергетичної кризи технології газифікації стрімко розвиваються та їхнє застосування стає економічно все більш обґрунтованим й для газогенераторів малої потужності [3].

**Формулювання мети.** В умовах військової агресії і, як наслідок, браку часу та коштів доцільно розглядати найбільш прості та недорогі варіанти реалізації технології газифікації з метою отримання дешевої теплової та електричної енергії.

Метою даної роботи є проєктування газогенераційної установки малої потужності для отримання електроенергії на основі генераторного газу при використанні в двигунах внутрішнього згорання електрогенераторів.

**Основна частина.** Газифікація – це процес, при якому вуглецеві матеріали піддаються частковому окисленню за високих температур (750 –1100 °С), щоб утворити синтез-газ – газоподібну суміш із CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> та CH<sub>4</sub>. Цей ендотермічний процес, який вимагає тепла для утримання реакції, може здійснюватися при обмеженій кількості кисню.

Горіння вуглецевого палива можна описати таким рівнянням (1):



де описано повне згорання палива, яке супроводжується виділенням вуглекислого газу CO<sub>2</sub>.

Реакція (2) описує неповне згорання, в результаті якого утворюється горючий газ – оксид вуглецю CO.





Обидва ці процеси відбуваються в так званій «зоні горіння» газогенератора.

Оксид вуглецю CO утворюється також при проходженні вуглекислого газу CO<sub>2</sub> крізь шар розпеченого палива, що описано рівнянням (3):



У процесі бере участь частина вологи палива (або волога, підведена ззовні) з утворенням вуглекислого газу CO<sub>2</sub>, водню H<sub>2</sub> і пального оксиду вуглецю CO, що описано у рівняннях (4) і (5):



Зону, в якій протікають три описані вище реакції називають «зоною відновлення» газогенератора. Обидві зони: горіння та відновлення – несуть загальну назву «активна зона газифікації».

Основою на наведеній в [5] методиці та даних характеристик сировини було розраховано основні технологічні та конструктивні показники газогенераторної установки малої потужності (табл. 1). Як приклад дані наведено для відходів деревини (технологічна щепка).

Таблиця 1 – Основні технологічні та конструктивні показники газогенератора

Розрахунковий показник	Позначення, одиниці вимірювання	Результат
Нижча теплотворність робочої маси твердого палива	$H_n^p$ , МДж/кг	15,026
Вміст вуглецю в газі	$C_r$ , кг/м <sup>3</sup> газу	0,176
Вихід сухого газу з 1 кг робочого палива	$V_r$ , м <sup>3</sup> /кг	2,296
Питома вага сухого газу	$\gamma_r$ , кг/м <sup>3</sup>	1,109
Кількість вологи, що міститься в 1 м <sup>3</sup> газу	$f_r$ , кг/м <sup>3</sup>	0,124
Загальна кількість водяної пари в газі	$G_{H_2O}$ , кг/кг палива	0,285
Потрібна кількість повітря	$L$ , м <sup>3</sup> /кг	1,427
Нижча теплотворність газу	$H_u$ , МДж/м <sup>3</sup>	4,920
Кількість повітря, необхідного для спалювання 1 м <sup>3</sup> газу	$L_0$ , м <sup>3</sup> повітря/м <sup>3</sup> газу	1,033
Витрата газу	$Q_r$ , м <sup>3</sup> /год	13,903
Витрата палива на годину	$G_T$ , кг/год	6,056
Питома витрата палива	$g_e$ , кг/кВт	0,650
Потужність чотиритактного двигуна	$N_e$ , кВт	5,178
Діаметр камери газогенератора	$D_k$ , м	0,2
Діаметр нижньої частини газогенератора	$d_r$ , м	0,0689
Діаметр фурм	$d_\phi$ , мм	3,624

Отримані в результаті розрахунків значення доцільно використати для побудови газогенераційної установки малої потужності (рис. 1).



Рисунок 1 – Газогенератор малої потужності

**Висновки.** В роботі показано доцільність використання газогенераторів малої потужності для невеликих приватних господарств та сільської місцевості. Запропоновано проектування найбільш простої та надійної конструкції газогенератора. Проведено розрахунок технологічних та конструктивних параметрів газогенераційної установки малої потужності. Основні показники спроектованої установки: витрата палива 6 кг/год, об'єм сухого газу 13,9 м<sup>3</sup>/год, діаметр газогенератора 200 мм, висота 400 мм. Спроектований газогенератор призначений для постачання паливом чотиритактного двигуна потужністю 4 кВт.

**Перелік посилань:**

1. O. Negoda, V. Sobchenko and O. Orailo, "Gasification in eddies devices as promising direction development gas generators technologies.", Energy-saving technologies and equipment, 2013, pp 17-20.
2. O. Sokolovskyi, Y. Yarosh, N Tsyvenkova and S.Kukharets "The substantiation of the electrical power supply channel based on the gas-generator installation", Renewable energy, Zhytomyr, vol.1, pp. 72-82, August, 2019.
3. V. Rudzinsky, B. Yemets, C. Melnychuk, O. Ryabchuk and S. Tsimbal, "Criteria for optimal operation of automobiles on alternative fuels", Bulletin of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia, vol 13(№1), pp. 124-132, July 15, 2021.
4. P. Soprych, C. Czarski and P. Grzywacz "Studies on the Thermochemical Conversion of Waste Tyre Rubber- A Review", Energies, Basel, Switzerland, vol. 17(1), pp. 1-39, December 19, 2023.
5. B. Peterson, Wood Gasifier Builder's Bible: Advanced Gasifier Plans to Build Your Own Wood Gas Generator. Make Free Biofuel at Home Paperback – Large Print, June 29, 2014 – p.192. ISBN: 978-1500362270

<sup>1</sup> Бакалаврант 4 курсу Степанченко А.А.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Риндюк Д.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=SAMbKroAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОВІТРЯНОГО ЦИКЛОНА ДЛЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Для невеликих приватних домогосподарств і мешканців сільської місцевості можна ефективно використовувати альтернативні технології отримання теплової та електричної енергії. Це особливо актуально в умовах складної економічної та політичної ситуації, що наразі має місце в Україні. В сучасних умовах технології газифікації біопалива швидко розвиваються, і їх використання стає все більш обґрунтованим й для газогенераторів малої потужності. Для отримання електроенергії на основі генераторного газу необхідне його якісне очищення перед використанням в двигунах внутрішнього згоряння генераторів. Найбільш простим способом очистки генераторного газу від механічних домішок є застосування сухих методів очистки, в першу чергу циклонів.

**Аналіз останніх досліджень.** Зважаючи на відсутність достовірної методики розрахунку співвідношень геометричних характеристик для циклонів малої потужності (до 40 м<sup>3</sup>/год), прийнято рішення про доцільність створення математичної моделі процесу фільтрації генераторного газу в інерційному циклоні класичної конструкції з подальшим проведенням комплексу числових експериментів спрямованих на визначення раціональних геометричних співвідношень основних розмірів циклону.

**Формулювання мети.** Поставлена задача розглядалася як течія двофазних потоків де одна фаза (тверді частинки) рухаються у стаціонарному полі потоку другої (газової) фази. При цьому припускається, що вплив твердих частинок на потік газу (включаючи температуру) є незначним. Також вважалося, що масова витрата твердої фази (частинок) повинна бути не більше ніж 30% від масової витрати газової фази.

**Основна частина.** Для моделювання течій генераторного газу в циклоні використовувалися усереднені за Фавром рівняння Нав'є-Стокса [1], де враховуються усереднені за часом впливи турбулентності потоку на параметри потоку, а також рівняння переносу для турбулентної кінетичної енергії та швидкості її дисипації (k-ε модель). Для моделювання таких двофазних потоків, де потік газу забруднено частинками, використовувався підхід Лагранжа [2]. Частинки твердого матеріалу вважалися сферичними та такими, що мають постійну масу. Траєкторії частинок визначалися шляхом чисельного інтегрування рівняння (1):

$$m_{\text{част}} \frac{d\vec{U}_{\text{част}}}{dt} = \frac{1}{8} \pi \mu d Re C_{\text{оп}} (\vec{U} - \vec{U}_{\text{част}}) - \frac{1}{6} \pi d^3 \nabla P + m_{\text{част}} \vec{g}, \quad (1)$$

де  $m_{\text{част}}$  – маса частинки,  $\vec{U}_{\text{част}}$  – вектор швидкості частинки,  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості,  $d$  – діаметр частинки,  $C_{\text{оп}}$  – коефіцієнт опору частинки,  $\vec{g}$  – вектор гравітаційного прискорення,  $Re$  – число Рейнольдса, яке залежить від діаметра частинки, відносної швидкості, густини та в'язкості потоку.

Коефіцієнт опору частинок  $C_{\text{оп}}$  розраховувався за формулою Хендерсона [3], отриманою для безперервних, розріджених, дозвукових ( $M \leq 1$ ) ламінарних, перехідних і турбулентних потоків, що діють на частинки (2). Також враховано різниці температур між генераторним газом і частинкою. Обертання частинок, їх взаємодія одна з одною та браунівський рух не враховуються:

$$C_{\text{оп}} = 24 \left[ Re + S \left( 4,33 + \frac{3,65 - 1,53 \frac{T_{\text{част}}}{T}}{1 + 0,353 \frac{T_{\text{част}}}{T}} \exp(-0,247 \frac{Re}{S}) \right) \right]^{-1} + \exp\left(-\frac{0,5M}{\sqrt{Re}}\right) \quad (2)$$

$$\times \left[ \frac{4,5 + 0,38(0,03Re + 0,48\sqrt{Re})}{1 + 0,03Re + 0,48\sqrt{Re}} + 0,1M^2 + 0,2M^8 \right] + \left[ 1 - \exp\left(-\frac{0,5M}{\sqrt{Re}}\right) \right] 0,6S$$

де  $M$  – число Маха, що базується на відносній швидкості між частинкою і потоком газу,  $S = M \sqrt{\frac{\gamma}{2}}$  – відношення молекулярних швидкостей,  $\gamma$  – питома теплоємність,  $T$  – температура газу у потоці,  $T_{\text{част}}$  – температура частинок.

Рівняння теплової енергії для частинки мало наступний вигляд (3):

$$m_{\text{част}} C_{\text{част}} \frac{dT_{\text{част}}}{dt} = \pi d \cdot k \cdot Nu (T - T_{\text{част}}), \quad (3)$$

де  $C_{\text{част}}$  – питома теплоємність частинки,  $T_{\text{част}}$  – температура частинки,  $k$  – теплопровідність газу,  $Nu$  – число Нуссельта.

Коефіцієнт теплопередачі між частинкою та газом [4]:

$$Nu = \frac{2 + 0,459 Re^{0,55} Pr^{0,33}}{1 + 3,42 \frac{M}{Re Pr} (2 + 0,459 Re^{0,55} Pr^{0,33})} \quad (4)$$

Взаємодія частинок з внутрішніми поверхнями стінок циклона враховувалася шляхом визначення неідеального відбиття (5). Неідеальне відбиття визначалося нормальним  $e_N$  та тангенціальним  $e_\tau$  коефіцієнтами відбивання частинок:

$$e_N = \frac{V_{2,N}}{V_{1,N}}, \quad e_\tau = \frac{V_{2,\tau}}{V_{1,\tau}}, \quad (5)$$

де  $V_{2,N}$  і  $V_{2,\tau}$  – нормальна та тангенціальна складові швидкості частинки після зіткнення, а  $V_{1,N}$  та  $V_{1,\tau}$  – до зіткнення. Також враховувалася сила тяжіння.

**Висновки.** У зв'язку з недостатньою достовірністю результатів розрахунків конструктивно-технологічних параметрів для циклонів малої продуктивності проведеним по класичним методикам, запропоновано математичну модель фільтрації генераторного газу від механічних домішок (пил, зола та сажа). В подальшому, автор планує проведення комплексу числових експериментів на основі наведеної моделі з метою визначення оптимальних конструктивних параметрів саме для циклонів малої продуктивності.

#### Перелік посилань:

1. Hirsch, Charles (2007): Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. 2nd Edition - June 4, 2007, p. 700. ISBN: 9780750665940
2. Del Castello, L., and H. J. H. Clercx, Lagrangian acceleration of passive tracers in statistically steady rotating turbulence, Physical Review Letters, 107, 214,502, 2011.
3. Henderson, C. B. (1976) Drag coefficients of spheres in continuum and rarefied flows. AIAA Journal, 14(6), 707-708.
4. Muhamad I. Taiwo, Mohammed A. Namadi and James B. Mokwa, Design and analysis of cyclone dust separator / American Journal of Engineering Research (AJER), Volume-5, Issue-4, pp-130-134, e-ISSN: 2320-0847, p-ISSN: 2320-0936

<sup>1</sup> Бакалаврант 4 курсу Степанченко А.А.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Риндюк Д.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=SAMbKroAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНОГО ЦИКЛОНА ДЛЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

**Постановка проблеми та її актуальність.** При експлуатації газогенераторних установок малої потужності (до газу 40 м<sup>3</sup>/год) виникають значні проблеми з вибором конструкції та типорозмірів циклонів. Класичні методи розрахунку не пристосовані до такої малої продуктивності (витрат газу, що фільтрується) обладнання та не дають адекватних результатів.

Автором було прийнято рішення про доцільність створення математичної моделі процесу фільтрації генераторного газу в інерційному циклоні класичної конструкції з подальшим проведенням комплексу числових експериментів спрямованих на визначення оптимальних геометричних співвідношень основних розмірів циклону.

**Аналіз останніх досліджень.** Проблема очистки газів та повітря від механічних домішок гостро стоїть перед багатьма галузями народного господарства.

Так у праці [1] авторами представлено результати дослідження ефективності процесу очищення повітряного потоку від деревного пилу та вивчено вплив конструктивних параметрів циклона на процес очищення запиленого потоку повітря. Розглянуто циклон середньої продуктивності з основним діаметром 600 мм та зроблено висновок про доцільність збільшення циліндричної частини циклона.

Робота [2, 3] присвячені дослідженню впливу геометричних розмірів циліндричної частини циклона, геометрії вхідного патрубку та глибини занурення вихлопної труби на основні експлуатаційні характеристики апарата на основі теоретичних та експериментальних досліджень. Авторами порівняно отримані результати з відомими теоріями пиловловлення. Відмічено, що класичні теорії не враховують у повній мірі геометрію циклона, а розглядають рух частинки пилу тільки в циліндричній частині циклона. Зроблено висновок, що збільшення величини занурення вихлопної труби призводить до підвищення гідравлічного опору циклона.

Варто відмітити, що використання математичного моделювання при дослідженні руху потоків рідини або газу є досить зручним та надійним способом аналізу процесів, що відбуваються в енергетичному обладнанні. Так в роботі [4] висвітлено підхід до моделювання поведінки вологого пара в паропроводі енергоблоку з урахуванням крапель рідкої фази, деякі частини наведеної методики доцільно використати й для моделювання поведінки газу в циклоні.

**Формулювання мети.** Вирішення поставленої задачі визначення оптимальних геометричних співвідношень основних розмірів циклону запропоновано здійснити за допомогою проведення активного числового експерименту з використанням математичної моделі процесу фільтрації генераторного газу в інерційному циклоні.

Обираємо в якості параметра оптимізації ефективність очистки газу  $\eta$ , % від дрібнодисперсних механічних домішок (пил, зола, сажа) в циклоні.

**Основна частина.** Проведемо вибір незалежних вхідних (геометричних) параметрів процесу:  $X_1$  – діаметр циклону  $D$ , мм;  $X_2$  – висота циліндричної частини циклону  $H_1$ , мм;  $X_3$  – відношення висоти конічної частини циклону  $H_2$  до діаметра циклону  $D$ ;  $X_4$  – кут нахилу конічної частини циклон  $\beta$ , град.;  $X_5$  – відношення діаметру вхідного патрубка

$d$  до діаметра циклону  $D$ ;  $X_6$  – відношення висоти вихідного патрубку  $h$  до висоти циліндричної частини циклону  $H_1$ ;  $X_7$  – відношення висоти вхідного патрубку  $a$  до висоти циліндричної частини циклону  $H_1$ ;  $X_8$  – відношення ширини вхідного патрубку  $b$  до діаметра циклону  $D$ ;  $X_9$  – кут нахилу вхідного патрубку до горизонту  $\gamma$ , град.

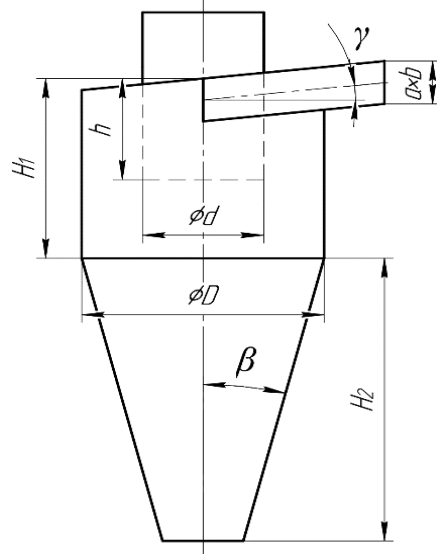


Рисунок 1 – Схема циклона та основні геометричні фактори

Всі вказані фактори є сумісні між собою та незалежними й, на думку авторів, є суттєвими.

Проведення повного багатофакторного експерименту за наявності 9 факторів є занадто трудомістким та тривалим процесом, тому доцільно здійснити відсіюючі експерименти з метою визначення незначущості окремих факторів [5].

Створимо ряд розрахункових схем на основі моделей циклона (рис. 2, а) з відповідним варіюванням факторів (геометричних розмірів) та проведемо комплекс числових експериментів.

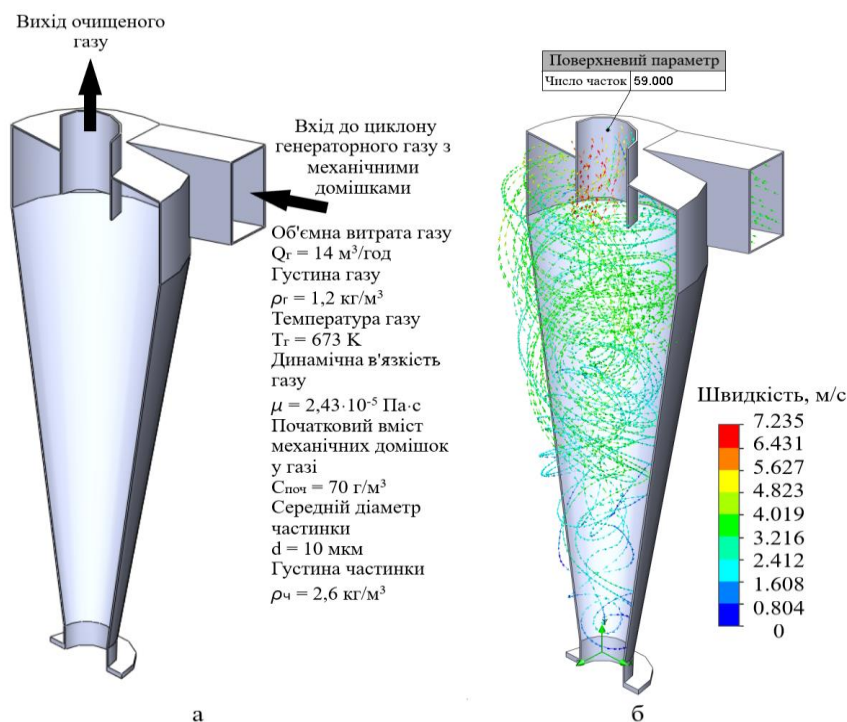


Рисунок 2 – Розрахункова схема (а) та приклад розподілу швидкостей руху твердих часток й ефективності очищення при одному з числових експериментів (б)

За результатами спланованих дослідів (числових експериментів), методом найменших квадратів, з виконанням вимог регресійного аналізу, визначимо коефіцієнти рівняння (1) (табл. 1) [6]:

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n a_{ij} X_i^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_{ji} X_j^2 \quad (1)$$

де  $i$  – номер фактору,  $j$  – номер дослідів згідно плану ОЦКП,  $a$  – відповідні коефіцієнти рівняння.

Таблиця 1 – Коефіцієнти рівняння регресії

Коефіцієнти рівняння регресії							
$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_{11}$	$a_{22}$	$a_{33}$	$a_{123}$
-26.208	0.867	-0.131	3.760	-0.003	0.368	-0.121	3.139

Визначимо екстремум функції відгуку  $\eta$ , % та оптимальний розподіл факторів (геометричних параметрів циклона) в межах області факторного простору ( $100 \leq D \leq 150$ ;  $2 \leq H_2/D \leq 3$ ;  $11 \leq \gamma \leq 17$ ) описано рівнянні (2):

$$\eta(D, \frac{H_2}{D}, \gamma) \rightarrow \max; \quad (2)$$

$$D_{\text{опт}} = 126 \text{ мм}; \left(\frac{H_2}{D}\right)_{\text{опт}} = 3; \gamma_{\text{опт}} = 15,5 \text{ град};$$

$$\eta_{\text{опт}} = 60,486\%.$$

**Висновки.** Проведені дослідження показали, що навіть при оптимальному розподілі геометричних параметрів циклона якість очистки генераторного газу недостатня для використання його в ДВЗ. Необхідна двоступенева система фільтрації з фільтром тонкої очистки.

**Перелік посилань:**

1. Дорундяк Л.М. Результати дослідження ефективності процесу пиловловлення у циклоні для системи перекачування деревних відходів. Науковий вісник НЛТУ України 22.14 (2012). – с. 152–157.
2. Ляшеник А.В. та ін. Вплив висоти циліндричної частини та глибини занурення вихлопної труби на характеристики циклона. Науковий вісник НЛТУ України 21.3 (2011). – с. 101–106.
3. Очеретько А.В., Черембячко І.М. Збільшення ефективності роботи центробіжних пиловловників на гірничому виробництві / А.В. Очеретько, Молодь: наука та інновації: матеріали Всеукраїнської науковотехнічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 11–12 листопада 2021 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ «ДП», 2021. – с. 91–92.
4. Беднарська І.С., Риндюк Д.В. Визначення напружено-деформованого стану стопорно-регулюючого клапана АЕС з урахуванням газодинаміки робочого тіла. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки, Том 33(72), №5, 2022. С. 193 –198. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/28>
5. Методи оптимізації та математична статистика / уклад. Т.Г. Мисюра, Т.М. Погорілий, В.Л. Зав'ялов — К.: НУХТ, 2017. — 169 с.  
Методи оптимізації та математична статистика: курс лекцій для студентів освітнього ступеня «Магістр» / Бодров В.С., Зав'ялов В.Л., Мисюра Т.Г. та інш. – К.: НУХТ, 2016. – 103 с.

СЕКЦІЯ № 5

**Проблеми  
теоретичної і  
промислової  
теплотехніки**



<sup>1</sup> Аспірант 1 курсу Заболотний О.А.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Соломаха А.С.

<https://scholar.google.com/citations?user=ZqcAQ-oAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## УЛОВЛЕННЯ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ У ВІДЦЕНТРОВОМУ АПАРАТІ

**Постановка проблеми та її актуальність.** В останні роки зростає тенденція щодо переходу до низьковуглецевої енергетики. Це викликано тим, що викиди вуглекислого газу від енергетичного обладнання є однією з найважливіших причин глобального потепління. Тому сучасні енергетичні установки повинні в процесі роботи забезпечувати не лише високу енергетичну ефективність, а й низькі викиди CO<sub>2</sub>.

**Аналіз останніх досліджень.** Останнім часом учені звертають дедалі більше уваги на дослідження уловлювання вуглецю, вони пропонують різні варіанти уловлення вуглекислого газу: видалення CO<sub>2</sub> безпосередньо з атмосфери, уловлення після установок спалювання, попередня обробка природного газу відразу після видобутку та ін. Останнім часом відбувається інтенсивний перехід до спалювання біопалива, яке в початковому стані має значний вміст CO<sub>2</sub> (в залежності від шляху отримання біопалива вміст CO<sub>2</sub> може сягати 40% і більше), що призводить до низької теплотворної здатності палива в порівнянні з природним газом

**Формулювання мети.** Одним із потенційних шляхів вирішення проблеми є уловлення CO<sub>2</sub> із біогазу до спалювання. Можна виділити дві переваги такого методу [1]:

- Покращення теплотворної здатності палива, що суттєво впливає на промислове використання біогазу у великих масштабах.
- Позитивний екологічний аспект, оскільки вловлений вуглекислий газ CO<sub>2</sub> не потрапляє в атмосферу, що сприяє вирішенню проблеми глобального потепління.

Існує багато різних конструкцій апаратів для уловлювання вуглекислого газу, але в цій роботі будуть розглядатись обертові насадки. Вони добре себе зарекомендували у порівнянні із більш розповсюдженою мембранною технологією, адже мембрани мають низьку ефективність, та не підходять для потоків газу великого об'єму. Інша технологія – адсорбція, має перевагу у простоті та низькій вартості, але використовується лише в окремих спеціальних випадках через різну адсорбційну здатність для різних компонентів газу. Традиційні насадкові колони також досить розповсюджені для уловлення CO<sub>2</sub>, але мають ряд недоліків, а саме – низька продуктивність масообміну, великі габарити установки, що часто є проблемою для промислових об'єктів [2].

Обертові ж насадки мають ряд переваг у порівнянні із конкурентами, а саме – компактність установки, менше споживання енергії, широкий діапазон робочих параметрів і головне – це високий коефіцієнт масовіддачі, що досягається завдяки постійному контакту рідини із газом у насадці під дією відцентрових сил [3]. Зовнішній вигляд відцентрового апарату наведено на рис.1.

**Основна частина.** Традиційна конструкція відцентрового апарату містить ротор із насадкою, патрубками для входу і виходу газу та рідини, розподільники рідини, а також ущільнення і кожух. Найчастіше апарат виконують за протитечійною схемою, яка і зображена на рисунку 1. Рідина потрапляє до апарату через насадку ротора, та контактує з газом, що подається протитоком. Під дією відцентрового поля, що утворюється в результаті обертання насадки, рідина розподіляється у вигляді плівки та окремих крапель, що рухаються з високою швидкістю та мають велику площу контакту із газовою фазою. Це

суттєво інтенсифікує процес масообміну між газом та рідиною, а отже значно покращує продуктивність апарату.

У процесах уловлювання CO<sub>2</sub> у якості рідини виступає рідкий сорбент. Найбільш розповсюджений абсорбент, що використовуються у промисловості – це NaOH. В останні роки більш широкого розповсюдження набувають такі абсорбенти як моно-етанол-амін (MEA), піперазин (PZ) та 2-аміно-2-метил-пропанол (AMP).

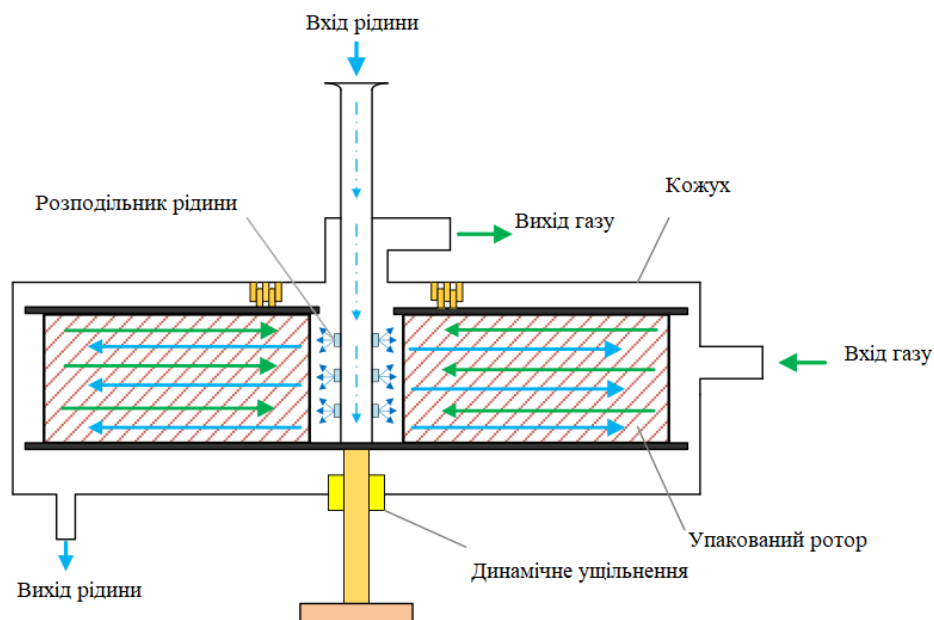
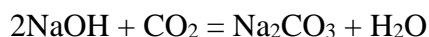


Рисунок 1 – Схема відцентрового апарату із насадкою

В багатьох літературних джерелах аналізуються різні абсорбенти та досліджується їх ефективність. Із найбільш перспективних рідин в останні роки відмічають моно-етанол-амін (MEA), у нього високі показники ефективності, а NaOH у свою чергу, намагаються використовувати менше, хоча він і досі є актуальним абсорбентом [4]. Класична хімічна реакція уловлення має вигляд:



Коефіцієнт ефективності уловлювання для сучасних абсорбентів може сягати вище 60%. Робочі параметри апарату гнучкі у регуляції, та не потребують спеціальних умов. Апарат працює при атмосферному тиску та у діапазоні температур 293-323 К. Об'ємні витрати рідини та газу варіюються у діапазоні 0,1-0,7 л/хв та 10-70 л/хв відповідно. При високій швидкості обертання насадки затоплення системи малоімовірно, середня швидкість обертання для ефективного уловлення знаходиться у діапазоні 800-1800 об/хв [5].

**Висновки.** Можна підсумувати, що технологія уловлювання CO<sub>2</sub> із використанням відцентрових обертальних насадок є перспективною технологією, що може прийти на зміну більш розповсюдженим насадковим колонам та мембранам.

#### **Перелік посилань:**

1. Chia-Chang Lin, Ching-Rong Chu Feasibility of carbon dioxide absorption by NaOH in a rotating packed bed with blade packings. International Journal of Greenhouse Gas Control 42, 2015.
2. Liang-Liang Zhang, Jei-Xin Wang, Yang Xiang, Xiao-Fei Zeng, Jian-Feng Chen. Absorption of carbon dioxide with ionic liquid in a rotating packed bed contactor. Beijing, Republic of China, 2011.

3. Wei Zhang, Peng Xie, Yuxing Li, Lin Teng, Jianlu Zhu. Hydrodynamic characteristics and mass transfer performance of rotating packed bed for CO<sub>2</sub> removal by chemical absorption. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 79, 2020.
4. Bingato Zhao, Wenwen Tao, Mei Zhong, Yaxin Su, Guomin Cui Process, performance and modeling of CO<sub>2</sub> capture by chemical absorption using high gravity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65, 2016.
5. Chia-Chang Lin, Yi-Wen Kuo Mass transfer performance of rotating packed beds with blade packings in absorption of CO<sub>2</sub> into MEA solution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016.

<sup>1</sup> Аспірант 2 курсу Подстєвая Т.Л.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Серєда В.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=-a6E3eMAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДГРІВУ ВОДИ ТА ПОВІТРЯ В ТЕРМІЧНІЙ ОПРІСНЮВАЛЬНІЙ УСТАНОВЦІ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Наявні опріснювальні установки в основному великомасштабні, недоліками яких є величезні потреби в енергії та матеріалах. Останнім часом все більше досліджень спрямовано на розробку методів опріснення з використанням поновлювальної енергії (особливо сонячної), таких як зволоження-осушення повітря (humidification-dehumidification, HDH).

**Аналіз останніх досліджень.** З метою отримання максимальної ефективності процесу опріснення багато науковців проводять термодинамічні та ексергетичні аналізи різноманітних схем циклу HDH та способів підігріву повітря і води в установці [1]. Аналіз досліджень показав, що більшість наукових праць націлені на термодинамічні дослідження схем з підігрівом води, проте мало уваги приділяється схемам з нагрівом повітря.

**Формулювання мети.** Аналіз термодинамічних характеристик відкритого циклу зволоження-осушення з нагрівом повітря, і порівняти ефективність цієї системи з використанням нагріву води відкритої схеми знесолення води.

**Основна частина.** Схему опріснювальної установки, яка працює за принципом відкритих циклів повітря та води та детальний опис її роботи наведено в [2]. Математична модель роботи установки була розроблена за допомогою інженерного забезпечення РТС Mathcad і наведена в [2].

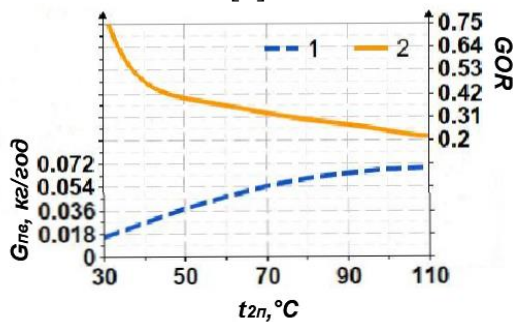


Рисунок 1 - Залежність GOR і  $G_{пв}$  від  $t_{2п}$ :  
1 –  $G_{пв}$ ; 2 – GOR

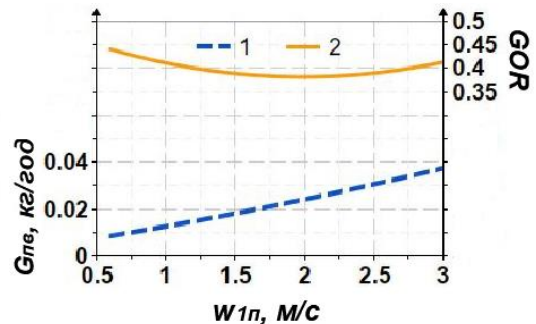


Рисунок 2 - Залежність GOR і  $G_{пв}$  від  $w_{1п}$ :  
1 –  $G_{пв}$ ; 2 – GOR

На рис. 1 показано зміну продуктивності установки ( $G_{пв}$ ) та її енергетичної ефективності (GOR) від температури повітря на вході до зволожувача  $t_{2п}$ . Видно, що при збільшенні  $t_{2п}$  значення GOR зменшується, разом з тим продуктивність установки зростає. Використання поновлювальної (безкоштовної) енергії дає можливість підвищити виробництво прісної води до чотирьох разів за рахунок збільшення поглинальної здатності повітря у випарнику.

На рис. 2 зображено зміну продуктивності установки ( $G_{пв}$ ) та її енергетичної ефективності (GOR) від швидкості повітря на вході до зволожувача ( $w_{1п}$ ). Як бачимо,  $G_{пв}$  постійно зростає зі збільшенням  $w_{1п}$  і досягає максимального значення за  $w_{1п} = 3$  м/с. У разі подальшого збільшення швидкості повітря розпочнеться унесення солоної води разом з повітряним потоком, що призведе до забруднення дистилляту та зростання затрат енергії. З

огляду на те, що різниця між мінімальним і максимальним значеннями GOR досить мала (GOR = 0,4-0,5), для забезпечення максимальної продуктивності та плівкового стікання води швидкість повітря у зволожувачі має становити  $\approx 3$  м/с.

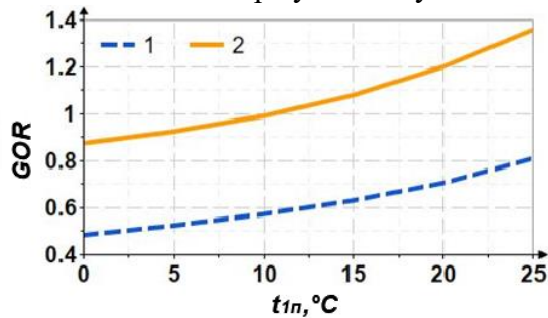


Рисунок 3 - Залежність GOR від  $t_{1п}$ : нагрів повітря – 1; води – 2

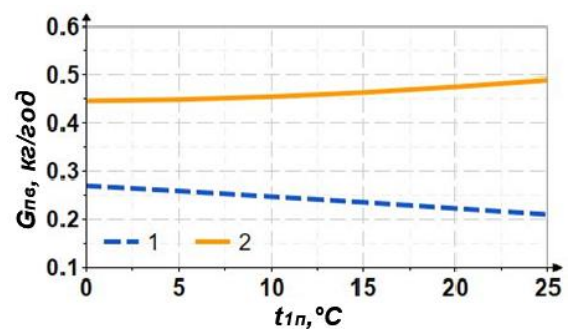


Рисунок 4 - Залежність  $G_{пв}$  від  $t_{1п}$ : нагрів повітря – 1; води – 2

На рис. 3 показано зміну коефіцієнту GOR від температури зовнішнього повітря  $t_{1п}$ . Видно, що для обох схем зростання  $t_{1п}$  призводить до збільшення ефективності. Це зумовлено тим, що збільшення  $t_{1п}$  дає змогу підводити менше теплоти у сонячному нагрівнику  $Q_{наг}$  для нагріву повітря або води. Водночас ефективність установки з нагрівом води є кращою ( $\approx$  на 70%) за схему з підігрівом повітря у всьому діапазоні зміни  $t_{1п}$ .

Розглянемо зміну продуктивності установки  $G_{пв}$  від температури зовнішнього повітря  $t_{1п}$  (рис. 4). Як бачимо, витрата дистилляту у схемі з нагрівом води зростає зі збільшенням  $t_{1п}$ , на противагу схемі з підігрівом повітря. Зменшення  $G_{пв}$  під час нагріву повітря зумовлено зміною фізичних властивостей вологого повітря.

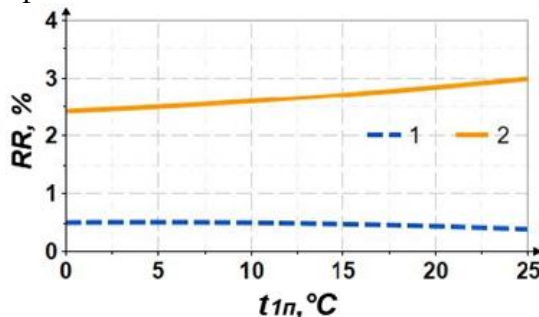


Рисунок 5 - Залежність RR від  $t_{1п}$ : нагрів повітря – 1; води – 2

Залежність коефіцієнта відновлення RR від  $t_{1п}$  наведено на рис. 5. Видно, що для ефективної роботи системи з підігрівом води в установку потрібно подавати в два рази меншу витрату соленої води  $G_{св}$  порівняно з випадком нагріву повітря. Разом з цим, продуктивність систем з підігрівом води більша на 65-150% від установок з нагрівом повітря за аналогічних параметрів (див. рис. 4). Це дає змогу отримати значення RR мінімум у п'ять разів більше для схеми з нагрівом води.

**Висновки.** Можна стверджувати що відкрита схема з підігрівом води за всіма показниками (GOR, MR, RR) ефективніша за цикл з нагрівом повітря. Для покращення зволоження повітря необхідно зробити процес охолодження і зволоження повітря більш крутішим. Такий результат можна досягти підвищенням температури води на вході до зволожувача  $t_{зв}$  за одночасного підігріву води і повітря на вході до зволожувача.

#### Перелік посилань:

1. Mohamed A. S. A., Ahmed M. S., Maghrabie H. M., Shahdy A. G. Desalination process using humidification– dehumidification technique: A detailed review. Int J Energy Res. 2020. С. 1–52. Doi: 10.1002/er.6111.
2. Подстєвая Т. Л., Серєда В. В. Термодинамічний аналіз відкритої системи термічного знесолєння води з підігріванням повітря. Енергетика і автоматика. 2023. № 0(6). С. 28-39. Doi:10.31548/energiya6(70).2023.028

<sup>1</sup> Аспірант 2 курсу Ярошевич М.В.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Соломаха А.С.

<https://scholar.google.com/citations?user=ZqcAQ-oAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕПЛОПРОДУКТИВНОСТІ КОТЛА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІД СКЛАДУ ВОДОЕМУЛЬСІЙНОГО ПАЛИВА

**Постановка проблеми та її актуальність.** Задля можливості економії паливних ресурсів в критичних умовах роботи енергетичного комплексу України підвищилась актуальність пошуку менш затратних за традиційні видів палива, які можливо використовувати у промислових та побутових масштабах. Одним із можливих варіантів є використання водо-паливних емульсій (ВЕР), які можуть замінити традиційні рідкі палива при експлуатації водогрійних котлів малої потужності.

**Аналіз останніх досліджень.** Водо-паливна емульсія, окрім економічної вигоди [1], має також суттєву екологічну перевагу. Більшість апаратних технологій контролю викидів та вдосконалення систем подачі палива не здатні зменшувати викиди NO<sub>x</sub> і твердих частинок при збереженні продуктивності агрегату, адже відомо, що зниження максимальної температури, досягнутої під час згорання, зменшує викиди NO<sub>x</sub>, але перешкоджає повному окисленню, тим самим збільшуючи викиди твердих частинок [2].

Використання водо-дизельної емульсії зменшує викиди NO<sub>x</sub> [3] за рахунок зниження максимальної температури факелу в камері згорання і водночас покращує змішування та розпилення завдяки явищу мікрровибуху, що знижує викиди твердих частинок [4]. Також вагомою перевагою є можливість застосування технології як для вже існуючих, так і для нових котлів, оскільки вона не потребує суттєвої зміни в технології виготовлення чи експлуатації обладнання.

**Формулювання мети.** В процесі дослідження обчислювали теплопродуктивність котла для кожного складу з відсотковим вмістом води в емульгованому паливі від 0 до 50% та визначили ККД котла в залежності від складу палива [5].

**Основна частина.** Дослідження було проведено на експериментальному стенді, принципова схема якого показана на рисунку 1.

В котел подається паливо із заданими початковими параметрами та складом. Перед подачею паливо проходить обробку в кавітаційній установці 7, де суміш води з дизелем проходить через суперкавітуючий насос, що перекачує та одночасно змішує рідкі речовини. На виході з вузла приготування отримується водо-дизельна емульсія [4,6].

Температура всередині котла вимірюється поверхневою термопарою в комплексі з автоматичним потенціометром Т4. Температура продуктів згорання вимірюються на прямій ділянці газоходу термопарою 9.

Вода, нагріта в котлі, за допомогою циркуляційного насосу 4 перекачується через поверхневий повітряний теплообмінник 3, в якому вона охолоджується і повертається знову в котел. З'єднувальні трубопроводи обладнані запірною-регулювальною арматурою 5 та засобами для вимірювання витрати води 2 через водяну порожнину котла та її температури на вході та виході з котла відповідно термометрами Т1 та Т2.

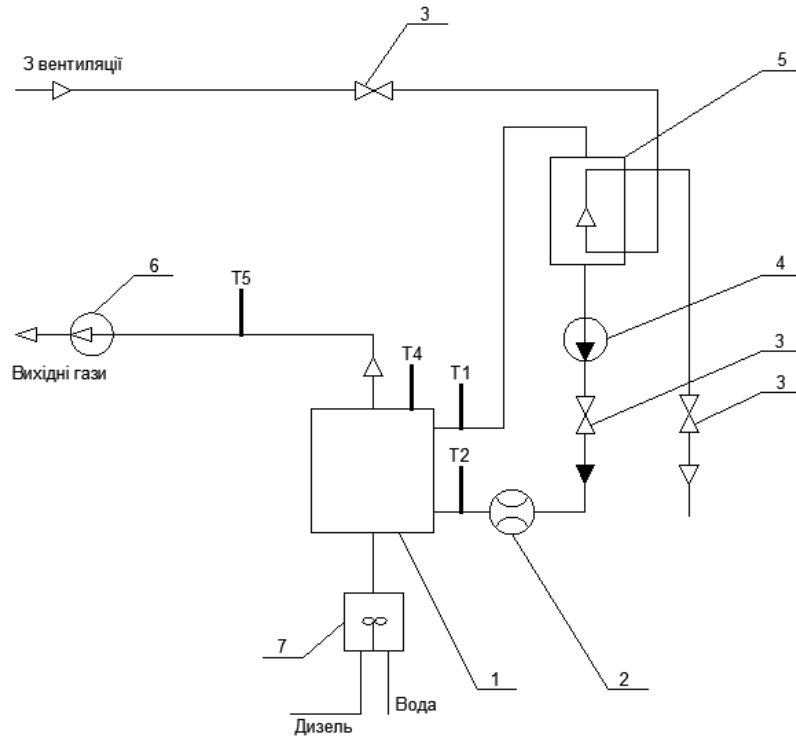


Рисунок 1 - Схеми підключення котла для теплотехнічного випробування  
 1 — котел; 2— засіб вимірювання витрат палива; 3— крани; 4— циркуляційний насос; 5— теплообмінник «повітря-вода»; 6— термометр; 7- кавітатор.

В майбутніх дослідженнях планується проведення аналогічного дослідження для біодизельної емульсії та порівняння отриманої теплопродуктивності котла з урахуванням економічних чинників та затрат на підготовку палива.

#### Перелік посилань:

1. G. Chen and D. Tao, "An experimental study of stability of oil-water emulsion," Fuel Processing Technology, vol. 86, no. 5, pp. 499–508, 2005.
2. Ballester J, Dopazo C, Vidal P, Ojeda L. Large-scale laboratory experiments on pollutant emissions in heavy oil combustion, vol. 2. Gordon and Breach; 1995.
3. Wang, Z.; Cao, J.; Yuan, B.; Wang, Y.; Cheng, X. Effect of ambient temperature on the evaporation characteristics of water-in-oil emulsified diesel droplets. K. Cheng Je Wu Li Hsueh Pao/J. Eng. Thermophys. 2022, 43, 2256–2266.
4. Y.M. Oo, A. Legwiriyaikul, J. Thawornprasert, K. Somnuk, "Production of diesel–biodiesel–water fuel nanoemulsions using three-dimensional printed rotor–stator hydrodynamic cavitation". Fuel, 317 (2022), Article 123445
5. ДСТУ 3948-2000, Котли опалювальні водогрійні теплопродуктивністю до 100 кВт. Методи випробування і контролю теплотехнічних показників.
6. Федоткин И. М., Немчин А. Ф. Використання кавітації в технологічних процесах / И. М. Федоткин, А. Ф. Немчин. – К., Вища школа, 1984. – 68 с.

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Камишний Б.М.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Боженко М.Ф.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ДИМОВИХ ГАЗІВ КОТЕЛЕНЬ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Дієвим способом підвищення ефективності котелень, які є одним з джерел теплопостачання, є зменшення температури відхідних димових газів за паровими та водогрійними котлами при роботі на природному газі, шляхом встановлення за ними утилізаторів теплоти, що дозволить збільшити ККД, а також корисно використати утилізовану теплоту для нагрівання води різного призначення.

Утилізатори теплоти можуть бути поверхневими та контактними і експлуатуватися в так званих «сухому» або «мокрому» режимах.

При глибокому охолодженні димових газів («мокрый» режим) важливим фактором експлуатації теплоутилізаційних установок є виключення конденсації водяних парів в газовому тракті і димовій трубі. Основні способи уникнення конденсатоутворення розглянуті в роботі [1].

**Аналіз останніх досліджень.** В попередніх розрахункових дослідженнях, наприклад, роботи [2,3], отримані окремі залежності коефіцієнта байпасування (для «мокрого» режиму) і питомих потоків або кількості відведеної теплоти від температури охолоджених димових газів при використанні поверхневих калориферів.

**Формулювання мети.** Метою даної роботи є отримання узагальнених залежностей для розрахунку коефіцієнта байпасування та питомої кількості утилізованої теплоти залежно від температур газів. Це дозволить визначати максимально можливу теплопродуктивність утилізаторів або регулювати її залежно від потреб споживачів теплоти.

**Основна частина.** Питому кількість відведеної в утилізаторі теплоти, кДж/кг, розраховували за рівнянням теплового балансу для будь-якого режиму його роботи

$$q_{к.г} = (1 - \theta_r) (h'_r - h''_r), \quad (1)$$

де  $\theta_r$  - коефіцієнт байпасування;  $h'_r$  та  $h''_r$  - ентальпія димових газів на вході в утилізатор та виході з нього, відповідно, кДж/кг.

Коефіцієнт байпасування підбирали таким, щоби температура димових газів (або їх суміші) перед димососом приблизно на 5 °С перевищувала температуру точки роси  $t_p$  вхідних газів.

В результаті вирішення рівняння теплового балансу суміші отримали вираз для коефіцієнта байпасування димових газів поза утилізатором

$$\theta_r = (t_r^{cm} - t''_r) / (t'_r - t''_r), \quad (2)$$

де  $t'_r$  та  $t''_r$  - температура димових газів на виході з котла – вході в теплоутилізатор і на виході з теплоутилізатора, відповідно, °С.

Для визначення ентальпії димових газів використовували залежність [4]

$$h_{ri} = t_{ri} + (2500 + 1,97t_{ri})d_{ri}, \quad (3)$$

де  $d_{ri}$  - вологовміст димових газів, кг/кг с.г.

Для сухого режиму роботи утилізаторів брали температуру димових газів на виході  $t''_r = 60$  °С, коефіцієнт байпасування  $\theta_r = 1$ , і для питомої кількості відведеної від димових



газів теплоти, кДж/кг, отримали залежність

$$q_{к.г} = \frac{q'_{к.г}}{(1-d'_г)^{1,4}}, \quad (4)$$

де  $q'_{к.г}$  - умовна кількість відведеної від димових газів теплоти (визначається за залежністю (5), що отримана в результаті апроксимації розрахункових даних);  $d'_г$  - вологовмість димових газів, кг/кг с.г (однакова величина на вході і виході утилізатора).

$$q'_{к.г} = 1,0331t'_г - 61,986. \quad (5)$$

При глибокому охолодженні димових газів при зволоженні та без зволоження дуттьового повітря були отримані розрахункові залежності умовного коефіцієнта байпасування  $\theta'_г$  та умовної кількості відведеної теплоти  $q'_{к.г}$  від кінцевої температури димових газів  $t''_г$  (рис. 1)

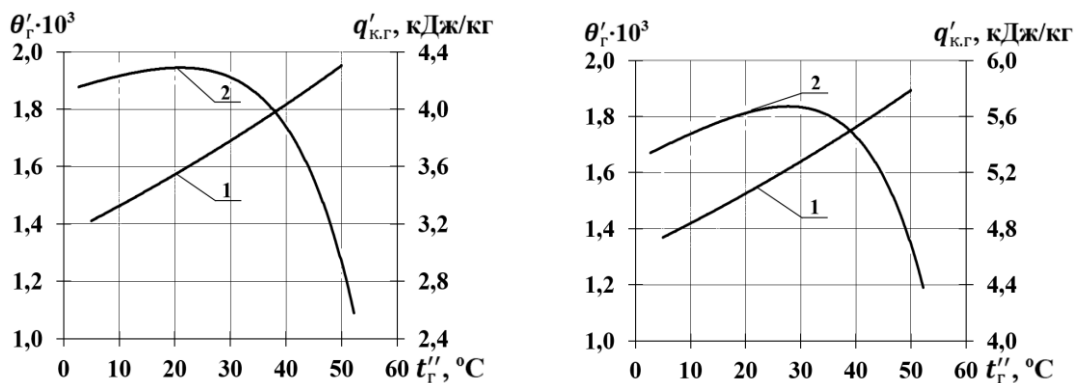


Рисунок 1 – Залежності  $\theta'_г$  (1) і  $q'_{к.г}$  (2) від  $t''_г$  при глибокому охолодженні димових газів:

а) без зволоження дуттьового повітря; б) зі зволоженням дуттьового повітря

У подальшому розрахунки дійсних величин  $\theta_г$  та  $q_{к.г}$  здійснюються за залежностями (6), (7), відповідно, при заданій температурі димових газів на виході з котла - вході в теплоутилізатор  $t'_г$

$$\theta_г = 1 - \theta'_г / (t'_г + 273); \quad (6)$$

$$q_{к.г} = q'_{к.г} (t'_г)^{0,85}. \quad (7)$$

**Висновки.** Отримані узагальнені залежності для розрахунку коефіцієнта байпасування та питомої кількості утилізованої теплоти залежно від температур газів на виході з утилізаторів при глибокому їх охолодженні зі зволоженням дуттьового повітря та без зволоження, а також питомої кількості відведеної від димових газів теплоти в «сухому» режимі.

#### Перелік посилань:

1. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Пресіч Г. О. Дослідження режимів роботи димових труб котельень за умов глибокого охолодження димових газів *Промислова теплотехніка*. Т. 25. № 4. 2003. С. 27–31.
2. Боженко М. Ф., Перевьорткіна І. Я. Каскадна утилізація теплоти димових газів опалювальних водогрійних котельень. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 1 (43). 2016. С. 81 – 88.
3. Боженко М. Ф., Озеруга О. В. Підвищення енергетичної та екологічної ефективності поверхневих теплоутилізаторів димових газів водогрійних котельень. *KPI Science News*. № 1. 2020. С. 7 - 14. DOI: 10.20535/kpi-sn.2020.1.197948.
4. Боженко М. Ф., Сало В. П. Енергозбереження в тепlopостачанні : навч. посіб. К. : НТУУ «КПІ». 2008. 268 с.

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Скрипник П.В.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Серета В.В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=-a6E3eMAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРЯМОГО ЗАХОПЛЕННЯ ПОВІТРЯ В КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ УКРАЇНИ.

**Постановка проблеми та її актуальність.** Уловлення вуглекислого газу є критично важливим для зменшення ефекту парникового газу та збереження стійкості клімату, враховуючи загрозу глобальних змін, викликаних зростаючою концентрацією вуглекислого газу в атмосфері. Крім того, тривала війна в Україні спричинила надзвичайне погіршення екологічної ситуації через величезні обсяги викидів CO<sub>2</sub> у повітря. Згідно з офіційними даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України [1], напад Росії на Україну призвів до викиду щонайменше 33 мільйонів тонн CO<sub>2</sub>, що поглиблює вже наявний негативний вплив на кліматичну систему планети. Тому назвичайно важливо, провести техніко-економічний аналіз direct air capture DAC в кліматичних умовах України оскільки це є важливим кроком для оцінки потенціалу, оптимізації впровадження та стратегічного планування розвитку цих технологій як частини національних зусиль у боротьбі зі зміною клімату.

**Аналіз останніх досліджень.** На сьогодні у світі функціонує 19 установок DAC, які разом уловлюють 0,01 Мтонн CO<sub>2</sub>/year [2]. Аналіз останніх досліджень показав, що більшість наукових праць зосереджені на експериментальних дослідженнях фізичних та хімічних властивостей сорбентів [3-4] та визначенні Key Performance Indicators [5]. Однак, мало уваги приділяється аналізу енергетичних показників системи DAC залежно від зміни її термодинамічних параметрів. Крім того, бракує належного обґрунтування вибору робочих сорбентів та відсутні дослідження установок DAC в кліматичних умовах України.

**Формулювання мети.** Для проведення техніко-економічного аналізу та встановлення оптимальних умов роботи DAC для кліматичних умов України необхідно розробити модель твердого DAC.

**Основна частина.** Поглинальна здатність для MOF-177 визначається за моделлю Дубніна-Астахова (1) :

$$q = q_m \cdot e^{-\left[\frac{RT}{\alpha + \beta T} \ln\left(\frac{P_0}{P}\right)\right]^n}, \quad (1)$$

де  $q_m$  (ммоль · г<sup>-1</sup>) – гранична адсорбована кількість газу;

$R$  (Дж · моль<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>) – універсальна газова стала;

$\alpha$  (Дж · моль<sup>-1</sup>) і  $\beta$  (Дж · моль<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>) – ентальпійний та інтропійний коефіцієнти;

$P_0$  (Па) – тиск газу при температурі навколишнього середовища, а  $n$  – це константа.

Поглинональна здатність для Zeolite13X визначається за моделлю Тота (2):

$$q = \frac{a \cdot P}{[1 + (b \cdot P)^t]^{1/t}}, \quad (2)$$

де  $q$  (моль · кг<sup>-1</sup>) – поглинональна здатність Zeolite13x;

$P$  (кПа) – парціальний тиск CO<sub>2</sub>;

$E$  (К) – міра теплоти адсорбції;

$b$  – константа рівноваги;

$a$  – параметр, пов'язаний з  $b$  та ємністю насичення;

$t$  – показник ізотерми Тота;

Параметри  $a$ ,  $b$ ,  $t$  визначають за рівняннями (3) – (5):

$$b = b_0 e^{(E/T)}, \quad (3)$$

$$a = a_0 e^{(E/T)}, \quad (4)$$

$$t = t_0 + c/T. \quad (5)$$

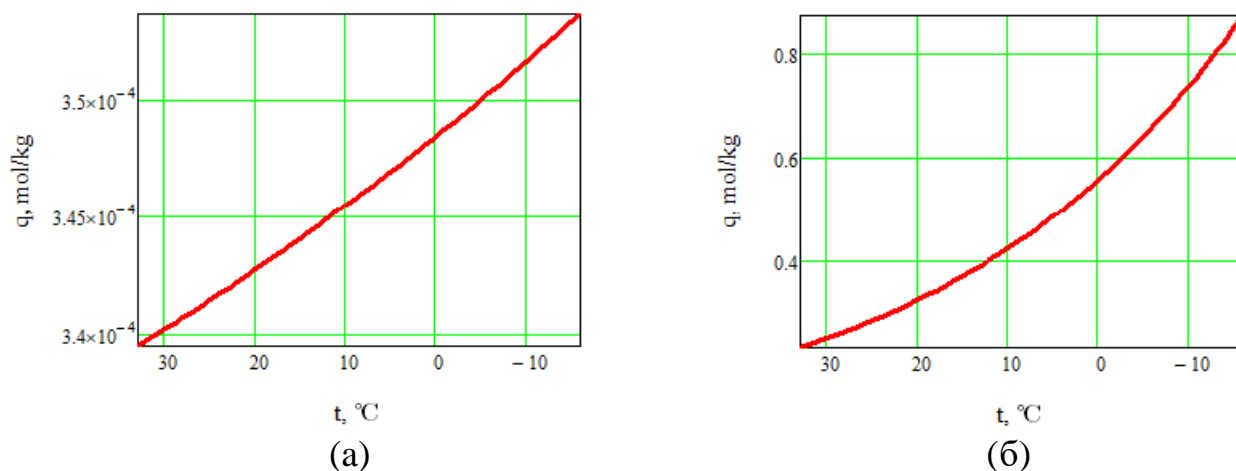


Рисунок 1 – Графік поглинальної здатності сорбентів в залежності зміни температури протягом року:  
а – MOF-177, б – Zeolite13X.

Для визначення залежності поглинальної здатності сорбентів від температури зовнішнього повітря, скористуємося кліматичними даними IWEC для міста Київ (І кліматична зона) [6]. Варто зауважити, що основна частина України відноситься до першої температурної зони. Міжнародні кліматичні файли погоди для міста Києва майже не відрізняються за середньомісячними значеннями зовнішньої температури від нормативної кліматології України.

З рисунка 1 видно, що поглинальна здатність MOF-177 у 1000 разів менша ніж Zeolite13X. Таким чином, за однакового об'єму цих сорбентів у контактаторі, MOF-177 уловить набагато менше  $\text{CO}_2$  з повітря ніж Zeolite13X.

Поглинональна здатність суттєво залежить від  $t$ . Протягом року поглинальна здатність Zeolite13X змінюється від 0,25 моль/кг до 0,85 моль/кг (на 70,6%), а MOF-177 від  $3,3 \cdot 10^{-4}$  моль/кг до  $3,5 \cdot 10^{-4}$  моль/кг (на 5,7%). Рис. 3 показує, що у разі збільшення  $t$ , поглинальна здатність сорбентів знижується. З огляду на це, для холодного періоду року потрібна менша кількість сорбентів, щоб уловити однакову кількість  $\text{CO}_2$  порівняно з теплим періодом.

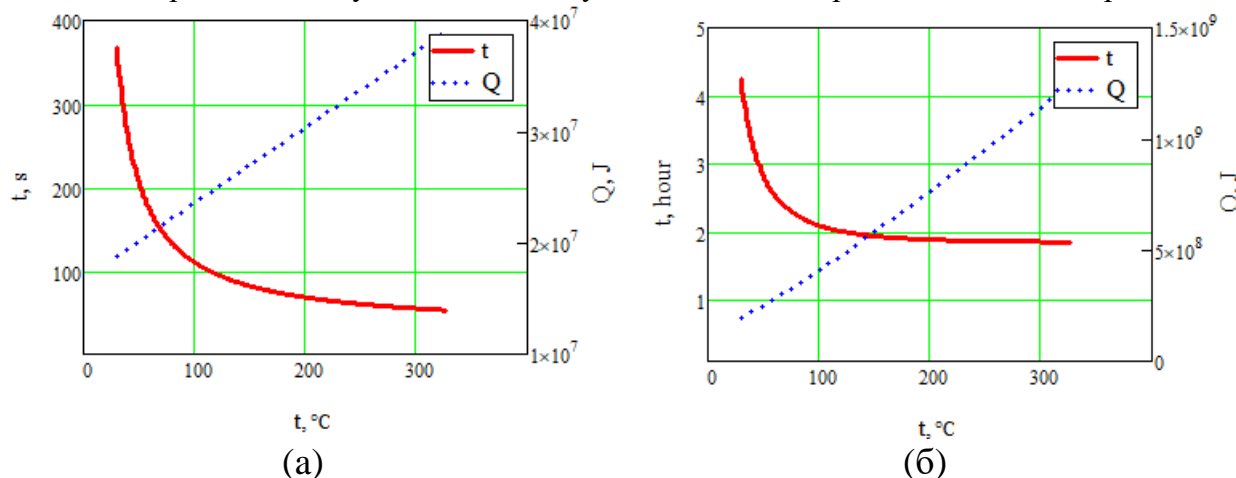


Рисунок 2 – Залежність часу десорбції сорбентів від температури:  
а – MOF-177, б – Zeolite13X.

З рис. 2 видно, що час десорбції обох сорбентів зменшується зі збільшенням температури нагрівання. Чим вища температура сорбентів, тим швидше відокремлюються молекули CO<sub>2</sub>. При цьому збільшується кількість тепла, яке необхідно підвести до повітряного контактора для нагрівання сорбентів. Існує оптимальне значення температури десорбції, після якого подальша подача тепла втрачає сенс, оскільки час десорбції не зменшується.

Слід зазначити, що для вивільнення CO<sub>2</sub> з MOF-177 потрібно на 17,4% менше теплової енергії порівняно з Zeolite13X. Це пояснюється тим, що адсорбційна здатність MOF-177 нижча, ніж у Zeolite13X (рис. 1). Таким чином, MOF-177 захоплює менше CO<sub>2</sub> за цикл і потребує менших витрат енергії для видалення CO<sub>2</sub> під час десорбції.

На рис. 2 показано, що при температурі 100 °C час десорбції становить 2 години для Zeolite13X і 110 секунд (0,03 години) для MOF-177. Це пояснюється тим, що за один цикл роботи з MOF-177 потрібно видалити набагато менше CO<sub>2</sub>, ніж з Zeolite13X.

**Висновки.** Встановлено, що температура навколишнього повітря суттєво впливає на адсорбційну здатність твердих сорбентів. При низьких температурах адсорбційна здатність зростає. Це сприяє оптимальному функціонуванню системи ДАС в кліматичних умовах України (м. Київ, I кліматична зона). На оптимальну продуктивність системи ДАС найбільше впливають адсорбційна ємність сорбенту, масова витрата повітря та температура десорбції. Масова витрата повітря 1,5 м<sup>3</sup>/с і температура десорбції 100 °C забезпечують ефективне видалення CO<sub>2</sub> з повітря.

#### **Перелік посилань:**

1. Facebook. URL: <https://www.facebook.com/EnvironmentalofUkraine/posts/pfbid0rAYzbUN5LhXXJe9aHC8W7xwgvp1LiqCrRMtYUPoHcYAm71Dk1cVLq3hh2KDCfJCv1>. (дата звернення 10.03.2024)

2. Current status and pillars of direct air capture technologies / M. Ozkan et al. *iScience*. 2022. Vol. 25, no. 4. P. 103990. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103990> (дата звернення 10.03.2024).

3. Torrez-Herrera J. J., Korili S. A., Gil A. Development of ceramic-MOF filters from aluminum saline slags for capturing CO<sub>2</sub>. *Powder Technology*. 2023. P. 118962. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118962> (дата звернення 10.03.2024).

4. Chauhan P. R., Kaushik S. C., Tyagi S. K. A review on thermal performance enhancement of green cooling system using different adsorbent/refrigerant pairs. *Energy Conversion and Management: X*. 2022. P. 100225. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100225> (дата звернення 10.03.2024).

5. . Hoseinpoori, S.. Steady-state modeling of co-adsorption phenomena in direct air carbon-capture system using the IAST. *Politecnico Di Milano*. (2020) URL: [https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/169486/3/Thesis\\_SHP\\_POLIMI.pdf](https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/169486/3/Thesis_SHP_POLIMI.pdf) (дата звернення 10.03.2024).

6. EnergyPlus URL: [https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/UKR](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR)(дата звернення 10.03.2024).

<sup>1</sup> Магістрант 2 курсу Сліжевський К.Д.

<sup>1</sup> Проф., д.т.н. Безродний М.К.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=MXjA5VYAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ГЛИБИНИ СВЕРДЛОВИН В ГРУНТОВОМУ АКУМУЛЯТОРІ ТЕПЛОТИ СОНЯЧНОЇ ІНСОЛЯЦІЇ ДЛЯ ТЕПЛОНАСОСНОЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ

**Постановка проблеми та її актуальність.** На території України все більше приділяється увага наявності екологічно чистого джерела енергії – сонячній інсоляції, яка є широко доступною і відповідає найвищим стандартам екології. Використання теплоти сонячного випромінювання можливе через безпосереднє вилучення з верхніх шарів ґрунту або за допомогою спеціальних пристроїв – сонячних колекторів (СК), які зазвичай мають плоску форму [1-3]. Аналіз показав, що безпосереднє використання сонячної інсоляції взимку для теплонасосних систем опалення в кліматичних умовах України є малоперспективним із-за низької інтенсивності сонячного випромінювання в зимові місяці. Тому зростає інтерес до використання в системах опалення літньої сонячної інсоляції шляхом її попередньої акумуляції в ґрунті. Принципова схема такої системи опалення представлена на рисунку 1. Акумуляція теплоти влітку і вилучення її з ґрунту взимку для системи опалення може відбуватися за допомогою вертикальних ґрунтових теплообмінників (ВГТО). Умови роботи ВГТО при вилученні акумульованої теплоти суттєво відрізняються від умов роботи їх при вилученні природної теплоти з ґрунту. Тому виникає питання визначення розмірів ВГТО, безпосередньо пов'язаних з загальною (сумарною) глибиною свердловин для таких теплообмінників.

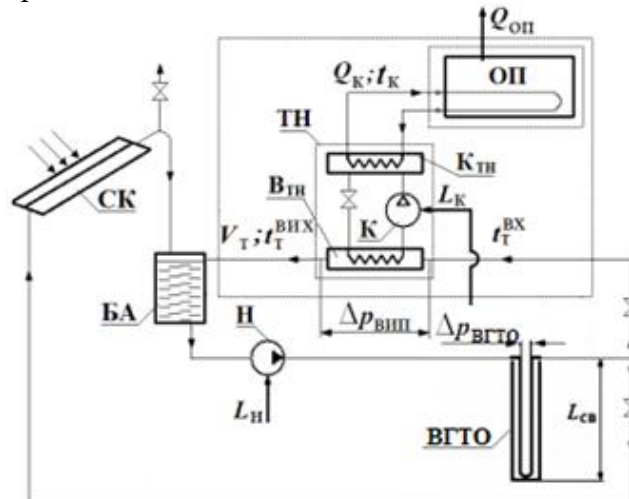


Рисунок 1 - Принципова схема теплонасосної системи низькотемпературного водяного опалення з використанням акумульованої сонячної енергії в ґрунті за допомогою вертикальних ґрунтових теплообмінників.

### Аналіз останніх досліджень.

У літературних джерелах бракує достатньої інформації щодо оптимальних умов роботи ВГТО в складі теплонасосних систем опалення з використанням акумульованої в ґрунті теплоти сонячного випромінювання.

**Формулювання мети.** Визначення загальної глибини свердловин для вертикальних

грунтових теплообмінників в мовах вилучення акумульованої в ґрунті теплоти для теплонасосної системи опалення.

**Основна частина.** В основу визначення загальної глибини свердловин були покладені експериментальні результати щодо умов роботи ґрунтових акумуляторів теплоти сонячного випромінювання, отримані в роботі [4]. Загальна глибина свердловин для ВГТО може бути визначена з теплового балансу вилучення теплоти з ґрунту і передачі цієї теплоти в систему опалення

$$Q_{\text{ВГТО}_1} = Q_{\text{ВГТО}_2} \quad (1)$$

З одного боку кількість теплоти, яку сприймає ВГТО від ґрунту

$$Q_{\text{ВГТО}_1} = q_{\Gamma} \cdot L_{\text{заг}} \quad (2)$$

де  $q_{\Gamma}$  - питомий тепловий потік, віднесений до 1 м глибини свердловини, Вт/м;  $L_{\text{заг}}$  - загальна глибина свердловин для забезпечення теплових втрат об'єкта опалення.

З іншого боку кількість теплоти, яка віддається в нижньому контурі теплового насоса

$$Q_{\text{ВГТО}_2} = Q_o^p \cdot f(t_{0})_{\text{ср.м}} \cdot (1 - l_{\text{оп}})_{\text{ср.м}} \quad (3)$$

де  $Q_o^p$  - теплові втрати об'єкта опалення при розрахунковій температурі атмосферного повітря;  $f(t_{0})_{\text{ср.м}} = \frac{t_{\text{пр}} - t_{\text{ср.м.і}}}{t_{\text{пр}} - t_o^p}$  - температурний коефіцієнт для кожного місяця опалювального періоду,  $l_{\text{оп}}$  - середньомісячні питомі затрати зовнішньої енергії (на привід компресора ТН і насоса нижнього контуру).

Із вищенаведених рівнянь можна отримати величину, яка характеризує відносну загальну глибину свердловин на 1 кВт теплових втрат об'єкта опалення при розрахунковій температурі зовнішнього атмосферного повітря, м/кВт

$$\frac{L_{\text{заг}}}{Q_o^p} = \frac{(1 - l_{\text{оп}})_{\text{ср.м}} \cdot f(t_{0})_{\text{ср.м}}}{q_{\Gamma, \text{ср.м}}} \quad (4)$$

Таким чином, для отримання величини  $L_{\text{заг}} / Q_o^p$ , яка забезпечує компенсацію теплових втрат будівлі в кожному місяці опалювального періоду, необхідно знати відповідні середньомісячні значення трьох величин  $f(t_{0})_{\text{ср.м}}$ ,  $l_{\text{оп, ср.м}}$  і  $q_{\Gamma, \text{ср.м}}$ . В таблиці 1 наведено розрахункові значення цих величин при середньомісячній температурі атмосферного повітря  $t_{\text{ср.м}}$  в кожному місяці опалювального періоду. При цьому значення  $l_{\text{оп, ср.м}}$  були отримані в результаті термодинамічного аналізу низькотемпературної теплонасосної системи опалення з розрахунковою температурою теплоносія в системі опалення  $t_{\Gamma}^p = 50^{\circ}\text{C}$ , а також за умов роботи ґрунтового акумулятора в режимі розрядки по даним роботи [4]. Значення величин  $q_{\Gamma, \text{ср.м}}$  були також отримані на основі даних [5] в перерахунку на теплопровідність піщаних ґрунтів середньої вологості [5] за умови фіксованої в роботі [4] температури теплоносія на вході в ВГТО на рівні  $10^{\circ}\text{C}$ . Як видно з таблиці, необхідна загальна глибина свердловин сильно зростає під кінець опалювального сезону, що відбувається внаслідок високої температури теплоносія на вході в теплообмінник. Для більш глибокого вилучення теплоти з ґрунтового акумулятора температуру теплоносія на вході в ВГТО необхідно знижувати до значень, які мають місце в теплонасосних системах опалення з використанням природної теплоти ґрунту (близько  $3^{\circ}\text{C}$ ). В цьому випадку необхідна загальна глибина свердловин може відповідати значенням в найбільш холодний місяць опалювального сезону (близько 9 м/кВт).

Таблиця 1 - Середньомісячні показники системи опалення впродовж опалювального періоду

місяць	X	XI	XII	I	II	III
$t_{\text{ср.м}}, ^\circ\text{C}$	9,0	1,9	-3,0	-5,6	-4,3	0,7
$f(t_0)_{\text{ср.м}}$	0,262	0,431	0,547	0,61	0,578	0,46
$l_{\text{оп.ср.м}}$	0,148	0,18	0,2	0,21	0,2	0,19
$q_{\text{Г.ср.м}}, \text{Вт/м}$	164	103	73,7	53,6	35,6	28,3
$L_{\text{заг}} / Q_{\text{о}}^{\text{р}}, \text{м/кВт}$	1,36	3,42	6,0	9,0	12,97	13,17

**Висновки.** Наведено методику визначення загальної глибини свердловин в ґрунтовому акумуляторі теплоти сонячної інсоляції для низькотемпературної теплонасосної системи опалення. Показано можливість зменшення глибини свердловин за рахунок більш глибокого вилучення теплоти шляхом пониження температури теплоносія на вході в ВГТО.

**Перелік посилань:**

1. Tian Yuan, Mingzhi Yu, Yudong Mao, Ping Cui, Wenke Zhang, Zhaoyi Zhuang Study on long-term operation characteristics of the medium-deep ground source heat pump system with solar heat storage // Applied Thermal Engineering  
Volume 241, 15 March 2024, 122345. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122345>
2. E. Penrod, K. Prasanna Design of a flat-plate collector for a solar earth heat pump // Solar Energy Volume 6, Issue 1, January–March 1962, Pages 9-22. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(62\)90093-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(62)90093-2)
3. Беляєва Т.Г. Теплообмін в системі “U-подібний теплообмінник - ґрунт” в процесах акумулявання та вилучення теплоти / Т. Г. Беляєва // Пром. теплотехніка. – 2013. – № 1. – С. 72–79.
4. Безродний М.К., Притула Н.О., Гобова М.О. Оптимальні умови роботи теплонасосних систем опалення з використанням акумуляованої теплоти ґрунту. - Енерготехнології та ресурсозбереження, 2017, №1, с.19-26.
5. Безродний М.К. Теплові насоси та їх використання [Текст]: навч. посіб. / М.К. Безродний, І.І. Пуховий, Д.С. Кутра.–К.: НТУУ «КПІ», 2013.–312 с.

<sup>1</sup> Магістрант 2 курсу Сліжевський К.Д.; <sup>1</sup> Бакалаврант 4 курсу Матусевич Х.Б.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Припула Н.О.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=VaBr8T0AAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ВИЗНАЧЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ПЛОЩІ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ ДЛЯ ТЕПЛОНОСАСНОЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ АКУМУЛЬОВАНОЇ СОНЯЧНОЇ ІНСОЛЯЦІЇ В ҐРУНТІ

**Постановка проблеми та її актуальність.** З метою зменшення залежності України від імпортованих енергоносіїв потрібно впроваджувати енергоефективні технології та забезпечити ширше застосування відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива. Відновлювані джерела енергії, такі як сонячна інсоляція та геотермальна енергія, викликають дедалі більший інтерес для забезпечення цілей теплопостачання. Комбінована теплонасосна система (ТНС) є енергоефективним і екологічно чистим способом використання, який може замінити традиційне органічне паливо при енергопостачанні будівлі. Водночас необхідно врахувати відмінність кліматичних умов, сонячної інсоляції та теплових властивостей ґрунту для різних регіонів, які впливають на режими роботи та енергоефективність ТНС теплопостачання [1, 2].

**Аналіз останніх досліджень.** Аналіз безпосереднього використання сонячної енергії в ТНС опалення як нижнього джерела теплоти було здійснено в роботі [3]. Визначено, що ефективне використання сонячної енергії в ТНС опалення в порівнянні з використанням природної теплоти ґрунту може бути тільки в денний час. На рисунку 1 представлені дані порівняння з використанням теплоти ґрунту без акумулювання за допомогою вертикального ґрунтового теплообмінника (ВГТО).

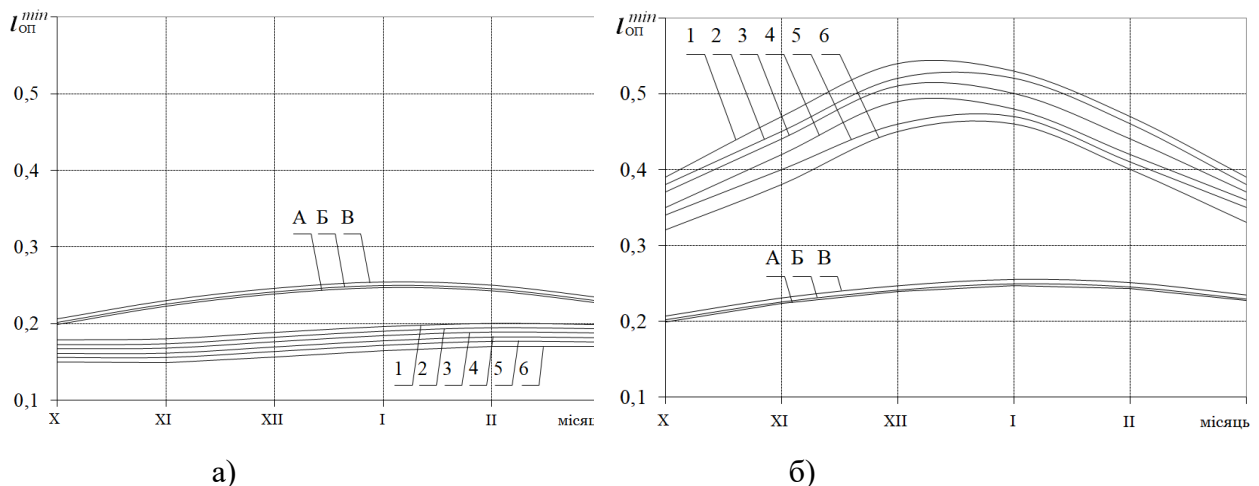


Рисунок 1 – Залежності середньомісячних в денний час (а) та середньодобових (б) мінімальних питомих затрат зовнішньої енергії на ТНС опалення від місяця роботи: А, Б, В – вертикальний ґрунтовий теплообмінник глибина якого дорівнює  $L_{св} = 20; 50; 100$  м (при  $t_t^p = 50$  °С). 1 – 6 – плоский сонячний колектор температура теплоносія на виході з якого  $t_{ск}^{вих} = 10; 11; 12; 13; 14; 15$  °С.

З рисунка 1а встановлено, що питома затрата зовнішньої роботи на отримання одиниці теплоти для забезпечення опалення в денний час, завжди менше відповідної роботи



в ТНС з використанням теплоти ґрунту. Однак слід відмітити, якщо система опалення не має альтернативного джерела для забезпечення роботи в нічний час, то тоді для цілодобової роботи системи з тією ж тепловою потужністю необхідно збільшити затрати зовнішньої енергії для накопичення теплоти в баку-акумуляторі для роботи в нічний час, а питому затрату зовнішньої роботи перерахувати за формулою, що дозволить отримати середньодобові мінімальні питомі затрати зовнішньої енергії на ТНС опалення від місяця роботи на рисунку 1б:

$$l_p = l_{\text{оп}}^{\text{мін}} \cdot \frac{24}{n(\tau_{\text{інсол}})}, \quad (1)$$

де  $l_{\text{оп}}^{\text{мін}}$  – мінімальні питомі затрати зовнішньої енергії на ТНС опалення;

$n(\tau_{\text{інсол}})$  – кількість годин сонячної інсоляції від місяця.

З рисунку 1б встановлено, що питома затрата зовнішньої роботи стає більшою, ніж у випадку використання в ТНС опалення природної теплоти ґрунту, а це у свою чергу свідчить про неефективність роботи такої системи з використанням тільки сонячної енергії. На основі цього можна зробити висновок, що сонячна енергія може бути ефективно використана в ТНС опалення в зимовий період за рахунок її накопичення у літній період у ґрунтових акумуляторах теплоти.

**Формулювання мети.** Метою є визначення площі плоских сонячних колекторів для подальшого визначення їх кількості, які будуть забезпечувати достатнє накопичення сонячної енергії в літній період в ґрунті з подальшим використанням в опалювальний період в ТНС опалення.

#### Основна частина.

Для визначення загальної площі плоских сонячних колекторів використаємо рівняння теплового балансу

$$Q_{\tau}^3 = Q_{\tau}^p, \quad (2)$$

де  $Q_{\tau}^3, Q_{\tau}^p$  – кількість теплоти в процесі зарядки (в літній період), та в процесі розрядки (в зимній період) відповідно.

Тепловий потік зарядки ґрунтового акумулятора, кВт

$$Q_{\tau}^3 = (q_{\text{пад}} \cdot \eta_{\text{ск}})_{\text{с.р}} \cdot 3600 \cdot n_{\text{с.р}} \cdot 180 \cdot F_{\text{СК}} \quad (3)$$

де  $(q_{\text{пад}} \cdot \eta_{\text{ск}})_{\text{с.р}}$  – середнє розрахункове значення добутку інтенсивності падаючої радіації на коефіцієнт корисної дії сонячного колектору;  $n_{\text{с.р}}$  – середня розрахункова кількість годин сонячної інсоляції від місяця;  $F_{\text{СК}}$  – площа плоского сонячного колектора.

З іншого боку тепловий потік розрядки, кВт

$$Q_{\tau}^p = Q_0^p \cdot f(t_0)_{\text{ср.м}} \cdot (1 - l_{\text{с.р}}^{\text{оп}}) \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 180, \quad (4)$$

де  $Q_0^p$  – теплові втрати будинком для якого здійснюється опалення при розрахунковій

температурі атмосферного повітря;  $f(t_0)_{\text{ср.м}} = \frac{t_{\text{пр}} - t_{\text{ср.м.і}}}{t_{\text{пр}} - t_0^p}$  – температурний коефіцієнт для

кожного місяця опалювального періоду,  $l_{\text{с.р}}^{\text{оп}}$  – середньомісячні питомі затрати зовнішньої енергії (на привід компресора ТН і насос).

Площа віднесена до втрат теплоти на опалення, м<sup>2</sup>/кВт

$$\frac{F_{\text{СК}}}{Q_0^p \cdot f(t_0)_{\text{ср.м}}} = \frac{(1 - l_{\text{с.р}}^{\text{оп}}) \cdot 24}{(q_{\text{пад}} \cdot \eta_{\text{ск}})_{\text{с.р}} \cdot n_{\text{с.р}}}. \quad (5)$$

Для визначення величини  $\frac{F_{\text{СК}}}{Q_0^p \cdot f(t_0)_{\text{ср.м}}}$ , яка забезпечує компенсацію теплових втрат

будівлі, необхідно знати відповідні середньомісячні значення величин  $f(t_0)_{\text{ср.м}}$ ,  $l_{\text{с.р}}^{\text{оп}}$ ,  $(q_{\text{пад}} \cdot \eta_{\text{ск}})_{\text{с.р}}$ ,  $n_{\text{с.р}}$ . Визначено розрахункові значення цих величин, де

$$f(t_0)_{\text{ср.м}} = \frac{t_{\text{пр}} - t_{\text{ср.м}}}{t_{\text{пр}} - t_o^p} = \frac{20 - (-0,22)}{20 - (-22)} = 0,481 \text{ – температурний коефіцієнт; } (q_{\text{пад}} \cdot \eta_{\text{ск}})_{\text{с.р}} = 234,22$$

Вт/м<sup>2</sup> – середній тепловий потік за опалювальний період;  $n_{\text{с.р}} = 14,2$  год – середня тривалість інсоляції в не опалювальний період;  $l_{\text{с.р}}^{\text{оп}} = 0,189$  – середні мінімальні питомі затрати зовнішньої енергії на ТНС опалення за опалювальний сезон

$$\frac{F_{\text{СК}}}{(Q_0^p \cdot 0,481)} = \frac{(1 - 0,189) \cdot 24}{0,234 \cdot 14,2} = 5,858 \frac{\text{м}^2}{\text{кВт}}. \quad (6)$$

**Висновки.** На основі термодинамічного аналізу ТНС опалення з використанням акумульованої сонячної енергії в ґрунті за допомогою ВГТО визначено співвідношення для отримання площі плоских сонячних колекторів.

#### Перелік посилань:

1. Tian Yuan, Mingzhi Yu, Yudong Mao, Ping Cui, Wenke Zhang, Zhaoyi Zhuang Study on long-term operation characteristics of the medium-deep ground source heat pump system with solar heat storage // Applied Thermal Engineering Volume 241, 15 March 2024, 122345. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122345>

2. E. Penrod, K. Prasanna Design of a flat-plate collector for a solar earth heat pump // Solar Energy Volume 6, Issue 1, January–March 1962, Pages 9-22. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(62\)90093-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(62)90093-2)

3. Безродний М. К., Притула Н.О. Енергоефективність теплонасосних схем опалення, вентиляції і кондиціонування: монографія. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023 – 528 с.

<sup>1</sup> Бакалаврант 4 курсу Мельниченко І.О.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Боженко М.Ф.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЯ БУДІВЕЛЬ - СУЧАСНІ ІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Термомодернізація - це процес покращення енергоефективності будівель шляхом впровадження сучасних технологій і матеріалів для зменшення втрат теплоти та зниження споживання енергії на опалення. Новий стандарт щодо термічного опору теплопередачі огорожень визначає мінімальні вимоги до ізоляції будівельних конструкцій, спрямованих на збереження теплоти всередині приміщень і підвищення енергоефективності. Така модернізація сприяє зменшенню витрат на опалення, підвищенню комфорту проживання та зниженню викидів CO<sub>2</sub>, сприяючи екологічній стійкості.

**Аналіз останніх досліджень.** Для теплоізоляції фасадів будівель, наприклад, можуть використовуватися традиційні матеріали: мінеральна вата, пінополістірол, поліуретан тощо.

До іноваційних матеріалів для утеплення огорожень будівель можна віднести пластмігран, теплольон, фіброліт, а також рідкі утеплювачі – теплофарби.

Пластмігран, наприклад, створений на базі мінеральної вати і полістирольного пілу; теплольон – на базі льняного волокна, а для отримання відповідної форми до волокон льону додають 15 % термоскріплюючого волокна; фіброліт – на базі деревного волокна, рідкого скла і портландцементу.

Серед нових матеріалів може бути використане піноскло. Це скло з пористою комірчастою структурою, має невелику густину та високі теплоізоляційні властивості. Піноскло доступне у вигляді плиток або вузлових блоків, що полегшує його монтаж, воно стійке до вологи та гниття, та має високу вогнестійкість. До недоліків піноскла відноситься його більша вартість у порівнянні з іншими утеплювачами, обмеженість в використанні тощо.

Новим рідким теплоізоляційним матеріалом є теплоізоляційна фарба.

Теплоізоляційна фарба - це спеціалізована фарба, яка виконує теплоізоляційну функцію для приміщення. Технологія використання теплоізоляційної фарби абсолютно аналогічна технології використання звичайної фарби. Теплоізоляційні фарби мають в своєму складі спеціальні теплоізоляційні домішки, що виготовлені з кераміки, силікону чи теплоізоляційних полімерів. Термоізоляційна фарба вискоєфективно термоізолює приміщення, по ефективності теплоізоляції 1 мм теплоізоляційної фарби дорівнює приблизно 5 см пінопласту.

Теплоізоляційна фарба має теплопровідність  $\lambda_{\text{ут}} = 0,002 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , використовується в діапазоні робочих температур від  $-60$  до  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , є негорючим та екологічно безпечним матеріалом.

**Формулювання мети.** Мета цієї роботи полягає в оцінці енергоефективності та економічної доцільності термомодернізації зовнішніх стін житлового будинку за допомогою теплоізоляційної фарби.

**Основна частина.** Розглядається приклад утеплення теплоізоляційною фарбою зовнішніх стін девятиповерхового житлового будинку, що розташований в м. Тернополі. Зовнішні стіни виконані з силікатної цегли на важкому розчині товщиною  $\delta_1 = 395 \text{ мм}$ , термічний опір теплопередачі складає  $R_{\text{н.у}} = 0,609 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ . Загальна висота стін будинку

дорівнює 30 м. В стінах кожного поверху розміщено по 9 вікон на північному та південному фасаді і по 5 – на східному та західному відповідно.

Згідно з нормативними даними [1] мінімальне допустиме значення опору теплопередачі зовнішніх стін будівель для першої температурної зони України, до якої відноситься м. Тернопіль, складає  $R_{q \min} = 4 \text{ (м}^2\cdot\text{К)}/\text{Вт}$ .

Товщину теплоізоляційного матеріалу з теплоізоляційної фарби, мм, визначили з рівняння

$$\delta_{yt} = (R_{q \min} - R_{n,y}) \lambda_{yt} \cdot 10^3. \quad (1)$$

Згідно з наведеними вище даними термічних опорів теплопередачі утеплених та неутеплених стін та теплопровідності, товщина теплоізоляційної фарби для утеплення зовнішніх стін будинку складе  $\delta_{yt} = 7 \text{ мм}$ .

Енергетичну ефективність утеплення визначимо порівнянням втрат потоків теплоти через неутеплені та утеплені стіни кожного з фасадів, кВт, які обчислюються за формулою [2]

$$Q_{ст.i} = (1/R_i) F_i (t_{вн} - t_{р.о}) (1 + \Sigma\beta/100)_i \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

де  $R_i$  – термічні опори теплопередачі огорожень,  $(\text{м}^2\cdot\text{К}) / \text{Вт}$ ;  $F_i$  – площі огорожень,  $\text{м}^2$ ;  $t_{вн}$  і  $t_{р.о}$  – температури внутрішнього повітря опалюваних приміщень і розрахункова зовнішнього повітря на опалення, відповідно,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Sigma\beta$  – додаткові втрати теплоти у відсотках до основних.

В розрахунках брали  $t_{вн} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , а за кліматологічними даними для м. Тернополя визначили  $t_{р.о} = - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  [3]. Площу стін для кожного поверху брали по  $97,95 \text{ м}^2$  (для останнього дев'ятого –  $94,98 \text{ м}^2$ ) для північного та південного фасадів і по  $63,35 \text{ м}^2$  (для останнього дев'ятого –  $61,46 \text{ м}^2$ ) – для західного та східного. Додаткові втрати теплоти брали в розмірі 10 % для стін західного фасаду, для решти – 0 [2].

В результаті розрахунків отримали потоки теплових втрат: для неутеплених стін  $Q_{н,y} = 64,11 \text{ кВт}$ , для утеплених -  $Q_{yt} = 9,77 \text{ кВт}$ .

Річну економію теплоти на опалення будинку при утепленні зовнішніх стін теплоізоляційною фарбою, ГДж/рік, визначали за формулою [4]

$$\Delta Q_{річ} = (Q_{н,y} - Q_{yt}) \frac{t_{вн} - t_{сп.о}}{t_{вн} - t_{р.о}} n_o \cdot 24 \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

де  $t_{сп.о}$  - середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $n_o$  – тривалість опалювального періоду, діб.

**Висновки.** За кліматологічними даними для м. Тернополя визначили  $t_{сп.о} = - 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $n_o = 184$  діб [3], тоді економія теплоти на опалення становитиме  $\Delta Q_{річ} = 436 \text{ ГДж/сезон}$ . З урахуванням вартості одиниці теплоти за даними Тернопільоблкомуненерго  $2146 \text{ грн/ГКал}$  ( $512,17 \text{ грн/ГДж}$ ) економічна ефективність термомодернізації зовнішніх стін одного житлового будинку становитиме  $223300 \text{ грн/сезон}$ .

#### Перелік посилань:

1. ДБН В.2.6-31:2021.Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ. Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 23 с., Чинні з 2022 – 09 – 01.
2. Боженко М.Ф. Системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря будівель [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» / М.Ф.Боженко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 380 с.
3. ДСТУ – Н Б В. 1.1 – 27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. – Чинний від 2011 – 11 – 01. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с.
4. Боженко М.Ф. Енергозбереження в теплопостачанні : навч. посіб./ М.Ф.Боженко, В.П.Сало. - Київ. : НТУУ «КПІ», 2008. – 268 с.

<sup>1</sup> Бакалаврант 4 курсу Мітленко М.В.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Боженко М.Ф.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## СИСТЕМИ ПАНЕЛЬНО-ПРОМЕНЕВОГО ОПАЛЕННЯ В ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКАХ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Відомо, що біля третини паливно-енергетичних ресурсів споживається житлово-комунальним сектором, тому постає гостра проблема у вдосконаленні систем опалення і зменшення використання непоновлюваних видів енергії для їх забезпечення. Одним з найбільш ефективних методів для досягнення цього є використання низькотемпературних систем опалення.

**Аналіз останніх досліджень.** Основною тенденцією розвитку опалювальних систем у світі є зменшення температури теплоносія, що дозволяє використовувати в них такі джерела теплоти як конденсаційні котли, теплові насоси тощо.

**Формулювання мети.** Метою роботи є визначення переваг та недоліків низькотемпературних панельно-променевих систем опалення, а також впровадження їх в індивідуальних житлових будинках

**Основна частина.** Відомо, що системи опалення (СО) призначені для штучного нагріву приміщень в опалювальний період з метою компенсації теплових втрат та підтримання в них нормованої температури. СО поділяються на місцеві та центральні, а серед останніх найпоширенішими на сьогодні є водяні, парові, повітряні, комбіновані та променеві.

Системи променевого опалення забезпечують передачу теплоти від джерела до повітря в приміщенні променевим способом. Радіаційна температура поверхонь вища за температуру внутрішнього повітря приміщення. Це дозволяє забезпечити комфортні умови перебування в приміщенні людей при нижчій (у порівнянні з конвективним способом опалення) температурі повітря в ньому.

Променеві системи опалення за своїм конструктивним виконанням поділяються на панельні, газоповітряні та радіаційні. Радіаційні в свою чергу можуть бути підвісними або настінними. Такі СО можуть бути влаштовані при різних температурах поверхонь випромінювання: низькій (до 70 °С), середній (від 70 до 250 °С) та високій (до 900 °С).

Система панельно-променевого опалення складається з опалювальних панелей з розміщеними в них теплопроводами, в яких циркулює перегріта вода.

За місцем розташування панелі поділяються на стінові, підлогові і стельові. Крім того панелі класифікують за матеріалом: металеві та бетонні.

Розташування панелей визначається технологічними та гігієнічними умовами з урахуванням техніко-економічних показників.

Основними перевагами застосування панельно-променевого опалення є низька температура теплоносія (біля 25 - 45 °С); рівномірний розподіл температури в приміщенні по його висоті; можливість застосування різних покриттів підлог (дерево, камінь або кераміка); можливість використання практично будь-якого джерела енергії; гігієнічність; зниження кількості пилу в повітрі, більш високий тепловий комфорт та забезпечення оптимальної вологості повітря у приміщеннях; економія теплової енергії за рахунок можливості зниження температури внутрішнього повітря; відсутність сильного джерела тепловипромінювання поблизу людини; відсутність опалювальних приладів, що дає можливість більш ефективно використати площу приміщення, тощо.

Для прикладу був проведений розрахунок системи панельно-променевого опалення

в індивідуальному житловому одноповерховому будинку, що розташований у Київській області, загальною площею близько 180 м<sup>2</sup> (опалювальна – 175 м<sup>2</sup>). Зовнішні стіни виконані з газоблоків товщиною 300 мм і утеплені екструдованим пінополістиролом товщиною 150 мм, термічний опір теплопередачі  $r_{ст} = 3,8$  (м<sup>2</sup>·К) / Вт; світлопрозорі конструкції – енергоефективний двокамерний склопакет з наповненням аргоном та напиленням, термічний опір теплопередачі  $r_{вік} = 0,9$  (м<sup>2</sup>·К) / Вт; покрівля, що утеплена мінеральною ватою, має термічний опір теплопередачі  $r_{пер} = 5,4$  (м<sup>2</sup>·К) / Вт; підлога першого поверху – на ґрунті з утеплювачем, термічний опір теплопередачі якої складає  $r_{пл} = 4,3$  (м<sup>2</sup>·К) / Вт.

Втрати потоків теплоти зовнішніми огороженнями будинку, кВт, визначали за формулою [1]

$$Q_{обг.i} = (1/r_i) F_i (t_{вн} - t_{р.о}) (1 + \Sigma\beta/100)_i n_i \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

де  $r_i$  – термічні опори теплопередачі огорожень, (м<sup>2</sup>·К) / Вт;  $F_i$  – площі огорожень, м<sup>2</sup>;  $t_{вн}$  і  $t_{р.о}$  – температури внутрішнього повітря опалюваних приміщень і розрахункова зовнішнього повітря на опалення відповідно, °С;  $\Sigma\beta$  – додаткові втрати теплоти у відсотках до основних;  $n_i$  – поправка на розрахункову різницю температур.

Температуру внутрішнього повітря брали 22 °С для спальних та житлових кімнат, 24 °С – для ванної кімнати і 18 °С – для технічних приміщень. За кліматологічними даними брали  $t_{р.о} = - 22$  °С; коефіцієнт  $\beta = 0$  для всіх фасадів будинку; коефіцієнт  $n = 0,9$  – для перекриття, для решти огорожень  $n = 1$ .

Витрати потоків теплоти на нагрівання інфільтраційного повітря, кВт, визначали за формулою [1]

$$Q_{інфі} = (m/3600) c_p \rho_p F_{п} H_{п} (t_{вн} - t_{р.о}), \quad (2)$$

де  $m$  – кратність повітрообміну, год<sup>-1</sup>;  $c_p$  – питома масова теплоємність повітря, кДж/(кг·К);  $\rho_p$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>,  $F_{п}$  – площа підлоги приміщень житлових кімнат та кухні, м<sup>2</sup>;  $H_{п}$  – висота приміщень.

В розрахунках брали  $m = 0,5$  год<sup>-1</sup>;  $c_p = 1,005$  кДж/(кг·К);  $\rho_p = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>.

Загальні втрати потоків теплоти огороженнями даного індивідуального будинку склали 10 кВт.

Для компенсації втрат теплоти у холодний період року та створення комфортних умов у приміщеннях будинку було обрано систему опалення, яка складається з теплої підлоги та теплої стіни.

Згідно з методикою [1] для кожного приміщення були розраховані контури теплої підлоги та контури теплих стін у приміщеннях, де неможливо покрити всі тепловтрати лише за рахунок підлогового опалення. При розрахунках також враховані втрати потоків теплоти трубопроводами (5 кВт) та тепловтрати від системи опалення в ґрунт (1,4 кВт).

Після проведення розрахунків отримано дванадцять контурів теплої підлоги: по одному на кожне опалюване приміщення та два контури теплої стіни. Крок прокладання поліетиленових труб становить 100 мм.

Результатом розрахунків є визначений температурний графік теплоносія в подавальній і поворотній мережах системи, який становить відповідно 43/37 °С.

**Висновки.** Для індивідуального житлового будинку визначені втрати потоків теплоти зовнішніми огороженнями, для забезпечення комфортних умов у приміщеннях обрані системи панельно-променевого опалення (тепла підлога та тепла стіна) з низькотемпературним теплоносієм.

#### Перелік посилань:

1. Боженко М.Ф. Системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря будівель [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» / М.Ф.Боженко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 380 с.

<sup>1</sup> Бакалаврант 4 курсу Чешко О.О.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Притула Н.О.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=VaBr8T0AAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ШЛЯХИ ПОДОЛАННЯ ТЕХНІЧНИХ БАР'ЄРІВ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕПЛОАСОСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

**Постановка проблеми та її актуальність.** У даний час гостро постає проблема економного та раціонального використання органічного палива. Разом з проблемами енергоекономії важливим є вирішення питання екологічної безпеки [1]. На сьогоднішній день одним з перспективних напрямків у вирішенні даних проблем є впровадження альтернативних джерел енергії в житлово-комунальному секторі. У зв'язку з цим використання низькопотенціальної енергії природного та технологічного походження через впровадження теплових насосів (ТН) є однією з першочергових задач в даній області. Також відомо, що найбільші резерви енергозбереження зосереджені сьогодні у сфері низько та середньотемпературного теплозабезпечення житлового, громадського та промислового будівельних фондів.

**Аналіз останніх досліджень.** Вибір кожної країни щодо використання енергії із відновлюваних та альтернативних джерел залежить від багатьох факторів: внутрішніх потреб, кліматичних умов, економічного рівня [1]. У порівнянні з іншими європейськими країнами, Україна відстає з точки зору енергоефективності через застарілі технології, що використовуються у різних сферах економіки. Перехід до будівництва житла з використанням відновлюваної енергії та технологій з низькими викидами парникових газів для теплопостачання (опалення, вентиляції, гарячого водопостачання) є важливою стратегічною метою для України [2].

**Формулювання мети.** Визначення запобіжних заходів та рекомендацій по усуненню технічних бар'єрів та перешкод для впровадження ТН з використанням різних джерел низькопотенційної теплоти природного та антропогенного походження у систему централізованого теплопостачання (СЦТ) України.

**Основна частина.** Технічні бар'єри для впровадження ТН можна розділити на кілька основних груп, які обумовлені технічними та технологічними особливостями складових систем: безпосередньо ТН, джерела низькопотенційної теплоти (НПТ), теплові та електричні мережі, а також особливості споживання теплової енергії [3].

Обмеження щодо рівня енергоефективності ТН: середньо сезонний коефіцієнт трансформації енергії в ТН не повинен бути менше значень, які наведені в таблиці 1 [4]. При цьому необхідно враховувати споживання електроенергії не тільки безпосередньо ТН, а також допоміжним обладнанням, насамперед циркулюючим (теплоносій – рідина) насосом та нагнітальним (теплоносій – відхідні гази або повітря) вентилятором.

Таблиці 1 – Мінімальні та розрахункові значення середнього за сезон коефіцієнта перетворення теплового насоса

Джерело НПТ / відведення теплової енергії	Опалення і ГВП для нових будинків		Опалення і ГВП для оновлених будинків		Система ГВП	
	Мінімальне	Розрахункове	Мінімальне	Розрахункове	Мінімальне	Розрахункове
Повітря / вода	2,7	3,0	2,5	2,8	2,3	2,8
Ґрунт/вода	3,5	4,0	3,3	3,7	3,0	3,5
Вода/вода	3,8	4,5	3,5	4,2	3,2	3,8

Рівень коефіцієнта трансформації енергії парокompресійного ТН (COP) в значній мірі визначається раціональним поєднанням параметрів джерела НПТ і теплоносія в мережі. Для забезпечення оптимальної роботи ТН протягом всього опалювального сезону необхідно використовувати низькотемпературні системи опалення. Максимальні температури в подавальній та зворотній лініях не повинні перевищувати 70 і 50 °С відповідно.

Перешкодами, обумовленими джерелами НПТ, для впровадження ТН технологій у СЦТ є їх сезонність (зміна температури повітря, води у водоймищах, ґрунту до надмірного охолодження, сонячного опромінення), розсіяна теплота (низька питома енергетична щільність) та віддаленість джерел НПТ від теплових мереж СЦТ.

Один з ключових аспектів, який впливає на вибір системи теплопостачання, може бути розглянутий на основі енергетичного аналізу, що зводиться до зіставлення витрат первинної енергії палива. Визначено енергетичну ефективність теплонасосної системи опалення порівняно з традиційними системами (опалювальної котельні та конденсаційного котла) з точки зору споживання первинної енергії палива. Результати наведені на рис. 1.

Відносний енергетичний ККД визначається як відношення коефіцієнтів використання первинної енергії палива для вказаних систем та записується у вигляді [4]

$$\eta_{\text{ТНУ}}^0 = \frac{\eta_{\text{КЕС}} \eta_{\text{ТН}} \varphi_{\text{Т}}}{\eta_{\text{КУ}} \eta_{\text{ТМ}}}, \quad (1)$$

де  $\eta_{\text{КЕС}}$  – ККД електростанції;

$\eta_{\text{ТН}}$  – коефіцієнт втрат ТН, який враховує відхилення реального циклу від ідеального циклу Карно;

$\varphi_{\text{Т}}$  – теоретичний коефіцієнт трансформації ТН, який визначається зі зворотного циклу Карно;

$\eta_{\text{КУ}}$  – ККД котельної установки;

$\eta_{\text{ТМ}}$  – ККД теплової мережі.

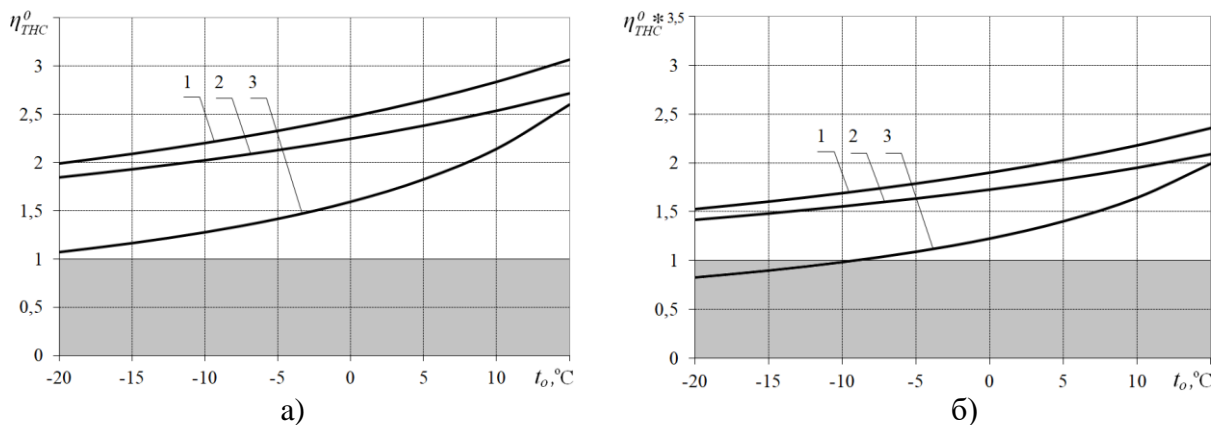


Рисунок 1 – Залежності відносного енергетичного ККД від температури навколишнього середовища при порівнянні ТНУ з використанням теплоти: 1 – атмосферного повітря; 2 – ґрунту; 3 – води; а) з традиційними водогрійними котлами, б) з конденсаційними котлами.

З рис. 1 видно, що при забезпеченні оптимального ступеня охолодження теплоносія (атмосферного повітря, ґрунту та води) у випарнику ТН відносний енергетичний ККД для всіх наведених випадків більший за одиницю ( $\eta_{\text{ТНС}}^0 > 1$ ), крім порівняння конденсаційного котла з ТН системою, яка працює за рахунок використання теплоти атмосферного повітря ( $\eta_{\text{ТНС}}^0 < 1$ ) – неефективна.



В таблиці 2 узагальнено технічні бар'єри впровадження ТН з використанням різних джерел низькопотенційної теплоти природного та антропогенного походження у СЦТ та наведені запобіжні заходи по їх усуненню або зменшенню негативного впливу [3].

Таблиця 2 - Технічні бар'єри та заходи з їх усунення

Технічні бар'єри	Запобіжні заходи
Обмеження щодо рівня енергоефективності теплових насосів	Вибір теплового насоса з високим коефіцієнтом перетворення (COP > 3,5)
Обмеження температури на виході з теплового насоса (65 – 75 °С)	Планування використання низькотемпературного обігріву під час будівництва нових житлових масивів. Приєднання теплових насосів до зворотного трубопроводу системи централізованого теплопостачання
Перешкоди, обумовлені властивостями джерел низькопотенційної теплоти	Вибір відповідного джерела низькопотенційної теплоти. Часткове покриття теплового навантаження іншими теплогенеруючими технологіями (гібридні системи теплопостачання)
Висока вартість під'єднання до електромережі	Часткова державна компенсація витрат на під'єднання теплових насосів до електромереж
Перешкоди, обумовлені розбіжністю добових та сезонних графіків теплових навантажень (споживання) теплової енергії і можливостей теплових насосів	Використанням теплових акумуляторів та резервних теплогенеруючих технологій
Відсутність вітчизняного виробництва ТН	Державне стимулювання виробництва ТН в Україні

**Висновки.** Класифіковано основні групи технічних бар'єрів, які перешкоджають широкому впровадженню ТН в СЦТ. Вказано запобіжні заходи по усуненню або зменшенню їх, які повинні бути враховані ще на етапі проектування об'єктів, а саме вибір ТН з високим коефіцієнтом трансформації теплоти, використання низькотемпературної системи опалення; визначенні можливі заходи щодо зниження енергетичних навантажень традиційними способами: аналіз структури споживання енергії (теплової та електричної) з врахуванням добових та сезонних графіків споживання теплової й електричної енергії (використанням теплових акумуляторів та резервних теплогенеруючих технологій).

**Перелік посилань:**

1. European Commission (2022), REPowerEU Plan. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230&from=EN>
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. Схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text>
3. Безродний М.К., Тесленко О.І., Притула Н.О., Дерій В.О., Сліжевський К.Д. Технічні бар'єри впровадження теплонасосних технологій у системах централізованого теплопостачання // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки – 2023, Тому 34 (73) № 6, с. 175-183
4. Безродний М. К., Притула Н.О. Енергоефективність теплонасосних схем опалення, вентиляції і кондиціонування: монографія. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. – 528 с

СЕКЦІЯ № 6

**Енергетичний  
менеджмент та  
інжиніринг**

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Бабіч Т.М.

<sup>1</sup> Ст.викл., к.т.н. Буяк Н.А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АДМІНІСТРАТИВНО-ЛАБОРАТОРНОГО КОРПУСУ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Проблема підвищення енергоефективності виробничих будівель та використання відновлювальних джерел енергії є дуже актуальною в сучасному світі, оскільки зростаюча залежність від традиційних джерел енергії, таких як нафта, вугілля та природний газ, призводить до загрози для навколишнього середовища та змін клімату. Застосування відновлювальних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, може допомогти зменшити викиди парникових газів, зменшити енергетичну залежність та знизити споживання природних ресурсів

**Аналіз останніх досліджень.** Відновлювані джерела енергії можна розглядати як базові елементи енергоефективності окремих секторів економіки та енергетичної незалежності держави в цілому. Використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна, вітрова, гідроенергетика та інші, сприяє зменшенню залежності від імпорту енергоресурсів, зменшенню екологічного впливу та покращенню стійкості енергетичної системи [1].

**Формулювання мети.** Оптимізація енергоефективності адміністративних будівель за рахунок використання поновлюваних джерел енергії, що включає впровадження рішень для зниження енергоспоживання та просування екологічно безпечних практик у інфраструктурі. Впровадження технології використання поновлюваних джерел енергії, такі як сонячні панелі, геотермальні системи, та має на меті мінімізувати вуглецевий слід та водночас забезпечити надійне й економічне енергопостачання, а також продемонструвати доцільність і переваги переходу до більш стійкої моделі енергопостачання.

**Основна частина.** В якості об'єкта дослідження було обрано адміністративно-побутовий корпус з лабораторією та навісом розташований в селі Мар'янське Апостоліського району Дніпропетровської області в територіальних межах Зеленодольської міської ради на узбережжі балки Тернівка (затока Каховського водосховища).

Адміністративно-побутовий корпус з лабораторією та навісом являє собою двоповерхову будівлю, опалення приміщень та гаряче водопостачання якої забезпечене двома газовими котлоагрегатами, що встановлені в теплогенераторній, а також твердопаливним котлом який працює на брикетах. Рік побудови 2021.

Підвищення енергоефективності може бути досягнуто пасивними методами такими як додаткова теплоізоляція елементів огорожувальних конструкцій будівлі: пінополістирол, базальтова мінеральна вата, целюлозні волокна та інші [2].

Для підвищення енергоефективності в проєкті будівлі була передбачена низка заходів таких як використання для утеплення зовнішньої огорожувальної конструкції утеплювачів на основі мінераловатних плит, використання металопластикових вікон із подвійним склінням.

Розрахований на підставі діючих методик [3] та [4] клас енергоефективності будівлі відповідає рівню С.

Для підвищення енергоефективності будівлі запропоновано використання

фотоелектричних панелей на двоскатному даху адміністративно-побутового корпусу з лабораторією та навісом та сонячних колекторів для гарячого водопостачання.

Моделювання та розрахунок фотоелектричних панелей було виконано за допомогою програмного забезпечення PVsol, використання якого має низку переваг. Це простота застосування, можливість точного моделювання завдяки врахуванню просторової орієнтації, куту нахилу даху, затінення. Тому в результаті використання програмного комплексу може бути отриманий прогнозований вихід енергії та продуктивність сонячних установок. Крім того, програмне забезпечення PVsol включає в себе інструменти для фінансового аналізу, що дозволяють користувачам оцінити період окупності, рентабельність інвестицій і загальну фінансову життєздатність сонячного проекту.

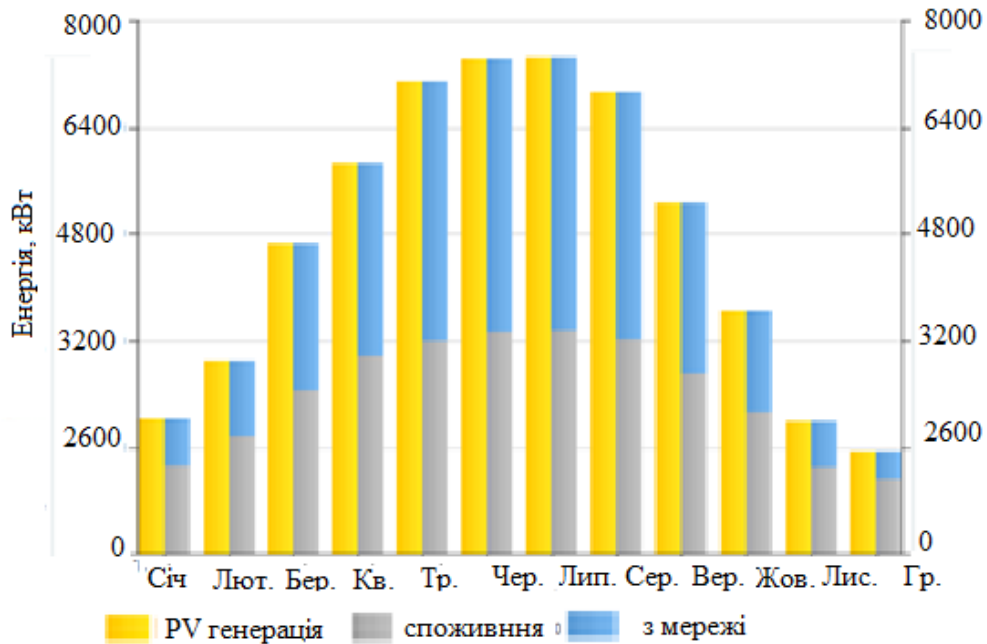


Рисунок 1 – Результати моделювання сонячних панелей.

За результатами моделювання обрані сонячні модулі виробництва JA Solar Holdings Co, Ltd загальною кількістю 77 одиниць. Обрана конфігурація дозволяє генерувати 46,2 кВт\*год електричної енергії (Рис.1). Графік, що відображає достатність електрики, що генерується сонячними панелями відповідно до обсягів, необхідних для нормального функціонування адміністративно-побутового корпусу (Рис.2).

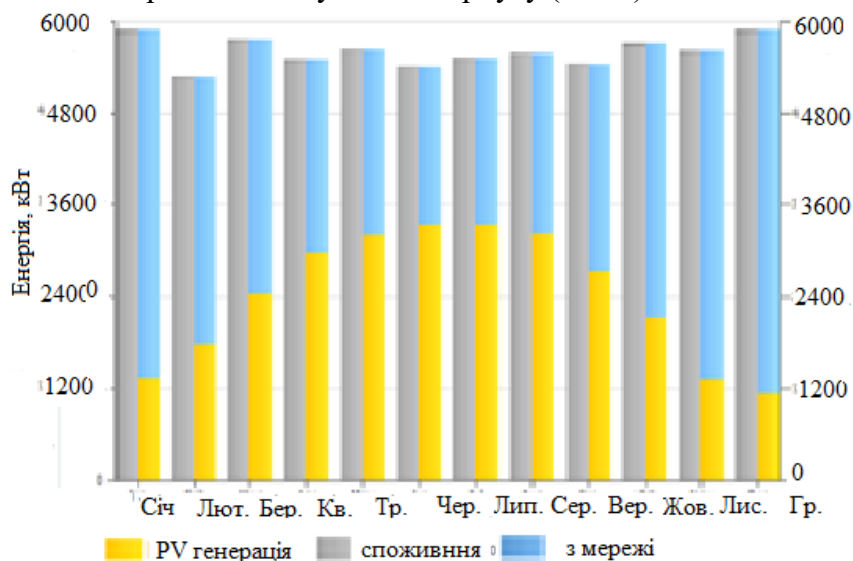


Рисунок 2 – Рівень споживання електричної енергії

На графіку можна побачити співвідношення генерації електрики сонячними панелями та тієї, що використовується з загальної мережі.

Моделювання системи гарячого водопостачання із сонячними колекторами виконувалося програмою T\*Sol. В результаті моделювання була обрана система із вакуумним колектором – Vitasol 050, виробництва Viessmann Werke GmbH&CoKG. Графічно показано частку, яку покриває сонячна енергія від загальної потреби у нагріванні води (Рис.3).

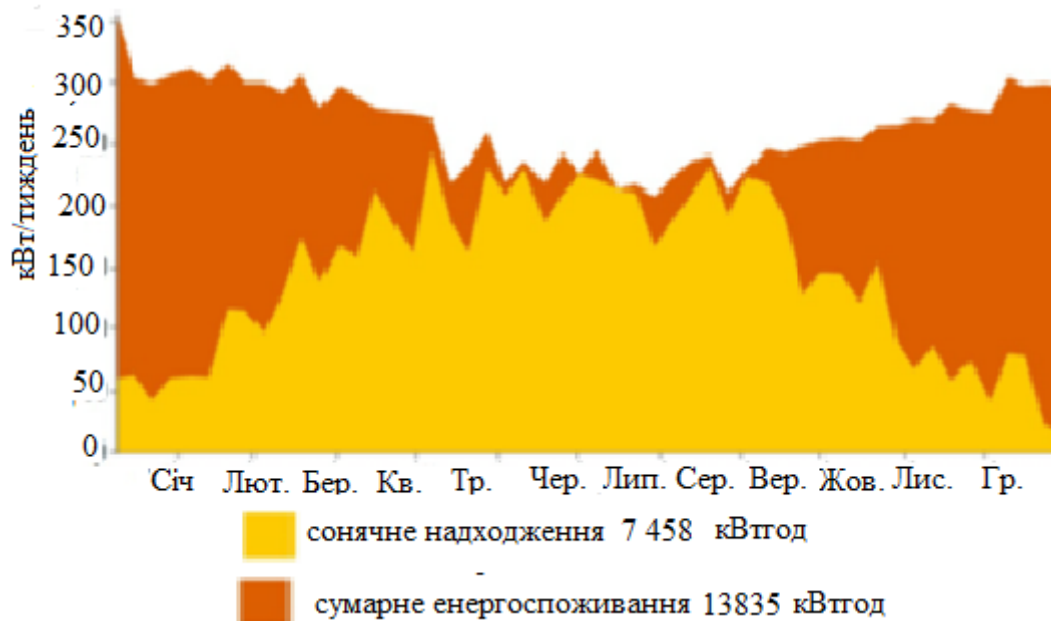


Рисунок 3 – Характеристика системи гарячого водопостачання з використанням вакуумного сонячного колектора.

Графік демонструє, що використання вакуумного сонячного колектора для гарячого водопостачання дає змогу майже повністю задовольнити потреби у гарячій воді в теплий період року. Зі зміною пори року та зменшенням інсоляції відповідно зменшується і ефективність роботи сонячного колектора.

**Висновки.** Підсумовуючи, використання альтернативних джерел енергії, у даному випадку енергії сонця, дозволяє значно скоротити використання енергії із традиційних джерел. Але в зв'язку із кліматичними особливостями, а саме сезонними коливаннями рівня інсоляції використання лише сонячної енергії не дозволить повністю відмовитися як від постачання електроенергії від зовнішніх джерел, так від використання органічного палива для гарячого водопостачання та опалення.

#### Перелік посилань:

1. Kravtsov S., Zhesan R., Holyk O. Renewable Energy Sources and Other Basic Components of Increasing Energy Efficiency and Energy Independence. Central Ukrainian Scientific Bulletin Technical Sciences. 2023. V.8, № 91. P. 48–56.
2. Stanca S. Improving Energy Efficiency in a Building Using Passive Energy-Saving Measures. Journal of Applied Engineering Sciences. 2023. Vol. 13, no. 2. P. 269–274.
3. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель : Наказ М-ва регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України від 11.07.2018 р. № 169 : станом на 12 верес. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-18#Text> (дата звернення: 22.03.2024).
4. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Чинний від 2022-01-09. Вид. офіц. Київ, 2022. 27 с.

## УДК 620.9

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Белик С.Р.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Шкляр В.І.

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

### ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛІЦЕЮ

Для забезпечення електроенергією ліцею розглянуто використання фотовольтаїчних сонячних панелей (далі ФЕС) на заміну централізованого електропостачання.

Об'єктом дослідження є заклад освіти (ліцей) в м. Чернігів має форму букви «Н» та складається з трьох секцій: 2-поверхової, перехідної 2-поверхової та 3-поверхової.

В програмі PVSol проведені розрахунки фотоелектричної системи [1]. Запропоновано розташовувати панелі на криші триповерхової частини будівлі, система з 134 модулів. Було проведено 3 дослідження для розміщення панелей під кутом 15°, 30° та 45° та розвернутих на 180° до азимуту, тобто на південь. Зміна кута на більший взимку трохи підвищує вироблення електроенергії. Найкраще підвищувати кут з вересня по квітень до 45°, а в теплу пору року коригувати його на рівні 15°, повністю покриває електроспоживання закладу кожного місяця (електроспоживання будівлі прийнято за 2021 рік і складає 40178 кВт·год). 3-поверхова секція це найвища і найменше затінена плоска поверхня ліцею. Дані панелі будуть розміщені по всій поверхні 3-поверхової частини даху, окрім місць, де затінення буде становити більше 10 % і ефективність цих панелей буде достатньо меншою. Така кількість панелей обрана з ціллю частково покрити витрати на електроенергію та облаштування закладу освіти гарячим водопостачанням за допомогою сонячних колекторів.

У розрахунках запроєктовано використання фотовольтаїчних модулів компанії JA Solar Holdings Co., Ltd., а саме модель JAM72S30-530/MR. Загальна площа яку покривають панелі складає 346,2 м<sup>2</sup>, що становить 45% від загальної площі поверхні будівлі. Для перетворення виробленої електроенергії в змінний струм використовується 2 інвертори від Huawei Technologies, модель SUN2000-30KTL-M3(440Vac). Вартість панелей JAM72S30-530/MR складає 7595 грн, а інвертора SUN2000-30KTL-M3(440Vac) – 120900 грн. Загальна вартість обладнання разом з витратами на монтаж буде становити 1259530 грн. Без врахування можливості продажу надлишкової електроенергії, за тарифом 6,08 грн/кВт·год грошова економія за рік складе 244282 грн/рік. В денний період доби надлишок електроенергії можна продавати та отримувати додаткові кошти за електроенергію.

Період окупності складає 5,2 року, що є гарним показником.

Для забезпечення ліцею гарячою водою розглянуто встановлення сонячних колекторів на дах 1 корпусу з різними коефіцієнтами заміщення. Для демонстрації обрано типовий вакуумний сонячний колектор від компанії Viessmann Werke GmbH & Co KG, модель Vitosol 200-T SP2 2m [2]. На основі аналізу кута нахилу сонячних панелей, колектори встановлюються під кутом 45°. Визначимо оптимальний коефіцієнт заміщення в програмі TSol. Параметри, які не змінюються: кут нахилу складає 45°, кут азимуту 180°. При таких параметрах та коефіцієнтом заміщення 40 % потрібно буде 8 колекторів, а система покриває 48,7 % (Рис. 1, а).

При встановленні колекторів з коефіцієнтом заміщення 65 % (14 колекторів) система покриває 60,3 %, що більше за попередній результат, але і збільшується частина виробленої енергії літній період, яка не буде корисно використана ліцеєм (Рис. 1, б), тобто, загальна ефективність системи зменшиться.

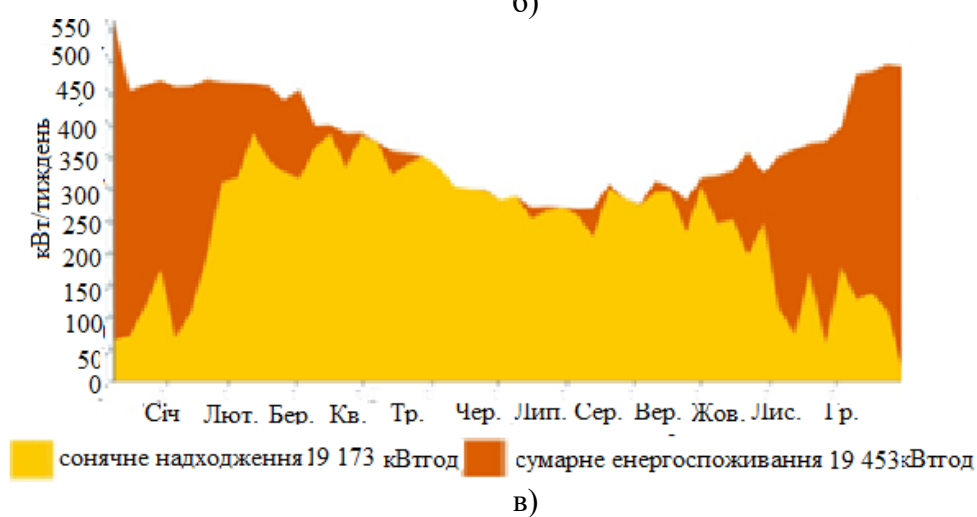
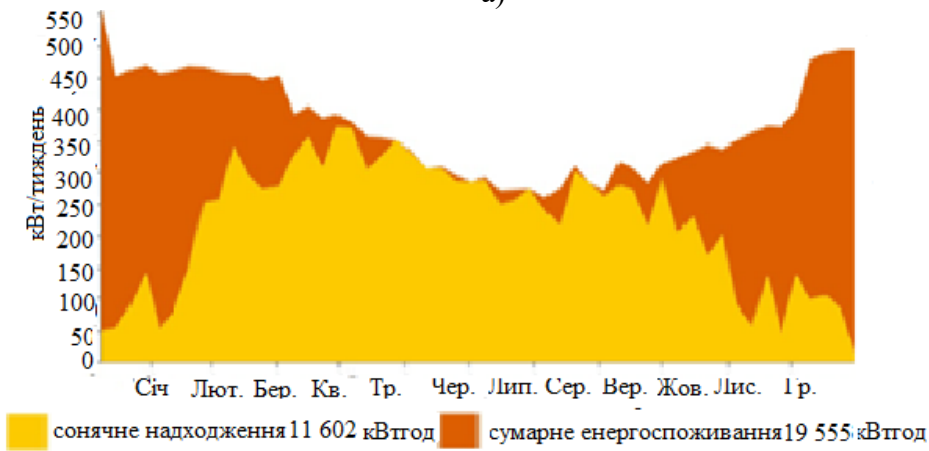
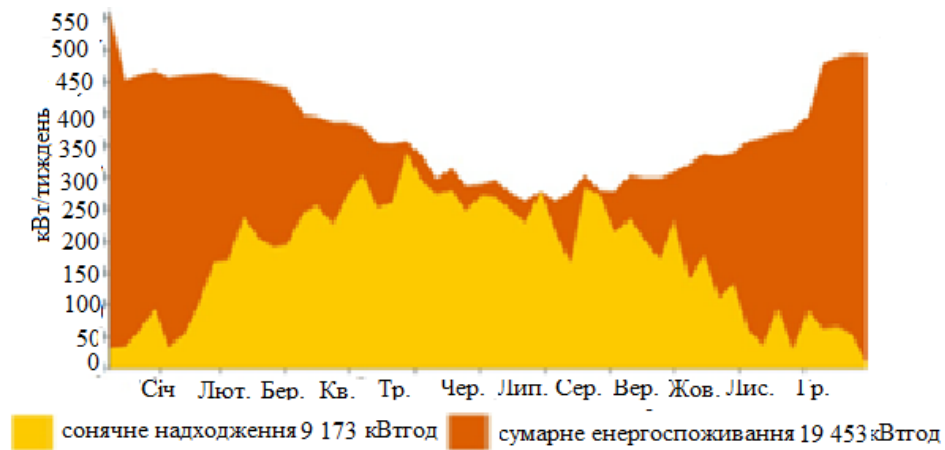


Рисунок 1 – Покриття навантаження в гарячій воді: а) коефіцієнтом заміщення 40 %; б) коефіцієнтом заміщення 60 %; в) коефіцієнтом заміщення 80 %

При коефіцієнті заміщення 80 % (20 колекторів) отримаємо лише 65,8 %, що означає що це найгірший з запропонованих варіантів, такий результат через те, що виробляється забагато енергії, яку заклад не буде споживати (Рис. 1, в). Крім того перегрів теплоносія в системі може привести до його стагнації.

**Висновки.** На основі проведеного дослідження виявили, що використання сонячної енергії для забезпечення закладу освіти електроенергією та тепловою енергією є економічно доцільно. В холодну пору року краще встановлювати кут нахилу сонячних панелей на рівні 45°, а в теплу пору знижувати кут до 15°, такі дії призведуть до приросту

виробленої електроенергії. Система з 134 фотовольтаїчних модулів генерує 78225 кВт·год з 40178 кВт·год споживання електричної енергії, але значна частка припадає на літню пору року, коли споживання ліцею значно зменшується. Це дає змогу продавати електричну енергію комерційним споживачам. Строк окупності без врахування продажу надлишку електроенергії складає 5,2 роки.

Було виявлено що найкращий коефіцієнт заміщення теплової енергії сонячними колекторами складає 40 %, це пов'язано з тим, що при такому заміщенні не буде втрачатися частка виробленої енергії, тим самим ККД системи буде більшим. Система з 8 колекторів покриває 9173 кВт·год з 19450 кВт·год теплової енергії в рік на гаряче водопостачання ліцею (48,7 %).

**Перелік посилань:**

1. Програмне забезпечення PV\*Sol Premium. URL: <https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/> (дата звернення 22.03.2024)

2. Програмне забезпечення T\*Sol URL: <https://valentin-software.com/en/products/tsol/> (дата звернення 22.03.2024)/



## УДК 620.1

<sup>1</sup> Аспірант 1 курсу Крамаренко С.О.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Білоус І.Ю.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=USpfruwAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

### ОГЛЯД БУДІВЕЛЬ З СТАТУСОМ NZEB В РІЗНИХ КРАЇНАХ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Зміна кліматичних умов внаслідок антропогенного впливу в довгостроковій перспективі становить загрозу для оточуючого середовища та здоров'я людей. Одним з основних факторів зміни клімату є надлишок парникових газів, в більшості це відноситься до діоксиду вуглецю. Основним засобом боротьби зі збільшенням рівня CO<sub>2</sub> в атмосфері є декарбонізація, яка представляє собою комплекс заходів спрямованих на перехід від використання викопних видів палива до відновлювальних та безвуглецевих видів енергії.

На сектор будівель приходиться приблизно 40% світового обсягу викидів вуглецю, що робить його одним з ключових у боротьбі зі збільшенням рівня CO<sub>2</sub> [1]. Більша частина вуглецю викидається внаслідок споживання енергії при експлуатації, з чого постає необхідність впровадження енергозберігаючих заходів.

**Аналіз останніх досліджень.** Європейський Союз прикладає значних зусиль у боротьбі з кліматичними змінами. Так, Європейський Парламент ухвалив Директиву 2010/31, в якій було введено термін «будівлі з майже нульовим споживанням енергії» (NZEB) та встановлені вимоги до зниження питомого енергоспоживання та залучення відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) для набуття відповідного статусу. Крім того означена директива зобов'язувала, щоб всі новобудови в ЄС з 2021 року відповідали вимогам NZEB [2].

Варто зазначити, що Директива 2010/31 не визначає єдині нормативні показники, а навпаки—делегує можливість визначити рівень, після якого будівля отримує статус NZEB, країнам членам Євросоюзу, адже вони мають свої унікальні кліматичні, інфраструктурні та економічні особливості. Проте, Європейська Комісія випустила рекомендації з встановленими числовими орієнтирами для NZEB в кожній кліматичній зоні [3]. Числовим показником, який характеризує будівлю, директивою запропоновано питома споживання первинної енергії за рік (EP) на потреби опалення, охолодження, вентиляції, гарячого водопостачання та освітлення [2]. Наприклад, для нових житлових будівель EP варіюється від 20 кВт·год/м<sup>2</sup> (Бельгія) до 132 кВт·год/м<sup>2</sup> (Естонія), а для нежитлових— від 30 кВт·год/м<sup>2</sup> (Бельгія) до 176 кВт·год/м<sup>2</sup> (Мальта). В своїй роботі Delia D'Agostino та інші [1] порівняли числові орієнтири з фактичними значеннями EP, прийнятими в країнах членах. Дослідження показало, що встановлене питома енергоспоживання для NZEB перевищує рівень числових орієнтирів Єврокомісія більше ніж на 10% в 24 країнах членах. Отримана розбіжність пояснюється не тільки різницею в кліматичних умовах і т. п., але й неспівпадінням розрахункових методик та визначень ключових параметрів [1].

**Формулювання мети.** Метою дослідження є вивчення питань будівель з близьким до нульового споживання енергії в різних країнах та імплементація їх досвіду в умовах України.

**Основна частина.** Як і у випадку з питомим споживанням енергії, частка відновлювальної компоненти в енергобалансі будівлі відрізняється від країни до країни. Так, в Ірландії цей показник становить 25%, тоді як в Греції він досягає 60% [1]. Для виконання вимоги по залученню ВДЕ в умовах Європи виділяють чотири підходи. Перший полягає в розташуванні на даху фотоелектричних панелей, вітряків, теплових насосів і т. п.

з підключенням до комунальних мереж будівлі. Другий передбачає те саме, але з розміщенням на прилеглий території будівлі як паркінг або будь-яке вільне місце. Проте, ці підходи не ідеальні, адже вимагають достатньо незатіненого простору, чого в умовах сучасного міста важко досягти. У третьому підході використовують відновлювальні типи палива, яке вироблено в сторонньому місці, для виробництва теплової та електричної енергії. До нього можна віднести біодизель, біоетанол, пелети та дерев'яна тріска. У цьому випадку проблема нестачі простору постає в меншому обсязі, так як котел на біопаливі або когенераційна установка займають меншу площу ніж фотоелектричний масив. Але тут виникає проблема перевищення норми викидних газів, що особливо актуально у містах з активним автомобільним трафіком. Четвертий підхід включає в себе закупівлю з загальної мережі енергоресурсів, вироблених за допомогою ВДЕ поза межами будівлі. Наприклад, електроенергія від сонячних станцій, вітряків та інших «зелених» джерел, які мають гарантії походження [4].

Деякі країни члени прийняли рішення прив'язати статус NZEB до одного з найкращих класів енергоефективності, наприклад А, А+. В поєднанні з покриттям частки енергоспоживання з використанням ВДЕ даний підхід спрощує розуміння нової концепції. Проте існують і виключення. У Фінляндії буде достатньо і класу «В», а в Естонії і класу С для вже існуючих будівель [1].

Досягнення класу енергоефективності «А» неможливе без впровадження комплексу заходів з енергозбереження. Він включає в себе не тільки термомодернізацію оболонки будівлі, але й глибоке переоснащення інженерних мереж. Обладнання систем опалення, вентиляції та кондиціонування повинно не тільки забезпечувати необхідний рівень комфорту, а й мати можливість підключення до системи управління будівлі. Залучення системи контролю та моніторингу дозволить наблизитися до статусу NZEB завдяки енергозбереженню по схемі запит-реакція. Схема застосовується для спрямування потоків енергії в ті місця, де вони необхідні в даний момент для задоволення потреб, і зниження енергетичних витрат там, де це не призведе до дискомфорту. При наявності відновлювальних джерел енергії підключених до комунальної мережі, система управління дає змогу перенаправляти надлишки виробленої енергії до енергосистеми або в акумулятори, що в результаті додає стійкості системі енергопостачання та зменшує пікові навантаження [2].

Кожна будівля, навіть виконана за типовим проектом, є унікальною внаслідок свого географічного розташування, орієнтації, призначення, розподілу внутрішнього простору, графіку роботи та матеріалів оболонки. Сукупність означених параметрів впливає на профіль споживання енергоресурсів, що приводить нас до ідеї розрахувати отриманий ефект від впровадження заходів з енергозбереження. З цією метою використовують спеціалізоване програмне забезпечення для енергетичного моделювання будівель. Воно дає змогу за декілька ітерацій опрацювати альтернативні сценарії і обрати оптимальний варіант. Енергетичне моделювання застосовують не тільки на під час проектування, але й протягом інших етапів життєвого циклу будівлі [5].

**Висновки.** Україні нормативно-правові документи щодо будівель з близьким до нульового споживання енергії знаходяться на стадії розроблення та обговорення, тому досвід передових країн є важливою складовою в успішній реалізації концепцій в умовах України.

#### **Перелік посилань:**

1. Assessing Nearly Zero Energy Buildings (NZEBs) development in Europe / D. D'Agostino et al. *Energy Strategy Reviews*. 2021. Vol. 36. P. 100680. URL: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100680> (date of access: 22.03.2024).

2. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj> (дата звернення 18.03.2024)

3. Commission recommendation (EU) 2016/1318 of 29 July 2016 on guidelines for the

promotion of nearly zero-energy buildings and best practices to ensure that, by 2020, all new buildings are nearly zero-energy buildings. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32016H1318> (дата звернення 18.03.2024)

4. Concept of net zero energy buildings (NZEB) - A literature review / R. K. Jaysawal et al. *Cleaner Engineering and Technology*. 2022. Vol. 11. P. 100582. URL: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100582> (date of access: 22.03.2024)..

5. Santos-Herrero J. M., Lopez-Guede J. M., Flores-Abascal I. Modeling, simulation and control tools for nZEB: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 142. P. 110851. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110851> (date of access: 22.03.2024).

## ВИКОРИСТАННЯ КУРЯЧОГО ПОСЛІДУ ДЛЯ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ ПТАХОФАБРИКИ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Україна, так само, як і багато інших країн, стикається з викликами у сфері виробництва та використання енергії, а також боротьби з екологічним забрудненням та викидами парникових газів. У зв'язку з цим, виробництво біогазу, що ґрунтується на переробці органічних відходів в відновлювальну енергію, стає все більш актуальним і може мати значний потенціал для України [1].

**Аналіз останніх досліджень.** Птахофабрики становлять основне джерело органічних відходів у сільському господарстві. Зокрема, великі обсяги курячого посліду, які вони генерують, становлять досить серйозну проблему для навколишнього середовища, оскільки неправильна утилізація посліду може призвести до забруднення водойм, ґрунту та повітря [2].

**Формулювання мети.** Метою роботи є оцінка встановлення біогазової установки на птахофабриці

**Основна частина.** Проблема ефективної переробки і утилізації відходів є однією з найгостріших у світі.

Біогаз – газова суміш, яка використовується як паливо, складається з метану та вуглекислого газу і отримується з біомаси в процесі анаеробного зброджування у спеціальних реакторах (Рис.1) [1].

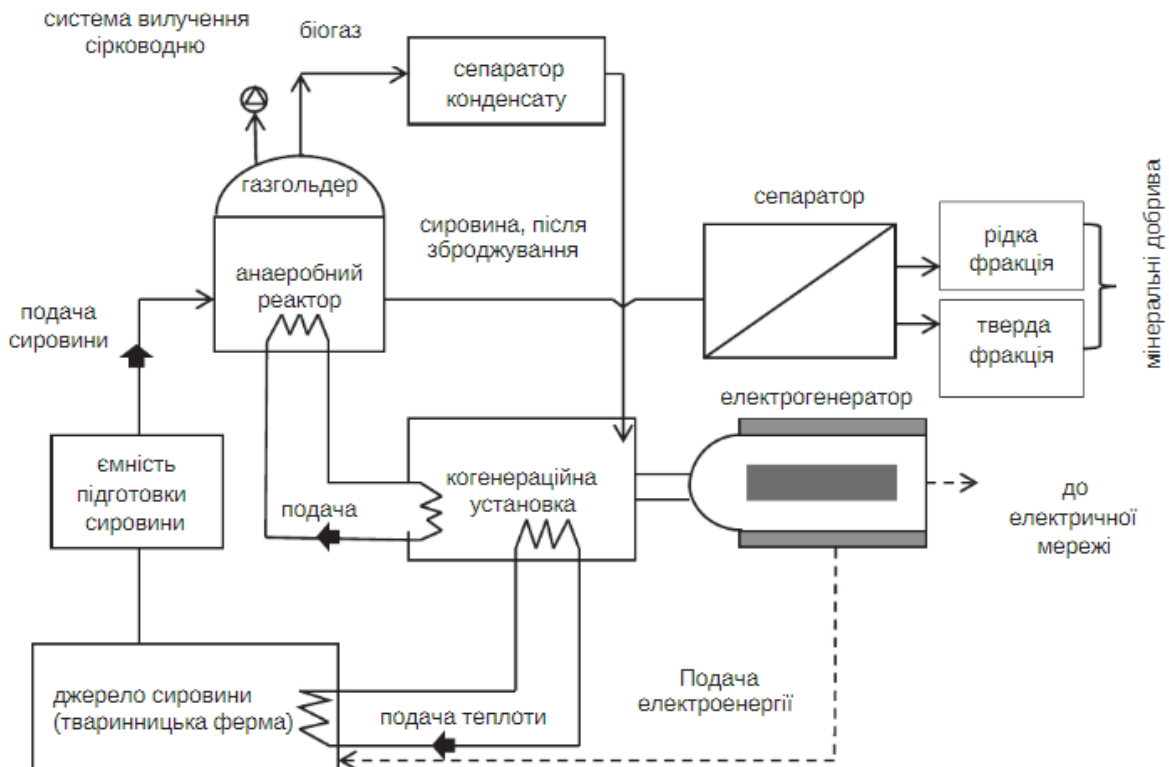


Рисунок 1 – Блок-схема виробництва біогазу

На інтенсивність процесу бродіння та утворення біогазу значним чином впливають чотири основні групи факторів: біологічні, фізичні, хімічні та організаційно-технологічні чинники. Перші включають склад зброджуваної біомаси та мікрофлори, умови для життєдіяльності мікроорганізмів. Фізичні чинники охоплюють температуру та тиск процесу, хімічні – концентрацію речовин у середовищі бродіння та склад біогазу. Організаційно-технологічні чинники містять в собі дозування та завантаження біомаси. Урахування цих чинників є важливим при плануванні і управлінні біогазовими установками для максимізації виробництва біогазу і оптимізації процесу бродіння [1].

Біогаз, отриманий з курячого посліду у біогазових установках, може ефективно замінити традиційні джерела енергії, такі як природний газ і вугілля. Це сприяє не лише зменшенню викидів шкідливих газів, але й надає додаткове рішення для утилізації органічних відходів птахофабрик, що допомагає зменшити їх негативний вплив на довкілля [3].

У програмному продукті RETScreen проведено розрахунки встановлення біогазової установки на птахофабриці. З результатів розрахунків можна побачити, що після встановлення біогазової установки на заміну газовому котлу, період окупності буде складати 2,1 роки, що є доволі низьким терміном окупності. При цьому вартість установки становить 17 200 000 грн, система для підготовки та завантаження біомаси – 1 200 000 грн, монтаж складає близько 25% від ціни всієї установки. Отже повна вартість біогазової установки з монтажем становитиме 23 000 000 грн.

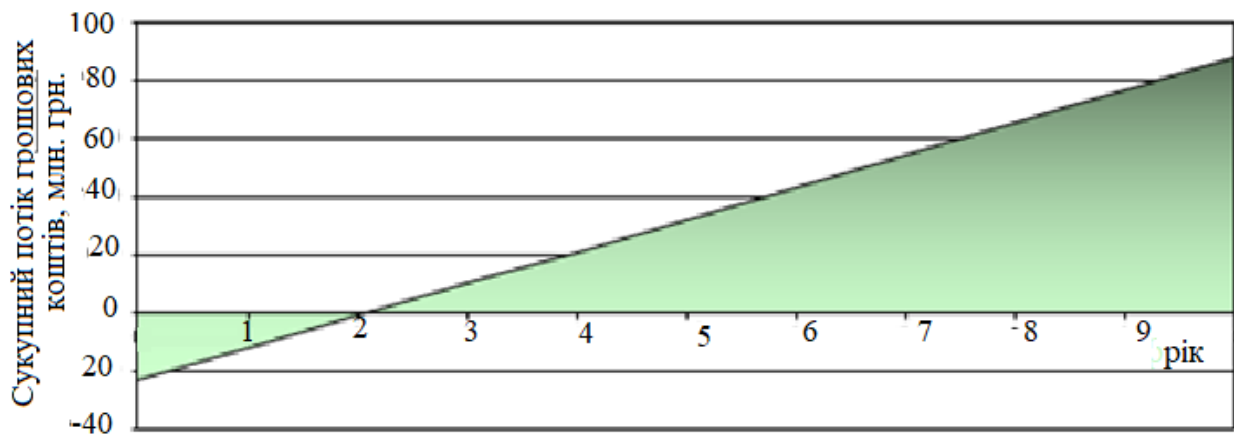


Рисунок 2 – Період окупності біогазової установки

Додатково до економії, біогазова установка зменшує кількість викидів CO<sub>2</sub>. Проаналізувавши результати в RetScreen щодо викидів, можна побачити що їхня кількість з 114,7 тCO<sub>2</sub> знизилася до 102 тCO<sub>2</sub>.

**Висновки.** На основі проведеного аналізу можна стверджувати, що отримання та використання біогазу на птахофабриці є економічно доцільним та зменшує шкідливий вплив на навколишнє середовище.

#### Перелік посилань:

1. Пришляк Н. В. Оцінка ефективності використання індивідуальних біогазових установок для переробки біовідходів селянських господарств. Економіка АПК. 2021. № 3. С. 50–60. URL: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202103050> (дата звернення: 24.03.2024).

2. Сақун Л.М., Різніченко Л.В., Велькін Б.О. Перспективи розвитку ринку біогазу в Україні та за кордоном. Економіка і організація управління. 2020. № 1. С. 160–170. URL: <https://doi.org/10.31558/2307-2318.2020.1.16> (дата звернення: 24.03.2024).

3. Паламеренко Я. В. Сучасний стан та перспективи розвитку біогазової галузі України. Інвестиції: практика та досвід. 2019. № 21, листоп. С. 54–62.

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Мишко В.М.

<sup>1</sup> Ст.викл., к.т.н. Буюк Н.А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НАВЧАЛЬНОГО КОРПУСУ №27 НТУУ "КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО" ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Впровадження енергоефективних технологій та використання відновлювальних джерел енергії є важливими кроками для збереження навколишнього середовища та зменшення негативного впливу на клімат. Поступовий перехід до чистих джерел енергії може сприяти сталому розвитку суспільства і забезпечити більш безпечно майбутнє.

**Аналіз останніх досліджень.** Використання альтернативних джерел енергії, таких як сонячна, вітрова, гідроенергетика та інші, можна розглядати як основний компонент підвищення ефективності енергоспоживання в окремих галузях економіки та забезпечення енергетичної самодостатності країни в цілому. Використання таких джерел допомагає зменшити залежність від імпорту енергоресурсів, зменшити вплив на довкілля та покращити стабільність енергетичної системи [1].

**Формулювання мети.** Оптимізація енергоефективності адміністративних будівель через використання відновлюваних джерел енергії включає в себе впровадження заходів, спрямованих на зменшення споживання енергії та впровадження екологічно безпечних практик у будівництві. Застосування технологій, таких як сонячні батареї та геотермальні системи, має на меті зниження викидів CO<sub>2</sub> та забезпечення надійного та економічного енергопостачання, а також демонстрування переваг переходу до більш стійкої моделі енергетики.

**Основна частина.** В якості об'єкта дослідження було обрано навчальний корпус №27 НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», який розташований у місті Київ.

Навчальний корпус №27 являє собою п'ятиповерхову будівлю, опалення та гаряче водопостачання централізоване. Рік побудови 1991.

Підвищення енергоефективності можна здійснити за допомогою пасивних методів, таких як поліпшення ізоляції огорожувальних конструкцій будівель. Це означає використання різних матеріалів, таких як пінополістирол, базальтова мінеральна вата, целюлозні волокна та інші для зменшення втрат тепла і оптимізації споживання енергії [2]. Клас енергоефективності будівлі відповідає рівню E [3].

Для підвищення енергоефективності будівлі запропоновано використання фотоелектричних панелей на плоскому даху навчального корпусу №27 НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського» та сонячних колекторів для гарячого водопостачання.

Модельовання та розрахунок фотоелектричних панелей було проведено з використанням програмного забезпечення PVSol, яке має ряд переваг. Його легкість в застосуванні та можливість точного моделювання робить його ідеальним інструментом для прогнозування виходу енергії та продуктивності сонячних установок. Крім того, у програмному комплексі PVSol доступні інструменти для фінансового аналізу, які дозволяють оцінити період окупності, рентабельність інвестицій та загальну фінансову вигідність сонячного проекту. За результатами моделювання обрані сонячні модулі виробництва JA Solar Holdings Co, Ltd моделі JAM72D00-355/PR загальною кількістю 467 одиниць. Обрана конфігурація дозволяє генерувати 165,78 кВт\*год електричної енергії

(Рис.1).

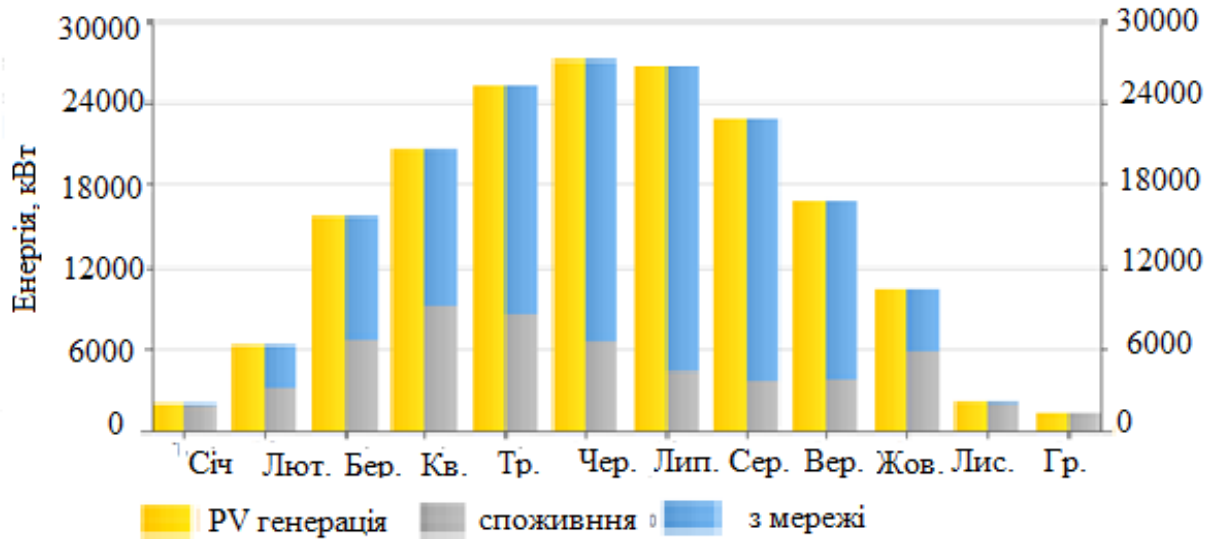


Рисунок 1 – Результати моделювання сонячних панелей.

Обґрунтовано достатність електрики, що генерується сонячними панелями відповідно до обсягів, необхідних для нормального функціонування адміністративно-побутового корпусу (Рис.2).

#### Покриття споживання

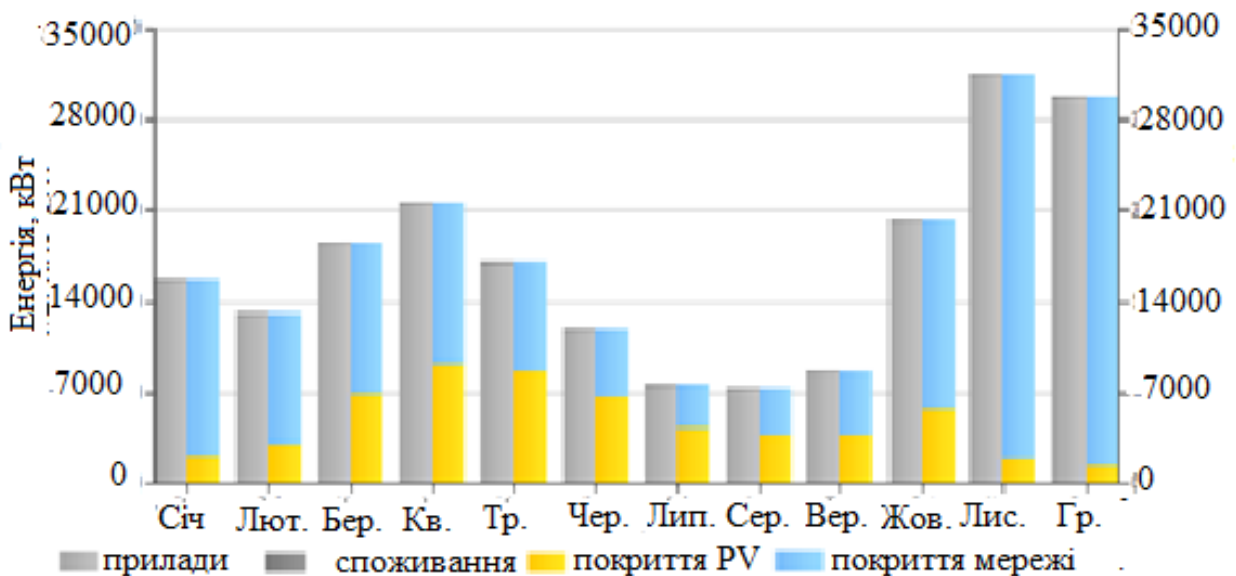


Рисунок 2 – Рівень споживання електричної енергії

На графіку показано співвідношення виробленої електроенергії сонячними панелями та використаної із мережі.

Моделювання системи гарячого водопостачання із сонячними колекторами здійснювалось в програмному середовищі T\*Sol. Була обрана система із вакуумним колектором – Vitasol 050, виробництва Viessmann Werke GmbH&CoKG. Показано, що використання вакуумного сонячного колектора для нагрівання гарячої води дозволяє майже вдвічі зменшити потребу у гарячій воді протягом теплої пори року (Рис.3). Проте зі зміною сезону та зменшенням інтенсивності сонячної радіації ефективність роботи сонячного колектора також зменшується.

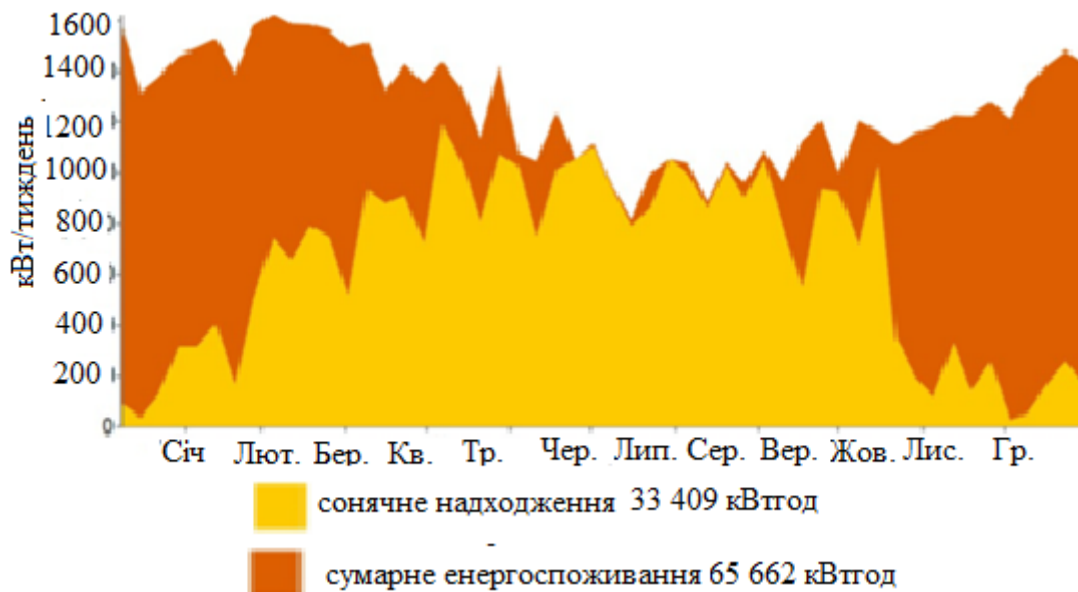


Рисунок 3 – Характеристика системи гарячого водопостачання з використанням вакуумного сонячного колектора.

**Висновки.** Використання сонячної енергії є дуже ефективним і чистим способом генерації електроенергії, але воно обмежене коливаннями в інтенсивності сонячного випромінювання. Це означає, що для забезпечення стабільного електропостачання потрібно мати систему для зберігання енергії або використовувати комбіновані джерела енергії, які включають сонячну енергію разом з іншими джерелами, такими як вітроенергія, гідроенергія або біомаса. Також важливо розвивати технології для підвищення ефективності збереження та використання сонячної енергії, щоб зробити її більш конкурентоспроможною і надійною альтернативою для традиційних джерел енергії.

**Перелік посилань:**

1. Kravtsov S., Zhesan R., Holyk O. Renewable Energy Sources and Other Basic Components of Increasing Energy Efficiency and Energy Independence. Central Ukrainian Scientific Bulletin Technical Sciences. 2023. V.8, № 91. P. 48–56.
2. Stanca S. Improving Energy Efficiency in a Building Using Passive Energy-Saving Measures. Journal of Applied Engineering Sciences. 2023. Vol. 13, no. 2. P. 269–274.
3. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель : Наказ М-ва регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України від 11.07.2018 р. № 169 : станом на 12 верес. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-18#Text> (дата звернення: 22.03.2024).



<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Овада Н.О.

<sup>1</sup> Ст.викл., к.т.н. Буяк Н.А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAAJ&hl=en>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА КОМФОРТНИХ УМОВ ЛІКАРНІ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Підвищення енергоефективності та комфортних умов у лікарнях із використанням відновлювальних джерел енергії - це актуальна проблема, оскільки забезпечення стабільного енергопостачання та зниження впливу на довкілля стає все важливішим завданням у сучасному світі. Використання відновлювальних джерел енергії може сприяти зменшенню витрат на енергію та забезпечити сталий розвиток, а також збереження екологічної чистоти у приміщеннях медичних установ, покращуючи умови лікування та загальний комфорт пацієнтів та медичного персоналу.

**Аналіз останніх досліджень.** Відновлювані джерела енергії можна розглядати як базові елементи енергоефективності окремих секторів економіки та енергетичної незалежності держави в цілому. Використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна, вітрова, гідроенергетика та інші, сприяє зменшенню залежності від імпорту енергоресурсів, зменшенню екологічного впливу та покращенню стійкості енергетичної системи [1].

**Формулювання мети.** Забезпечення енергоефективності та комфортних умов у лікарнях шляхом впровадження відновлювальних джерел енергії, спрямованих на зниження споживання традиційних ресурсів та зменшення негативного впливу на довкілля. Це сприятиме підвищенню якості медичного обслуговування, забезпечуючи сталий розвиток та збереження екологічної чистоти у медичних установах, що є ключовим для забезпечення оптимальних умов для пацієнтів та медичного персоналу.

**Основна частина.** Об'єкт дослідження заклад охорони здоров'я в місті Чернігів. Рік будівництва – 1989.

Будівля заклад охорони здоров'я має централізовану, залежну систему теплопостачання. Опалення будівель здійснюється від котельні, а ГВП та ХВП від магістралей централізованого постачання кожна з частин будівлі має свій гідроелеваторний вузол. Вентиляція – природня. Теплопостачання на об'єкті здійснюється завдяки власному, індивідуальному пункту теплопостачання (ІТП).

Для підвищення енергоефективності передбачено низка заходів таких як модернізація ІТП, заміна системи вентиляції, заміна приладів опалення та балансування системи та встановлення теплової завіси. Розрахований на підставі діючих методик [2] та [3] клас енергоефективності будівлі відповідає рівню С.

Для підвищення енергоефективності будівлі запропоновано використання фотоелектричних панелей на даху лікувального корпусу найвищої будівлі (6-ти поверхової частини) та адміністративного корпусу (4-ри поверхової частини). Моделювання та розрахунок фотоелектричних панелей було виконано за допомогою програмного забезпечення PVSol. Обрана конфігурація дозволяє генерувати 21,65 кВт\*год електричної енергії.

Покриття споживання електроенергії лікарнею, що генерується сонячними панелями відображено на (Рис.1). Для повного покриття потреби пропонується на зекономлені кошти закупити акумуляторні батареї та гібридні інвертори. Станція підібрана для повного

ефективного заповнення площі даху. Вся перегенерация може бути передана іншим об'єктам комунальної власності лікарні, які розташовані поруч. Звісно мережева сонячна електростанція не зможе покрити весь графік погодинного навантаження лікарні, але покриття у межах 50-60% цілком можливе.

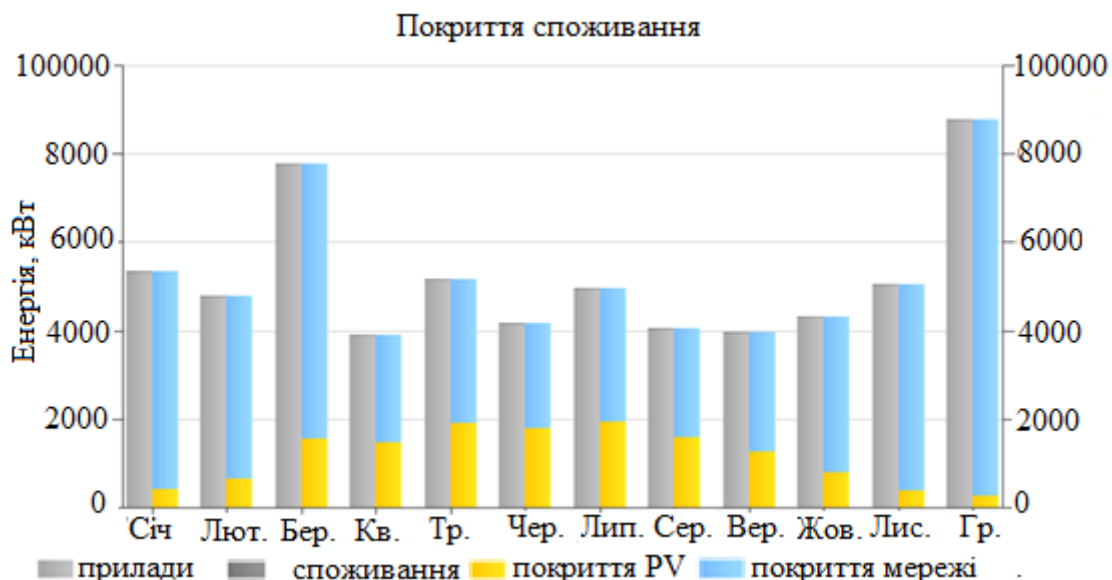


Рисунок 1 – Рівень споживання електричної енергії

На графіку можна побачити співвідношення генерації електрики сонячними панелями та тієї, що використовується з загальної мережі.

Моделювання системи гарячого водопостачання із сонячними колекторами виконувалося програмою T\*Sol. У результаті моделювання обрано систему із вакуумним колектором з коефіцієнтом заміщення 35% – Vitosol 200-T SP2A-24, в кількості 132 штук, виробництва Viessmann Werke GmbH&CoKG. Встановлена потужність колекторів складає 112,49 кВт, загальна площа сонячних колекторів – 281,16 м<sup>2</sup>, потреба в енергії на ГВП заміщена сонячними колекторами – 122 516,32 кВт·год, а енергія отримана від додаткового нагрівача 172 456 кВт·год. Графічно показано частку, яку покриває сонячна енергія від загальної потреби у нагріванні води (Рис. 2).

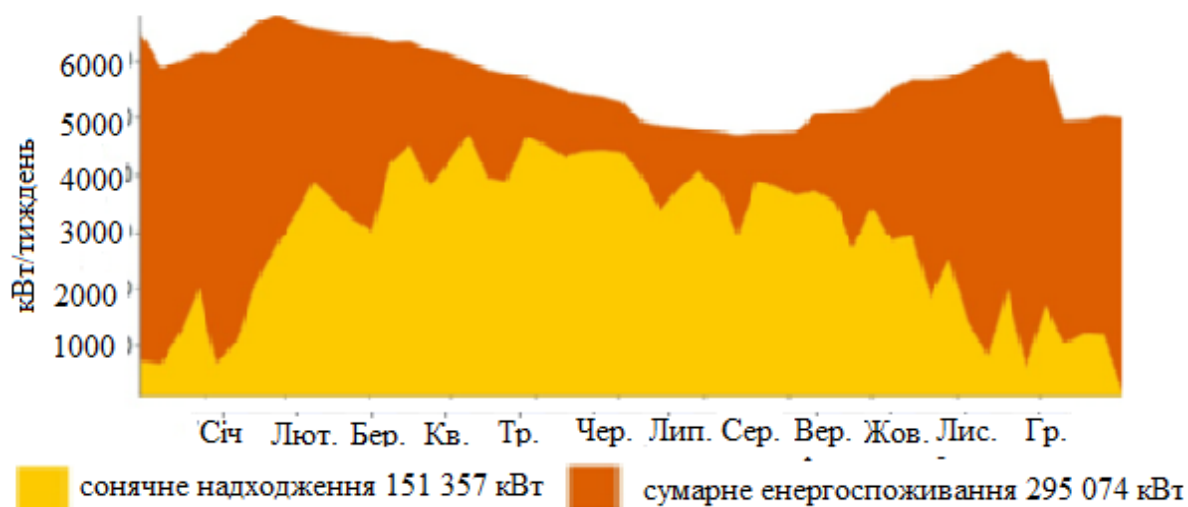


Рисунок 2 – Характеристика системи гарячого водопостачання з використанням вакуумного сонячного колектора.

Графік демонструє, що використання вакуумного сонячного колектора для гарячого

водопостачання дає змогу майже повністю задовольнити потреби лікарні у гарячій воді в теплий період року. Зі зміною пори року та зменшенням інсоляції відповідно зменшується і ефективність роботи сонячного колектора.

Підвищення енергоефективності та забезпечення комфортних умов стають ключовим завданням в умовах сталого розвитку. На прикладі лікарні буде проаналізовано вплив підвищення термічного опору огорожень згідно з сучасними вимогами.

Термічний опір огорожень відповідає стандартам, які були встановлені у 80-х роках. Для оцінки зміни рівня комфорту взята модель із двома зовнішніми стінами, палати №8, що на 2 поверсі. Рівень теплового комфорту оцінюється за критерієм PMV, що базується на суб'єктивних та об'єктивних параметрах мікроклімату. PMV визначається методом енергетичного балансу між людським тілом і оточуючим середовищем. Розрахунок показників теплового комфорту для змінної середньої радіаційної температури на протязі року до та після термомодернізації стіни здійснювався у Mathcad [4]. Встановлено, що PMV коливається від -0,4 до -0,3. Зміна термічного опору огорожень сприяє підвищенню PMV та поліпшенню теплового комфорту для (Рис. 3).

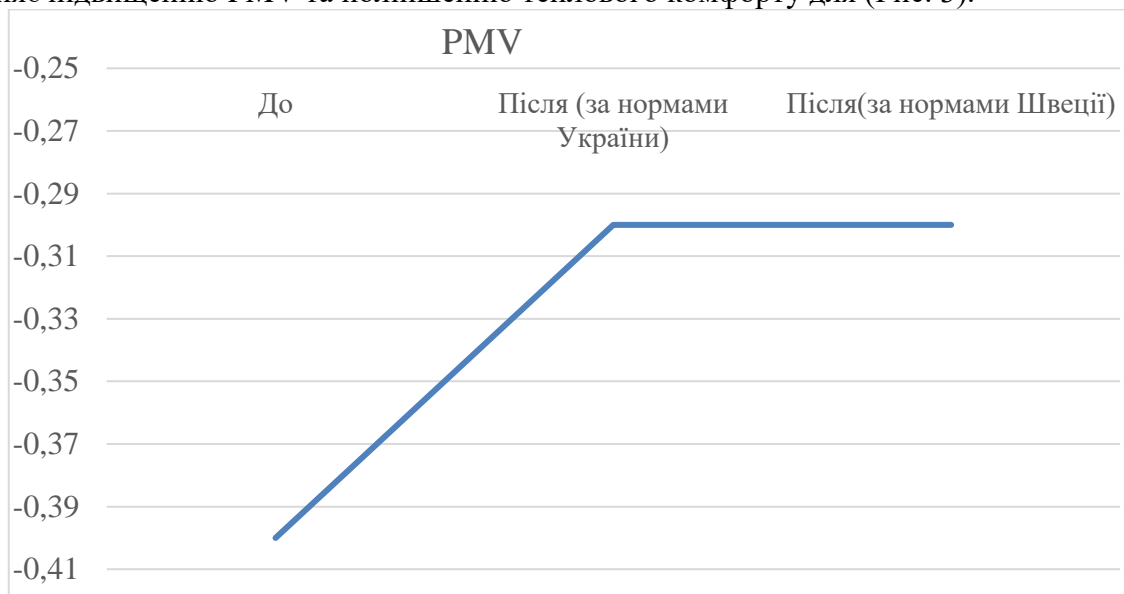


Рисунок 3 – Зміна PMV до та після термомодернізації

Отже, після проведення термомодернізації категорія будівлі, щодо забезпечення комфортних умов, зміниться з другої на першу, що суттєво покращить умови перебування пацієнтів.

**Висновки.** Отже, використання сонячної енергії дозволить знизити енергоспоживання газу а запропонована термомодернізація ще і підвищить категорію будівлі щодо забезпечення комфортних умов.

**Перелік посилань:**

1. Kravtsov S., Zhesan R., Holyk O. Renewable Energy Sources and Other Basic Components of Increasing Energy Efficiency and Energy Independence. Central Ukrainian Scientific Bulletin Technical Sciences.2023. V.8, № 91. P. 48–56.

2. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель : Наказ М-ва регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України від 11.07.2018 р. № 169 : станом на 12 верес. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-18#Text> (дата звернення: 22.03.2024).

3. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Чинний від 2022-01-09. Вид. офіц. Київ, 2022. 27 с.

4. Білоус І. Ю. Оцінювання енергоефективності будівлі в умовах динамічної зміни характеристик середовища : дис. канд. техн. наук : 05.14.01. Київ, 2019. 236 с.

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Пихтарь Р.М.; <sup>2</sup> Пихтар М.П.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Білоус І.Ю.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=USpfruwAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

<sup>2</sup> заступник директора Славутицької філії КПІ ім. Ігоря Сікорського

## КОНЦЕПЦІЯ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЛІ НОВОСТВОРЮЮЧОГО ХАБУ В М.СЛАВУТИЧ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Проблема ефективної підготовки фахівців та науковців не буде вирішена без координації та об'єднання зусиль ЗВО, галузевих НДІ, ОМС та промисловості. Таке об'єднання економічно доцільно робити на майданчиках - максимально наближених до практичної діяльності, але при цьому володіють усією необхідною інфраструктурою для якісного навчання, життя та роботи студентів та навчально-педагогічних. А також там, де можна організувати міжнародне співробітництво та обмін знаннями та технологіями. В Україні таким природним майданчиком є місто Славутич, а також майданчик Чорнобильської АЕС, що мають всі необхідні умови. Славутич, який має унікальну історію та зв'язки з Чорнобильською АЕС, може стати ідеальним місцем для створення хабу, залучаючи вчених, інженерів та студентів. Науковий хаб в Славутичі може стати центром інновацій у галузі ядерної безпеки та радіаційного захисту, що є особливо актуальним у світлі історії Чорнобильської катастрофи.

**Формулювання мети.** Метою роботи є розробка методології модернізації існуючої адміністративної будівлі до сучасних вимог щодо енергоефективності, на базі якої буде створений сучасний енергоіноваційний хаб в галузі ядерної безпеки.

**Об'єкт дослідження.** У м. Славутич, за мінімальних матеріальних витрат планується розгорнути науково-технічний хаб - «ІНУДЕКО. Північно-український ядерний науковий хаб». Головною метою діяльності такої організації полягатиме в об'єднанні зусиль академічних, промислових та державних установ, створенні умов для розвитку освітньо-наукової та бізнес екосистеми й впровадження новітніх технологій у сфері ядерної та зеленої енергетики.

За сприяння міської влади та міського голови м. Славутич для новостворюваного хабу виділена адміністративна будівля, яка не відповідає сучасним вимогам щодо енергетичної ефективності будівель в Україні.

**Основна частина.** В умовах обмеженості енергетичних ресурсів забезпечення раціонального енергоспоживання визначає темпи та якість розвитку сучасного суспільства. У зв'язку з цим створено команду з науковців, підприємців та студентів для розробки концептуального плану ядерного хабу в Славутичі та дослідження енергоефективності його адміністративної будівлі, що є важливим кроком до реалізації проекту. Однією з складових функціонування хабу є започаткування дуальної освіти з Навчально-науковим інститутом атомної та теплової енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського. Взаємодія між різними групами забезпечить багатогранний підхід до планування та реалізації хабу, функціонування якого відповідало б як академічним, так і комерційним потребам. Науковці можуть внести свої знання у ядерній фізиці та інженерії, підприємці – розробляти стратегії для комерційної успішності, а студенти – вносити новітні ідеї та інновації.

Реалізації ідеї створення енергетичного хабу передбачає, що адміністративна будівля, де функціонуватиме хаб буде відповідати сучасним вимогам до енергетичної ефективності та реалізовуватиме в собі концепцію будівель з близьким до нульового споживання енергій (nZEB) [1]. Реалізація концепції nZEB-будівель потребує виконання енергетичного моделювання будівель (BEM). Імітаційна динамічна енергетична 3D-модель

будівлі стане одним із інструментів не тільки оцінювання енергетичної ефективності, але і одним з демонстраційних інструментів в навчальному процесі хабу, де демонструватимуться сучасні рішення енергоефективних рішень для існуючих будівель, які дозволяють забезпечити будівлю власною генерацією понад 50% власної енергопотреби [2].

Використання імітаційного моделювання дозволяє проводити симуляції різних сценаріїв енерговикористання з урахуванням змін у дизайні, матеріалах, системах опалення та охолодження, зміни експлуатаційно-поведінкових графік використання будівлі, мінливості погодних умов, тощо. Створення ефективної імітаційної моделі будівлі в контексті енергоменеджменту, необхідно звернути увагу на кілька ключових аспектів [3]:

- *точність моделювання енергоспоживання*: ефективна модель повинна точно відтворювати реальне енергоспоживання будівлі, враховуючи всі зовнішні та внутрішні фактори, такі як кліматичні умови, внутрішнє обладнання, та поведінка користувачів;

- *гнучкість у моделюванні різних сценаріїв*: модель повинна бути гнучкою для тестування різних стратегій енергозбереження, таких як використання відновлювальних джерел енергії, оптимізація системи опалення та охолодження, а також управління освітленням;

- *інтеграція з системами автоматизації будівлі*: важливим аспектом є здатність моделі інтегруватися з існуючими або запланованими системами управління будівлею, для забезпечення автоматизованого та ефективного управління ресурсами;

- *аналіз вартості та вигод*: ефективність моделі також визначається її здатністю аналізувати вартість інвестицій у енергоефективні технології та оцінювати окупність цих інвестицій;

- *здатність до масштабування та адаптації*: ідеальна модель має бути адаптивною до змін у дизайні будівлі, енергетичних потребах або змінах у технологіях.

На основі цих критеріїв, можна зробити висновок, що найбільш ефективна енергетична імітаційна модель будівлі – це та, що інтегрує точність, гнучкість, інтеграцію з системами автоматизації, детальний фінансовий аналіз, та можливість адаптації до різних умов та потреб.

Згідно з концепцією сталого розвитку, в рамках її складової – сталого будівництва (енергоефективного і екологічного будівництва, зеленого будівництва, біопозитивного будівництва, біосферосумісного будівництва), необхідно забезпечити:

- заощадження енергії та запобігання необґрунтованим витратам;
- використання відновлюваних джерел енергії;
- використання енергії найбільш ефективнішим способом.

В рамках реалізації концепції енергоефективної будівлі хабу до основних енергозберігаючих заходів необхідно віднести:

- покращення теплозахисних властивостей оболонки будівлі (утеплення зовнішніх стін, даху, підлоги, фундаменту, встановлення сучасних енергозберігаючих вікон, дверей, тощо)

- використання сучасних затінювальних систем для світлопрозорих елементів огорожень з врахуванням з врахуванням орієнтацій за сторонами світу та сезону (опалювальний або охолоджувальний);

- використання сучасних систем опалення та охолодження з індивідуальним регулюванням теплового режиму приміщень;

- впровадження системи механічної припливно-витяжної вентиляції з рекуперацією тепла та індивідуальним регулюванням залежно від завантаження приміщень/зон будівлі;

- встановлення дахової СЕС;

- використання сонячних колекторів для потреб ГВП будівлі;

- використання теплових насосів як джерела тепло та холодабезпечення будівлі;

- застосування системи управління мікрокліматом приміщень які навчатимуться на

основі математичної моделі будівлі та за допомоги штучного інтелекту як єдиної енергетичної системи.

**Висновки.** В роботі представлена концепція реалізації будівлі енергетичного хабу в м. Славутич з близьким до нульового споживання енергії. Реалізація даної концепції будівлі має на меті не лише підвищити енергетичну ефективність будівлі, але і стати демонстраційним майданчиком реалізації nZEB будівель в Україні, де учасники хабу зможуть наочно побачити впровадження технічних рішень та їх економічний ефект.

**Перелік посилань:**

1. Pless S., Torcellini P. Net-Zero Energy Buildings: A Classification System Based on Renewable Energy Supply Options. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2010. URL: <https://doi.org/10.2172/983417> (date of access: 22.03.2024).

2. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj> (дата звернення 18.03.2024)

3. Моделі та інструментальні засоби підтримки академічного підприємництва / В. П. Клименко та ін. Київ : ІПММС НАН України, 2023. 248 с.

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Розумна Д.О.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Суходуб І.О.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=sHVLLBgAAAAJ&hl=uk>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ГРОМАДСЬКОЇ БУДІВЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНСТРУМЕНТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Сьогодні світова спільнота докладає величезних зусиль для пошуку нових технічних і технологічних рішень, спрямованих на зниження споживання енергії через дефіцит викопного палива / енергетичних ресурсів і проблему глобальної зміни клімату. Ця проблема стає ще більш актуальною для України, де бойові дії завдають значної шкоди критичній та соціальній інфраструктурі. За таких обставин питання негайної та якісної реконструкції цих об'єктів стає ще більш актуальним.

**Аналіз останніх досліджень.** Існує безліч підходів до оцінки рівня енергетичної ефективності та ефекту від впровадження заходів з підвищення рівня енергоефективності, починаючи від спрощених підходів з використанням помісячних показників за період опалення / охолодження, та закінчуючи динамічним моделюванням з кроком розрахунку в одну хвилину. На національному рівні в Україні використовується помісячний квазістаціонарний підхід до розрахунку енергопотребити та енергоспоживання на опалення та охолодження [1].

Для порівняльного аналізу в даній роботі були обрані наступні програмні інструменти:

1) програма RETScreen, яка дозволяє проводити розрахунок технічних, економічних та екологічних показників для різних проєктів з підвищення рівня енергоефективності будівель та енергопостачання на базі традиційних та відновлюваних джерел енергії;

2) програма E-Audit [2], яка дозволяє розрахувати енергоспоживання згідно національної методики [3];

3) програма DesignBuilder, яка дозволяє побудувати тривимірну модель будівлі з динамічним моделюванням енергії [4].

**Формулювання мети.** Для того, щоб розробити заходи з підвищення рівня енергетичної ефективності будівлі, які будуть спрямовані на забезпечення комфортних умов у будівлі та раціонального використання енергії одночасно, необхідно мати певні знання щодо фактичного стану та функціонування будівлі. Отже, розглянемо та порівняємо потенціали енергозбереження та ефект від впровадження заходів, визначених за допомогою динамічного енергетичного моделювання (ДЕМ) досліджуваної будівлі в програмному забезпеченні DesignBuilder та отриманих результатів в програмах RETScreen та E-Audit.

**Основна частина.** В якості досліджуваного об'єкта для енергетичного моделювання та аналізу було обрано громадську будівлю в Чернігівській області. Будівля працює з понеділка по п'ятницю з восьмої години ранку до четвертої години вечора та налічує 159 працівників. У громадській будівлі знаходяться велика актові зала, зали для засідань та нарад, офісні та архівні кабінети, а також туалети. На досліджуваному об'єкті наявні неопалювальний підвал, який займає всю площу під підлогою будівлі, та неопалювальний технічний поверх, який займає лише частину площі. Загалом громадська будівля налічує чотири поверхи. Джерелом опалення для громадської будівлі слугує централізоване тепlopостачання через застарілий та зношений тепловий пункт за залежною схемою підключення. Система гарячого водopостачання на досліджуваному об'єкті відсутня, проте

наявна система холодного водопостачання завдяки центральній мережі водопостачання. Система механічної вентиляції в громадській будівлі відсутня, оскільки наявні вентиляційні канали не функціонують. Центральна система охолодження повітря в громадській будівлі також відсутня та лише частково забезпечується за допомогою побутових кондиціонерів. Внутрішнє освітлення приміщень будівлі та місць загального користування забезпечується за рахунок світлодіодних ламп. Термічні опори усіх типів огорожувальних конструкцій, наявних у громадській будівлі, не відповідають нормативним значенням, наведеним у [5]. Щоб мати чітке уявлення про технічний стан огорожувальних конструкцій за допомогою програми E-Audit було проведено розрахунок теплових втрат згідно національної методики, а результати для більшої наочності представлено у вигляді секторної діаграми у відсотках (Рис. 1).



Рисунок 1 – Теплові втрати через існуючі ОК досліджуваної будівлі

З діаграми можна побачити, що майже половину від усього балансу теплових втрат складають тепловтрати через зовнішні стіни, тому їх термомодернізація є першочерговим завданням. Окрім того, не можна нехтувати невеликими у системі опалення будівлі під час її утеплення, оскільки це призведе до втрати всіх енергозберігаючих переваг. Таким чином, в рамках даної роботи в якості енергозберігаючих заходів було обрано утеплення зовнішніх стін та цоколю, утеплення сумішеного покриття та горищного покриття, а також встановлення нового індивідуального теплового пункту (ІТП) та модернізація внутрішньобудинкової системи опалення. Майже у всіх обраних для аналізу програмних забезпеченнях було розроблено три моделі енерговикористання, а саме:

- 1) фактична модель, яка відображає існуючий стан будівлі;
- 2) базова модель, у якій всі параметри мікроклімату приміщень були приведені до нормативних вимог;
- 3) запропонована модель, яка відображає стан будівлі після впровадження обраних заходів з підвищення рівня енергетичної ефективності будівлі.

Для зручності порівняння та аналізу споживання енергоресурсів результати моделювання усіх розглянутих сценаріїв зведемо в стовпчасті діаграми, наведені нижче. Виходячи з даних рисунків 2 та 3 можна зробити наступні висновки:

1) Порівнюючи усереднене за три роки історичне споживання теплової та електричної енергії зі фактичним споживанням, розрахованим за допомогою моделювання, бачимо, що різниця в усіх випадках є невеликою, тому моделі є верифікованими та придатними до подальших досліджень. Так, наприклад, у DesignBuilder відхилення від історичного споживання теплової енергії складає 8%, а від історичного споживання електричної енергії – 2%.

2) Споживання теплової енергії запропованою моделлю, побудованою у трьох різних програмних продуктах, знижується у більше ніж два рази в порівнянні з базовою моделлю, а тому запропоновані рішення є доцільними для впровадження на досліджуваному об'єкті.

Відмінність результатів щодо споживання теплової енергії для запропонованої моделі у порівнянні з їх осередненим значенням для усіх трьох сценаріїв складає до 2% для



кожної з розглянутих моделей.

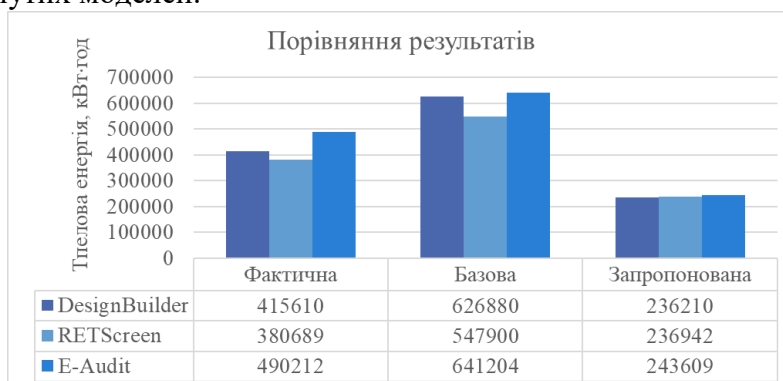


Рисунок 2 – Порівняння результатів моделювання в трьох обраних програмних забезпеченнях (споживання теплової енергії)



Рисунок 3 – Порівняння результатів моделювання в трьох обраних програмних забезпеченнях (споживання електричної енергії)

**Висновки.** Порівнюючи результати, отримані у ході моделювання різних моделей, можемо побачити, що дані дещо різняться між собою. Це можна пояснити особливостями розрахунків в залежності від програмного забезпечення. Наприклад, програма E-Audit виконує енергетичний розрахунок на основі національного нормативного документу ДСТУ А.2.2-12:2015 та нормативних кліматичних даних. Натомість, RETScreen використовує спрощений помісячний розрахунок з кліматичними даними NASA, а DesignBuilder – динамічний з використанням погодинних кліматичних даних IWEC або ТМУ. Крім того, два останні програмні продукти опосередковано враховують всі складові неефективності системи опалення з використанням сезонного показника ефективності.

Окрім того, існує варіативність у результатах ще тому, що деякі програмні продукти враховують до аналізу певні параметри, які в інших випадках залишаються поза увагою. Так, наприклад, RETScreen не враховує теплонадходження від людини, проте враховує ефективність заходу по заміні ІТП. Натомість DesignBuilder дозволяє врахувати геометрію будівлі при розрахунках та зонувати її, а також витрати на вентиляційну складову.

#### Перелік посилань:

1. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. Чинний від 2023-03-01. Вид. офіц. Київ, 2022. 156 с.
2. E-Audit. Login | Е-Аудит. URL: <https://e-audit.escoua.com> (date of access: 22.03.2024).
3. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. К.: Мінрегіонбуд, 2016. 205 с.
4. DesignBuilder Software Ltd - Tutorials. DesignBuilder Software Ltd - Home. URL: <https://www.designbuilder.co.uk/training/online-learning/tutorials> (date of access: 22.03.2024).
5. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Чинний від 2022-01-09. Вид. офіц. Київ, 2022. 27 с

<sup>1</sup> Магістрант 1 курсу Точинський .Р.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Білоус І.Ю.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=USpfruwAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄКТУ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Енергетична безпека та надійність все більш важливими в контексті безперервного живлення та функціонування об'єктів критичної інфраструктури, до яких відносяться і медичні заклади, мають головний пріоритет в забезпеченні їх безперервної роботи, особливо в період військового стану та постійних відключень електроенергії.

**Формулювання мети.** Метою роботи є оцінювання енергетичної надійності забезпечення закладу охорони здоров'я для покриття частини енергоспоживання.

Завдання:

1) створення енергетичної моделі будівлі лікарні на базі програмного продукту «EnergyPlus»;

2) імітаційне динамічне моделювання дахової ФЕС;

3) аналіз результатів моделювання.

**Об'єкт дослідження.** Об'єктом дослідження є лікарня м. Чернігів 1989 року будівництва загальним об'ємом 69 375 м<sup>3</sup>. Орієнтація будівлі за проміжними сторонами світу. У лікарні є відділення, що мають безперебійно живитись електроенергією, а саме: хірургічне, реанімаційне, рентгенологічне відділення та лабораторії. Споживання електричної енергії будівлі складає 713 МВт·год/рік.

**Основна частина.** Створено математичну модель будівлі лікарні для дослідження енергетичних характеристик в програмному продукті «DesignBuilder» [1], який створений на основі «EnergyPlus». В результаті моделювання було створено дві моделі: базова та покращена. Покращена модель містить в собі такі енергоефективні заходи: утеплення стін, заміна вікон, встановлення теплового насоса, встановлення системи вентиляції із рекуперацією тепла та встановлення ФЕС. Питоме енергоспоживання на опалення базової моделі становить 5050 МВт·год, покращеної моделі – 684,1 МВт·год, що на 86% менше. При розробці покращеної моделі було враховано, що не у всіх приміщеннях лікувального закладу можна впроваджувати рекуперацію в системах вентиляції.

При моделюванні ФЕС було розраховано, що її потужності можуть забезпечити живленням відділення, що мають безперебійно живитись електроенергією.

Споживання електричної енергії будівлі складає 713 МВт·год, з яких хірургічне відділення споживає 65,54 МВт·год, лабораторія – 1,77 МВт·год, реанімаційне відділення – 2,2 МВт·год, рентгенологічне відділення – 21,9 МВт·год. Освітлення будівлі споживає 208,4 МВт·год.

Сонячні панелі на даху будівлі були розташовані з врахуванням орієнтації будівлі, їхнє розташування наведено на рисунку 1.

ФЕС складається з 400 панелей та має 220 кВт встановленої потужності. Для розрахунку було обрано панелі JA Solar JAM72S30 550/MR, потужністю 550 Вт та габаритами 2 279x1 134.

Панелі було розташовано горизонтально для зменшення затінення інших панелей. Встановлений кут нахилу – 30°. При розрахунку було враховано відсоток робочої площі панелі, що складає 95%.

Річна генерація ФЕС виробляє 215,2 МВт·год, що може покрити споживання критично важливих відділень та частину освітлення. Річна генерація продемонстрована на рисунку 2.

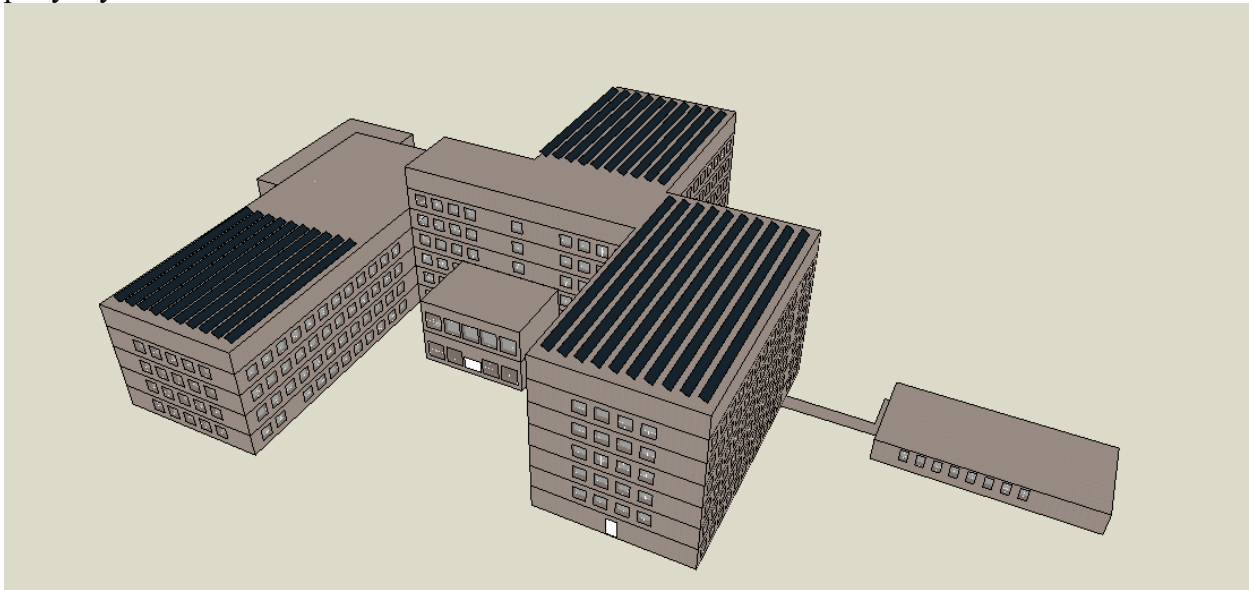


Рисунок 1 – Розташування сонячних панелей

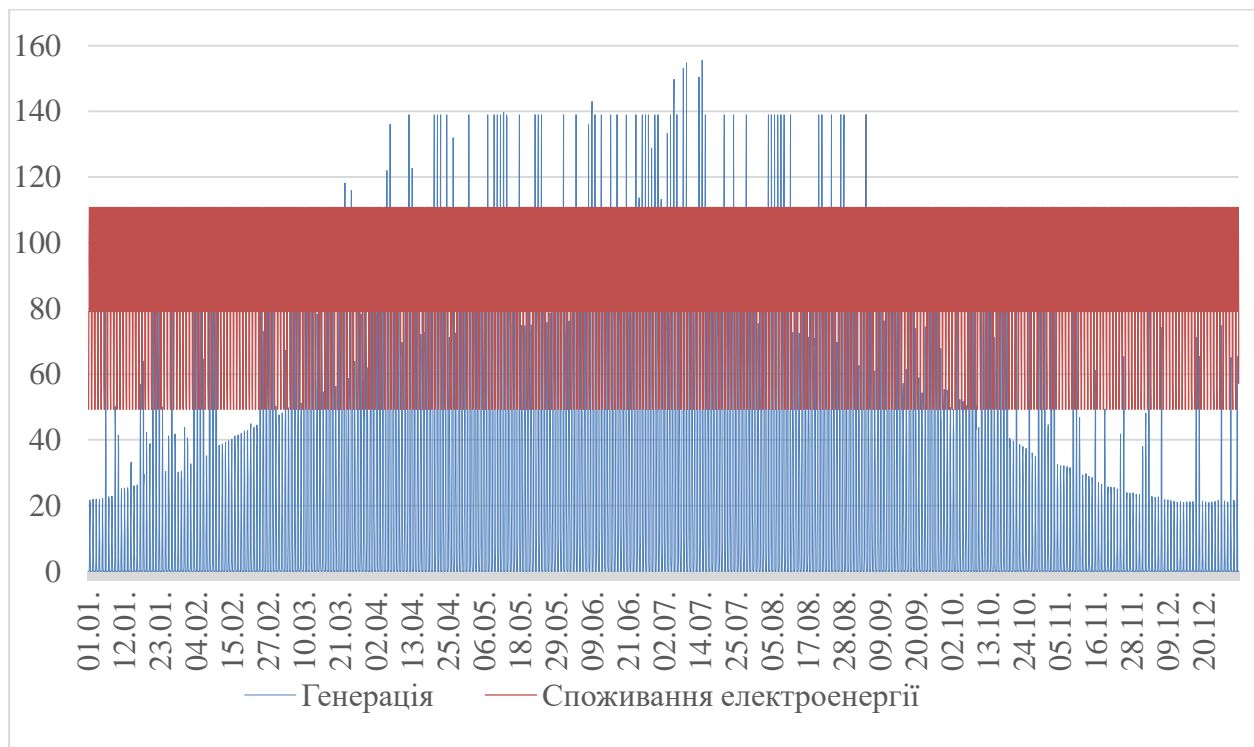


Рисунок 2 – Погодинні значення генерації електроенергії, та її споживання будівлею

**Висновки.** Проведено аналіз енергетичної моделі будівлі закладу охорони здоров'я в м. Чернігів, створеної за допомогою програмного продукту «DesignBuilder».

Створено базову та покращену модель об'єкту. Після впровадження заходів, будівля скоротить свої споживання тепла на 86% та забезпечить безперервним живленням критично важливі частини будівлі.

**Перелік посилань:**

1. DesignBuilder Software Ltd - Tutorials. DesignBuilder Software Ltd - Home. URL: <https://www.designbuilder.co.uk/training/online-learning/tutorials> (date of access: 22.03.2024).

<sup>1</sup> Аспірант 3 курсу Гурєєв М.В.

<sup>1</sup> Доц., к.т.н. Білоус І.Ю.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=USpfruwAAAAJ>

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

## ДИНАМІЧНЕ ЕНЕРГЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ БАЛАНСІВ БУДІВЕЛЬ

**Постановка проблеми та її актуальність.** Енергетична ефективність є однією з найважливіших проблем, які стоять перед будівельною галуззю сучасності. Зростання використання енергетичних ресурсів та збільшення витрат на опалення та охолодження будівель призводить до значного збільшення емісії шкідливих речовин у атмосферу, що негативно впливає на екологічну ситуацію в Україні. Також, зростання витрат на енергоресурси призводить до збільшення витрат на оплату комунальних послуг та зменшення конкурентоспроможності економіки країни. Тому, розробка та впровадження енергоефективних технологій та розрахунків є актуальною задачею для нашого суспільства.

**Формулювання мети.** Метою даної роботи є використання динамічного енергетичного моделювання для дослідження енергетичних балансів будівель в Україні. Для цього будуть враховані такі фактори, як повітрообмін, сонячні теплонадходження, масивність матеріалів стін та режим роботи системи опалення. Це дозволить зрозуміти вплив цих факторів на теплові баланси та теплові перетоки в будівлях та розробити рекомендації щодо покращення енергоефективності будівель в Україні з врахування мінливості внутрішніх і зовнішніх умов.

**Об'єкт дослідження.** Для дослідження була взята існуюча 12 поверхова будівля 1993 року забудови. Об'єкт розташований у Солом'янському районі у м. Києві. Будівля була побудована за індивідуальним проектом. У будівлі 175 квартир з загальною кількістю житлових кімнат – 431 [1].

Стіни будівлі самонесучі виконані з керамічної пустотілої цегли. На фасаді присутнє клаптикове утеплення проведене за індивідуальною ініціативою власників квартир. Вікна металопластикові з подвійним склінням в своїй більшості (80%) проте в деяких квартирах зустрічаються й однокамерні металопластикові або вікна з дерев'яними рамами (20%). Опір теплопередачі зовнішніх стін будівлі –  $1,12 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$ .

Горизонтальні перекриття між квартирами прийнято з залізобетонної плити 220 мм, оштукатуреної з однієї сторони, облаштоване звукоізоляцією та підлоговим перекриттям. Опір теплопередачі перекриття –  $0,572 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$ .

Внутрішні міжкімнатні стіни прийняті з цегляної кладки, товщиною 125 мм (півцегли), оштукатурені з обох сторін. Опір теплопередачі перекриття –  $0,4 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$ . Характеристики оболонки будівлі представлені на рисунку 1.

Для проведення досліджень було обрано репрезентативну кімнату в одній із центральних квартир на 4-му поверсі і прилеглі до неї приміщення.

**Основна частина.** Динамічне енергетичне моделювання є ефективним інструментом для дослідження енергетичних балансів будівель, яке дозволяє розрахувати теплові баланси та теплові перетоки в будівлі в залежності від різних факторів, таких як наявність утеплення, якість вікон, тип системи опалення та інші. Динамічне моделювання базується на принципах теплофізики та теплопередачі, що дозволяє точно враховувати всі фактори, що впливають на енергетичні баланси будівель.

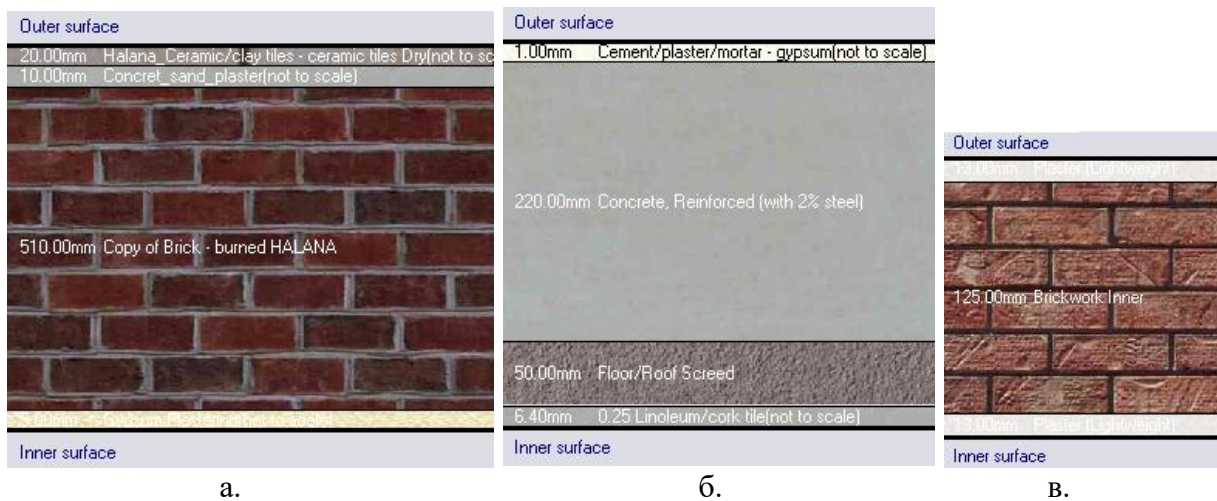


Рисунок 1 – Склад огорожувальних конструцій кімнати: а – зовнішніх стін; б – внутрішнього горизонтального перекриття; в – внутрішніх стін між квартирами

У даній роботі проведено дослідження енергетичних балансів будівель з використанням динамічного енергетичного моделювання з програмного забезпечення DesignBuilder [2], який синхронізований з програмним середовищем EnergyPlus [3]. Для цього використані дані про будівлі в Україні, такі як кліматичні умови, розміри, матеріали стін та вікон, характеристики систем опалення та інші. Загальний алгоритм створення і налаштування енергетичних моделей показаний у блок-схемі на рисунку 2 [1].

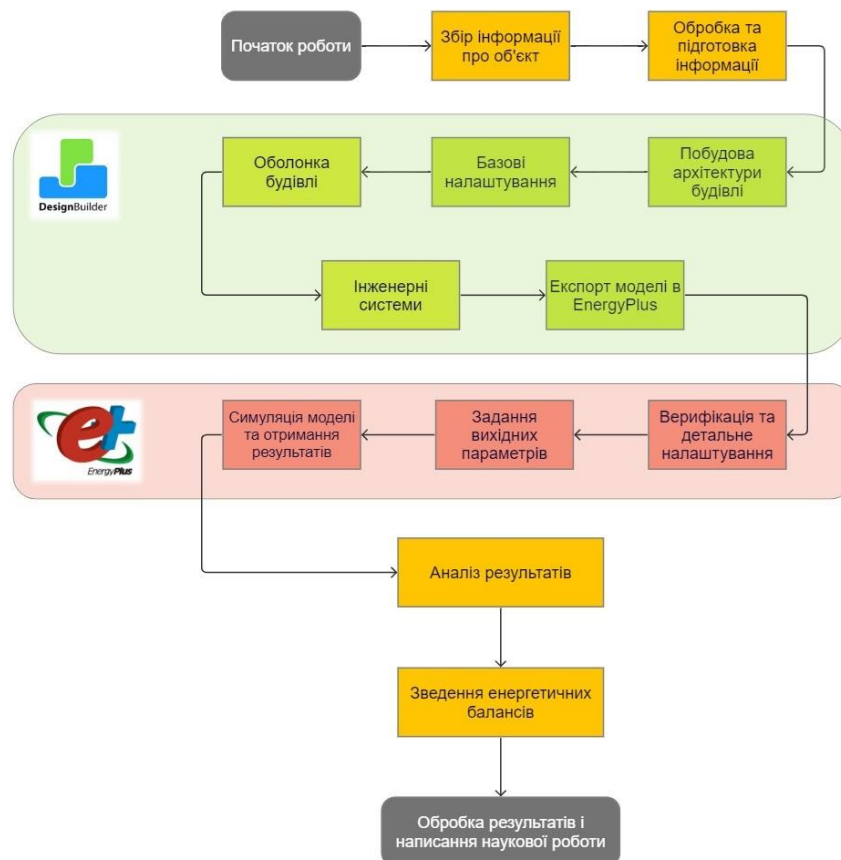


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму створення енергетичної моделі

У дослідженні отримані результати про теплові баланси (Рис. 3) та теплові перетоки в будівлях. Дані були порівняні з енергетичними стандартами та нормами, що діють в Україні.

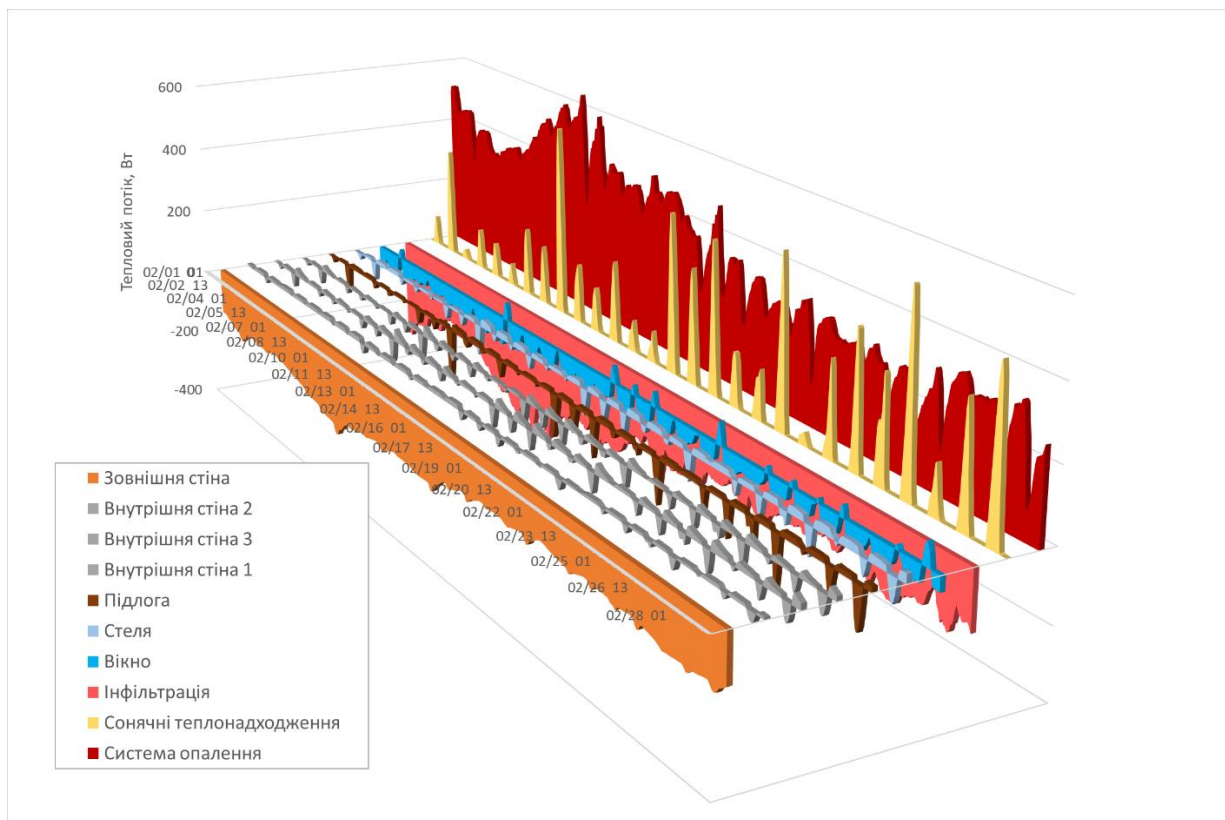


Рисунок 3 – Тепловий баланс

**Висновки.** Динамічне енергетичне моделювання є ефективним інструментом для дослідження енергетичних балансів будівель. Воно дозволяє врахувати різні фактори, що впливають на енергетичні баланси, та розрахувати їх вплив на експлуатаційні витрати будівель. Результати даного дослідження дають змогу зрозуміти, які фактори найбільше впливають на енергетичні баланси будівель в Україні та яким чином можна покращити енергоефективність будівель.

Таким чином, використання динамічного енергетичного моделювання є важливим інструментом для розробки енергоефективних технологій та рекомендацій щодо покращення енергетичних балансів будівель в Україні. Застосування такого підходу дозволить зменшити емісію шкідливих речовин у атмосферу та знизити витрати на оплату комунальних послуг, що є важливим кроком у забезпеченні екологічної та економічної стійкості країни.

**Перелік посилань:**

1. Дешко В. І., Білоус І. Ю., Гурсев М. В. Вентиляція як складова енергетичного динамічного балансу в будівлях. *Technologies and Engineering*. 2024. № 1. С. 25–39. URL: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.1.3> (дата звернення: 24.03.2024).
2. Офіційний сайт Design Builder Energy Simulation Software. URL: <https://designbuilder.co.uk/> (дата звернення: 24.03.2024).
3. EnergyPlus Energy Simulation Software. URL: <https://energyplus.net> (дата звернення: 24.03.2024).

## ЗМІСТ

<b>СЕКЦІЯ №1 АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА</b>	<b>3</b>
<b>Система охолодження контейнерів сухого сховища відпрацьованого ядерного палива на основі двофазних термосифонів.</b>	<b>4</b>
<i>БЕДІК В.О., магістрант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Кравець В.Ю.</i>	
<b>Стратегія зменшення радіаційного навантаження на корпус реактора та внутрішньокорпусні пристрої ВВЕР-1000.</b>	<b>6</b>
<i>ГОДУНОК Б.В., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Коньшин В.І.</i>	
<b>Використання штучного інтелекту для управління ядерними реакторами</b>	<b>8</b>
<i>ГОЛЬОНКО О.В., магістрант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Кравець В.Ю.</i>	
<b>Застосування та розробка термосифонів для системи охолодження відпрацьованого ядерного палива.</b>	<b>11</b>
<i>ГУПАЛО М.Б., магістрант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Кравець В.Ю.</i>	
<b>Інцидент на АЕС Пакш в 2003 році.</b>	<b>14</b>
<i>Данілов В.О., магістрант</i>	
<i>Керівник - к.т.н. Овдієнко Ю.М.</i>	
<b>Інтенсифікація конвективного теплообміну в умовах надзвукових течій.</b>	<b>17</b>
<i>КОЛОДІЙ Н.О., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., к.т.н. Воропаєв Г.О.</i>	
<b>Проблематика моделювання пасивних систем за допомогою теплогідравлічних кодів.</b>	<b>19</b>
<i>КОРНІЛОВ О.М., магістрант</i>	
<i>Керівник - ст.викл., к.т.н. Сахно О.В.</i>	
<b>Аналіз повітрообміну Нового Безпечного Конфайнменту з оточуючим середовищем.</b>	<b>22</b>
<i>КРУКОВСЬКИЙ Г.П., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Шевель Є.В.</i>	
<b>Оцінка технічного стану арматури АЕС, переведеної в ремонт за технічним станом.</b>	<b>24</b>
<i>ПЕТРОВСЬКИЙ М.Є., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Філатов В.І.</i>	
<b>Огляд звіту з аналізу експлуатаційних подій на українських атомних електростанціях за 2022 рік.</b>	<b>26</b>
<i>ПЕЧЕРИЦЯ І.О., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Клевцов С.В.</i>	
<b>Аналіз можливості зниження консерватизму результатів моделювання старіння для переоцінки кваліфікаційного терміну атомних електростанцій.</b>	<b>28</b>
<i>ПРИГОДА Н.А., магістрант</i>	
<i>Керівник - ст.викл., к.т.н. Сахно О.В.</i>	
<b>Обґрунтування зняття з експлуатації АЕС з ВВЕР.</b>	<b>30</b>
<i>САМЧУК М.Б., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Філатов В.І.</i>	
<b>Аналіз параметрів і характеристик сейсмічної небезпеки майданчиків АЕС.</b>	<b>33</b>

<i>СТЕЦЮК А.Б., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Сахно О.В.</i>	
<b>Вплив енергонавантаження ТВЗ ВВЕР на її радіаційні характеристики.</b>	35
<i>ФОМІНА І.С., магістрант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Носовський А.В.</i>	
<b>Активність і залишкове енерговиділення відпрацьованого ядерного палива ВВЕР-1000.</b>	37
<i>ШЕВАНОВ А.Р., магістрант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Носовський А.В.</i>	
<b>Обґрунтування ефективності автоматизованого алгоритму управління аварією "теча з першого контуру в другий" на реакторній установці з реактором ВВЕР-10.</b>	40
<i>КОРЧУН В.В., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Коньшин В.І.</i>	
<b>Аналіз надійності персоналу при експлуатації атомних електростанцій.</b>	42
<i>ФЕДОТОВ В.В., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Клевцов С.В.</i>	
<b>Аналіз можливості використання КПРВ для переробки та підготовки до поховання РАВ утворених при знятті з експлуатації АЕС.</b>	45
<i>ШАХНЮК Е.В., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Філатов В.І.</i>	
<b>Кваліфікація систем безпеки в екстремальних умовах експлуатації ядерних установок із реакторами ВВЕР-1000 .</b>	47
<i>ОСТАПОВЕЦЬ М.О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Шевель Є.В.</i>	
<b>Виробництво водню з використанням атомної енергетики.</b>	49
<i>ТОПАЛ А.О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Лебедь Н.Л.</i>	
<b>СЕКЦІЯ №2 ЯДЕРНА ЗАХИЩЕНІСТЬ ТА НЕРОЗПОВСЮДЖЕННЯ</b>	52
<b>Фізична ядерна безпека під час збройних конфліктів.</b>	53
<i>БОРЗЕНКОВ В.В., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Бібік Т.В.</i>	
<b>Комплекс протидії бпла в складі системи фізичного захисту атомних електричних станцій.</b>	56
<i>ГОНЧАРУК В.Г., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Бібік Т.В.</i>	
<b>Використання методології розрахунку ІАБ для оцінки вразливості системи фізичного захисту на етапі її проектування.</b>	59
<i>КОЗЛОВ А.Є., магістрант</i>	
<i>Керівник - асист. Остапенко І.А.</i>	
<b>Методологія визначення часу затримки правопорушника системами фізичного захисту АЕС.</b>	62
<i>ПОДУСТОВ О.М., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Бібік Т.В.</i>	
<b>Контроль та облік радіоактивних відходів у вигляді відпрацьованих джерел іонізуючого випромінювання.</b>	65
<i>ШТИЛЬ О.В., магістрант</i>	
<i>Керівник - асист. Остапенко І.А.</i>	
<b>Оцінка загроз як складова фізичної ядерної безпеки.</b>	67



САМСОНЕНКО А.В., аспірант  
Керівник - проф., д.т.н. Письменний Є.М.

<b>СЕКЦІЯ №3 ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНІ ПРОЦЕСИ В ТЕПЛО- І ПАРОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВКАХ</b>	69
<b>Pulsating heat pipe sensitivity to space orientation: Zone Length and Heat Carrier Influence.</b>	70
<i>MANE K.V., postgraduate</i> <i>Academic leader - sn.res.fellow, cand.eng.sc. Alekseik Y..</i>	
<b>Візуалізація процесу формування теплового та гідродинамічного примежового шару в умовах вільної конвекції.</b>	73
<i>ЛПІНІЦЬКИЙ Л.В., аспірант; МЕЛЬНИК Р.С., мол. вчений</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Лебедь Н.Л.</i>	
<b>Аналіз можливостей модернізації котла ГМ-50-14 з метою зменшення утворення оксидів азоту.</b>	75
<i>ЛОГВИНЮК М.О., аспірант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Новаківський Є.В.</i>	
<b>Розроблення технології виробництва штучного метану з відходів та біомаси.</b>	78
<i>НОВОСАД Ю.І., аспірант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Воробйов М.В.</i>	
<b>Вплив геометричних факторів на теплопередавальні характеристики двофазного термосифону.</b>	80
<i>ШЕПЕЛЬ Г.С., мол. вчений</i> <i>Керівник - проф., д.т.н. Кравець В.Ю.</i>	
<b>Визначення площ протічок повітря назовні Нового Безпечного Конфайнменту ЧАЕС.</b>	83
<i>ГНАТЕНКО А.В., магістрант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Воробйов М.В.</i>	
<b>Тема доповіді: Зниження викидів NOx за допомогою спеціальних пальників.</b>	86
<i>ДЖАББОРОВ В.А., магістрант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Філатов В.І.</i>	
<b>Аналіз ефективності роботи водогрійного котла на газових паливах різного походження.</b>	88
<i>ПАВЛАЧИК В.С., магістрант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Воробйов М.В.</i>	
<b>Принцип отримання і перспективи практичного застосування супергідрофобних поверхонь при конденсації.</b>	90
<i>АНДРСЄЧКІН А.А., бакалаврант; ПЛЕТЕНЬ М.Д., бакалаврант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Гавриш А.С.</i>	
<b>Основні закономірності механізму процесу конденсації. Криві конденсації.</b>	93
<i>ПЛЕТЕНЬ М.Д., бакалаврант; АНДРСЄЧКІН А.А., бакалаврант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Гавриш А.С.</i>	
<b>Заміщення природного газу на біомасу шляхом її спалювання у вихровому передтопку.</b>	96
<i>КОРЯЧКО М.В., бакалаврант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Новаківський Є.В.</i>	
<b>Заміщення антрациту в паровому котлі на альтернативний вид твердого палива.</b>	98

<i>БЕЛЬМАС В.В., бакалаврант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Шевель Є.В.</i>	
<b>Застосування рециркуляції газів в парових котлах.</b>	101
<i>ЄВТУШОК В.А., бакалаврант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Новаківський Є.В.</i>	
<b>Інтенсифікація теплообміну в газо-рідинних теплообмінниках БКЗ-75-39-ФБ.</b>	103
<i>ІВАНЬКО Д.О., бакалаврант</i> <i>Керівник - проф., д.т.н. Сорокова Н.М.</i>	
<b>Фізико-хімічні і конструкційні особливості анаеробного бродіння.</b>	105
<i>ГОРШКОЛЄПОВ Я.В., магістрант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Новаківський Є.В.</i>	
<b>СЕКЦІЯ № 4 СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ТЕПЛОВІЙ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ</b>	107
<b>Дослідження теплового та напружено-деформованого стану ротора середнього тиску турбіни К-200-130 при пуску з холодного стану металу.</b>	108
<i>ЛІЩУК С.Р., аспірант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Пешко В.А.</i>	
<b>Вплив притискних зусиль в фланцях турбіни на напружено-деформований стан.</b>	111
<i>ДЖЕЖУЛЕЙ В.О., магістрант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Пешко В.А.</i>	
<b>Вплив пускового графіка енергоблока на тепловий стан ротора парової турбіни .</b>	113
<i>КОНОВАЛЮК О.Л., аспірант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Пешко В.А.</i>	
<b>Перспективи впровадження аміачного палива в енергетику України.</b>	116
<i>ШАХБАЗОВ І.О., аспірант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Сірий О.А.</i>	
<b>Ідентифікація газового факелу засобами й методами комп'ютерного зору.</b>	119
<i>АРЗІКУЛОВ Т.С., аспірант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Баган Т.Г.</i>	
<b>Кількісні показники шкідливих викидів при спалюванні викопного палива.</b>	121
<i>БУДЯ Ю.С., магістрант</i> <i>Керівник - ст.викл., к.т.н. Шелешей Т.В.</i>	
<b>Особливості стабілізації полум'я в струменево-нішовій системі горіння палива.</b>	124
<i>ДУЛЬСЬКИЙ А.І., аспірант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Сірий О.А.</i>	
<b>Чисельне моделювання характеристик міцності пластинчастого теплообмінного апарату.</b>	127
<i>МІТРОШИН А.В., магістрант</i> <i>Керівник - доц., к.т.н. Рачинський А.Ю.</i>	
<b>Використання біогазу в енергетиці України.</b>	129
<i>РАКУТА І.О., бакалаврант</i> <i>Керівник - асист., д.ф.-м.н. Власенко О.В.</i>	
<b>Види відходів для біомаси.</b>	132
<i>РАКУТА І.О., бакалаврант</i>	

<i>Керівник - асист., д.ф.-м.н. Власенко О.В.</i>	
<b>Стендові випробування двозонної камери згоряння.</b>	135
<i>РУДИК М.А., магістрант; ДОРОСЕВИЧ В.С., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Бутовський Л.С.</i>	
<b>Дослідження впливу домішки водню на горіння сумішних з воднем палив в струменево-нішевому стабілізаторі.</b>	138
<i>СТОРОЖУК М.С., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Сірий О.А.</i>	
<b>Показники викиду окислу вуглецю та оксидів азоту котла КВГМ-20 при використанні струменево-нішевої технології.</b>	141
<i>ЮРЧУК В.С., магістрант; ШЕЛЕШЕЙ Т.В., мол. вчений</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Абдулін М.З.</i>	
<b>Процеси утворення оксидів азоту при спалюванні водневого палива.</b>	144
<i>МІТЧЕНКО І.О., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Романова К.О.</i>	
<b>Вібраційна діагностика втомних пошкоджень лопаток турбін.</b>	146
<i>НОСАЛЬ О.Ю., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Бовсуновський А.П.</i>	
<b>Вдосконалення проектування індивідуальних систем тепlopостачання для житлових теплових пунктів м. Києва.</b>	149
<i>НІКОЛЕНКО М.М., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - асист., д.ф.-м.н. Власенко О.В.</i>	
<b>Проектування газогенераторів малої потужності.</b>	152
<i>СТЕПАНЧЕНКО А.А., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Риндюк Д.В.</i>	
<b>Математична модель повітряного циклона для газогенератора малої потужності.</b>	155
<i>СТЕПАНЧЕНКО А.А., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Риндюк Д.В.</i>	
<b>Визначення оптимальних конструктивних параметрів повітряного циклона для газогенератора малої потужності.</b>	157
<i>СТЕПАНЧЕНКО А.А., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Риндюк Д.В.</i>	
<b>СЕКЦІЯ №5 ПРОБЛЕМИ ТЕОРЕТИЧНОЇ І ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛОТЕХНІКИ</b>	160
<b>Уловлення вуглекислого газу у відцентровому апараті.</b>	161
<i>ЗАБОЛОТНИЙ О.А., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Соломаха А.С.</i>	
<b>Дослідження ефективності підігріву води та повітря в термічній опріснювальній установці.</b>	164
<i>ПОДСТЄВАЯ Т.Л., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Серєда В.В.</i>	
<b>Експериментальне дослідження залежності теплопродуктивності котла малої потужності від складу водоемульсійного палива.</b>	166
<i>ЯРОШЕВИЧ М.В., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Соломаха А.С.</i>	
<b>Енергетична ефективність утилізації теплоти димових газів котелень.</b>	168
<i>КАМИШНИЙ Б.М., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Боженко М.Ф.</i>	

<b>Техніко-економічний аналіз прямого захоплення повітря в кліматичних умовах України..</b>	170
<i>СКРИПНИК П.В., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Серета В.В.</i>	
<b>Щодо визначення загальної глибини свердловин в ґрунтовому акумуляторі теплоти сонячної інсоляції для теплонасосної системи опалення.</b>	173
<i>СЛІЖЕВСЬКИЙ К.Д., магістрант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Безродний М.К.</i>	
<b>Визначення загальної площі сонячних колекторів для теплонасосної системи опалення з використанням акумуляованої сонячної інсоляції в ґрунті .</b>	176
<i>СЛІЖЕВСЬКИЙ К.Д., магістрант; МАТУСЕВИЧ Х.Б., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Притула Н.О.</i>	
<b>Термомодернізація будівель - сучасні ізоляційні матеріали.</b>	179
<i>МЕЛЬНИЧЕНКО І.О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Боженко М.Ф.</i>	
<b>Системи панельно-променевого опалення в індивідуальних житлових будинках.</b>	181
<i>МІТЛЕНКО М.В., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Боженко М.Ф.</i>	
<b>Шляхи подолання технічних бар'єрів впровадження теплонасосних технологій у системах централізованого теплопостачання.</b>	183
<i>ЧЕШКО О.О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Притула Н.О.</i>	
<b>СЕКЦІЯ №6 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ ТА ІНЖИНІРИНГ</b>	186
<b>Підвищення енергоефективності адміністративно-лабораторного корпусу за рахунок використання відновлювальних джерел енергії.</b>	187
<i>БАБІЧ Т.М., магістрант</i>	
<i>Керівник - ст.викл., к.т.н. Буяк Н.А.</i>	
<b>Використання альтернативних джерел енергії для енергозабезпечення ліцею.</b>	190
<i>БЄЛИК С.Р., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Шкляр В.І.</i>	
<b>Огляд будівель з статусом nZEB в різних країнах.</b>	193
<i>КРАМАРЕНКО С.О., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Білоус І.Ю.</i>	
<b>Використання курячого посліду для біогазової установки птахофабрики.</b>	196
<i>МАРУЩАК Д.В., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Дубровська В.В.</i>	
<b>Підвищення енергоефективності навчального корпусу №27 НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського" за рахунок використання відновлювальних джерел енергії.</b>	198
<i>МИШКО В.М., магістрант</i>	
<i>Керівник - ст.викл., к.т.н. Буяк Н.А.</i>	
<b>Підвищення енергоефективності та комфортних умов лікарні за рахунок використання відновлювальних джерел енергії.</b>	201
<i>ОВАДА Н.О., магістрант</i>	
<i>Керівник - ст.викл., к.т.н. Буяк Н.А.</i>	

<b>Концепція підвищення рівня енергоефективності будівлі новостворюючого хабу в м.Славутич.</b>	204
<i>ПИХТАРЬ Р.М., магістрант; ПИХТАР М.П., Керівник - доц., к.т.н. Білоус І.Ю.</i>	
<b>Аналіз підходів до оцінки рівня енергоефективності громадської будівлі з використанням інструментів моделювання.</b>	207
<i>РОЗУМНА Д.О., магістрант Керівник - доц., к.т.н. Суходуб І.О.</i>	
<b>Оцінювання енергетичної надійності енергозабезпечення об'єкту критичної інфраструктури.</b>	210
<i>ТОЧИНСЬКИЙ .Р., магістрант Керівник - доц., к.т.н. Білоус І.Ю.</i>	
<b>Динамічне енергетичне моделювання для дослідження енергетичних балансів будівель.</b>	212
<i>ГУРСЄВ М.В., аспірант Керівник - доц., к.т.н. Білоус І.Ю.</i>	

## ПОКАЖЧИК АВТОРІВ ДОКЛАДІВ

- Alekseik Y. 70  
Mane K.V. 70  
Абдулін М.З. 141  
Андреечкін А.А. 90,93  
Арзікулов Т.С. 119  
Бабіч Т.М. 187  
Баган Т.Г. 119  
Бедік В.О. 4  
Безродний М.К. 173  
Бельмас В.В. 98  
Белик С.Р. 190  
Бібік Т.В. 53,56,62  
Білоус І.Ю. 193,204,210,212  
Бовсуновський А.П. 146  
Боженко М.Ф. 168,179,181  
Борзенков В.В. 53  
Будя Ю.С. 121  
Бутовський Л.С. 135  
Буяк Н.А. 187,198,201  
Власенко О.В. 129,132,149  
Воробйов М.В. 78,83,88  
Воропаєв Г.О. 17  
Гавриш А.С. 90,93  
Гнатенко А.В. 83  
Годунок Б.В. 6  
Гольонко О.В. 8  
Гончарук В.Г. 56  
Горшколепов Я.В. 105  
Гупало М.Б. 11  
Гурєєв М.В. 212  
Данілов В.О. 14  
Джабборов В.А. 86  
Джежулей В.О. 111  
Доросевич В.С. 135  
Дубровська В.В. 196  
Дульський А.І. 124  
Євтушок В.А. 101  
Заболотний О.А. 161  
Іванько Д.О. 103  
Камишний Б.М. 168  
Клевцов С.В. 26,42  
Козлов А.Є. 59  
Колодій Н.О. 17  
Коновалюк О.Л. 113  
Коньшин В.І. 6,40  
Корнілов О.М. 19  
Корчун В.В. 40  
Корячко М.В. 96  
Кравець В.Ю. 4,8,11,80  
Крамаренко С.О. 193  
Круковський Г.П. 22  
Лебедь Н.Л. 49,73  
Ліпницький Л.В. 73  
Ліщук С.Р. 108  
Логвинюк М.О. 75  
Марущак Д.В. 196  
Матусевич Х.Б. 176  
Мельник Р.С. 73  
Мельниченко І.О. 179  
Мишко В.М. 198  
Мітленко М.В. 181  
Мітрошин А.В. 127  
Мітченко І.О. 144  
Ніколенко М.М. 149  
Новаківський Є.В. 75,96,101,105  
Новосад Ю.І. 78  
Носаль О.Ю. 146  
Носовський А.В. 35,37  
Овада Н.О. 201  
Овдієнко Ю.М. 14  
Остапенко І.А. 59,65  
Остаповець М.О. 47  
Павлачик В.С. 88  
Петровський М.Є. 24  
Печериця І.О. 26  
Пешко В.А. 108,111,113  
Письменний Є.М. 67  
Пихтар М.П. 204  
Пихтарь Р.М. 204  
Плетень М.Д. 90,93  
Подстєвая Т.Л. 164  
Подустов О.М. 62  
Пригода Н.А. 28  
Притула Н.О. 176,183  
Ракута І.О. 129,132  
Рачинський А.Ю. 127  
Риндюк Д.В. 152,155,157  
Розумна Д.О. 207  
Романова К.О. 144  
Рудик М.А. 135  
Самсоненко А.В. 67  
Самчук М.Б. 30  
Сахно О.В. 19,28,33  
Середа В.В. 164,170  
Сірій О.А. 116,124,138  
Скрипник П.В. 170  
Сліжевський К.Д. 173,176  
Соломаха А.С. 161,166  
Сорокова Н.М. 103  
Степанченко А.А. 152,155,157

Стецюк А.Б. 33  
Сторожук М.С. 138  
Суходуб І.О. 207  
Топал А.О. 49  
Точинський .Р. 210  
Федотов В.В. 42  
Філатов В.І. 24,30,45,86  
Фоміна І.С. 35  
Чешко О.О. 183  
Шахбазов І.О. 116

Шахнюк Е.В. 45  
Шеванов А.Р. 37  
Шевель Є.В. 22,47,98  
Шелешей Т.В. 121,141  
Шепель Г.С. 80  
Шкляр В.І. 190  
Штиль О.В. 65  
Юрчук В.С. 141  
Ярошевич М.В. 166

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р.  
просп. Перемоги, 37,  
м. Київ, 03056

Підп. до друку 09.05.2023. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офс. Гарнітура Times.  
Спосіб друку – електрографічний. Ум. друк. арк. 14,88. Обл.-вид. арк. 19,03. Наклад 13 пр.  
Поз. 23-3-3-002. Зам. № 23-027.

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