

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

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ НАУКОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ

У 2-х томах

Том 1

Матеріали XXII Міжнародної
науково-практичної конференції
молодих вчених і студентів
м. Київ, 22–25 квітня 2025 року



Київ – 2025

УДК 620.9(062)+621.311(062)

С91

Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. У 2-х т. : Матеріали XXII Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і студ., м. Київ, 22–25 квіт. 2025 р. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2025. – Т. 1. – 215 с.

ISBN 978-966-990-152-1 (Заг.)

ISBN 978-966-990-153-8 (Т. 1)

Подано тези доповідей XXII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» за такими напрямками: атомна енергетика, ядерна захищеність та нерозповсюдження, теплогідрравлічні 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, проф.

В.О. Туз, д-р техн. наук, проф.

В.А. Волощук, д-р техн. наук, проф.

В.В. Середа, канд. техн. наук, доц.

П.П. Меренгер, ст. викл.

Н.А. Буюк, канд. техн. наук, доц.

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.

Н.В. Федорова, д-р техн. наук, проф.

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 № 10 від 31 березня 2025 р.)*

ISBN 978-966-990-152-1 (Заг.)

ISBN 978-966-990-153-8 (Т. 1)

© Автори тез доповідей, 2025

© КПІ ім. Ігоря Сікорського (НН ІАТЕ), 2025

Пленарні доповіді

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ СУПРОВІД ТРАДИЦІЙНОЇ ТА АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

В останні роки, підтримуючи ініціативи розвинених країн зі зменшення викидів парникових газів, керівництво України оголошувало про повне закриття теплової енергетики спочатку до 2050, потім до 2035, нарешті до 2030 року. Проте вже у 2020-2021 роках виявилось, що в умовах зростання частки нездатних до регулювання навантаження атомної та відновлювальної генерації та високої собівартості «зеленої» енергії вугільна енергетика залишається важливою для України як елемент системи регулювання режимів енергосистеми та чинник забезпечення прийнятної ціни на електроенергію [1, 2].

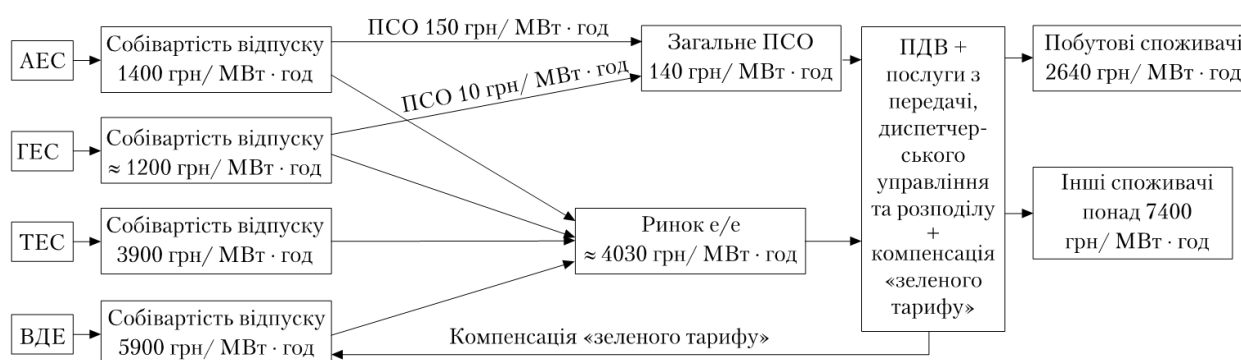


Рисунок 1 – Співвідношення собівартості електроенергії з різних джерел та схема формування ринкової ціни і тарифів для споживачів на початку 2023 р. [2]

Повномасштабна російська агресія виявила критично важливу роль теплової енергетики в енергопостачанні та регулюванні навантаження в енергосистемі країни (рис. 2). З урахуванням значних руйнувань всіх видів генерації внаслідок ворожих обстрілів вкрай актуальною стала задача безперебійного функціонування неушкоджених та відновлення пошкоджених потужностей вугільних ТЕС і ТЕЦ із забезпеченням виконання ними регулювальних функцій. Оскільки тепла енергетика теж зазнала значних втрат і руйнувань, вимоги до безперебійного функціонування та діапазону регулювання навантаження вцілілих та відновлених потужностей ТЕС і ТЕЦ стали ще жорсткішими.

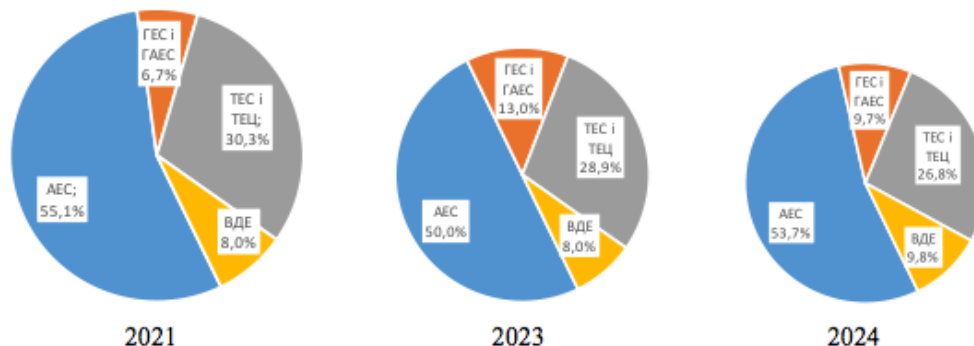


Рисунок 2 – Частка вироблення енергії по видах генерації [3]

Але традиційна вугільна енергетика має й свої серйозні проблеми. Це скорочення вітчизняної паливної бази, що змушує використовувати імпортоване вугілля з характеристиками, які відрізняються від проєктних вимог котлоагрегатів, та фізичне

зношення, яке збільшує частоту технологічних порушень та звужує фактичний діапазон регулювання навантаження котлоагрегатів. Так, на початку 2022 року раніше переведені на газове вугілля енергоблоки 300 МВт Трипільської ТЕС могли видавати максимум 240 МВт, а розриви екранних труб топки траплялись кілька разів на тиждень. Котли Черкаської ТЕЦ теж мали обмеження потужності – не більше 80 % від номінальної, і звичайним явищем були технологічні порушення внаслідок тління пилу у вхідних соплах циклонних передтопків.

На підставі випробувань та розрахунків в роботах ІТЕТ НАН України доведено, що для збільшення регульованих можливостей необхідно впровадити заходи як зі зниження нижньої межі навантаження, так і з усунення обмежень по верхній межі навантаження енергоблоків ТЕС та котлоагрегатів ТЕЦ. Обґрунтовано, що необхідною умовою надійності та ефективності роботи пилосистем і котлоагрегатів є належна якість палива, яку у випадку надходження вугілля з характеристиками, відмінними від проєктних вимог котлів, слід забезпечити виготовленням на складі електростанцій паливних сумішей із заданими показниками. Показано, що верхню межу навантаження обмежують недостатня продуктивність пилосистем та співвідношення «тяги-дутьтя-присмоктя/перетоки в повітропідігрівнику», нижню – перегрів металу топкових екранів за рахунок перекосів і затування факелу та недостатньої теплопередачі від металу до пароводяного середовища. Обґрунтовано, що для забезпечення належної продуктивності пилосистем слід замість окремого розгляду розмельної продуктивності млина розглядати систему «млин-сепаратор», і доведено, що основним чинником обмеження продуктивності пилосистем є недостатня витрата сушильного агента через сепаратор, яка обумовлює передрібнення та пересушування пилу. Встановлено, що в пиловугільних котлах основними чинниками збільшення теплового потоку на топкові екрани над запалювальним поясом є перекоси та затування факелу, які виникають внаслідок поєднання нестачі окисника в пальниках з присмоктами повітря по висоті топки та нерівномірністю розподілу пилу та повітря по пальниках. Обґрунтовано, що важливим чинником ризику перегріву металу екранів НРЧ прямооточних пиловугільних котлів на понижених навантаженнях є міжтрубні пульсації внаслідок багатозначності гідравлічної характеристики. Доведено, що багатозначність гідравлічної характеристики виникає не лише при роботі на ковзному тиску, а взагалі на нижній межі навантаження навіть на номінальному тиску внаслідок більш повільного, ніж масової швидкості середовища, зниження теплового потоку на стінки нижньої частини топки при зниженні навантаження котла, знайдено залежності граничної масової швидкості середовища від навантаження котла за різних рівнів тиску та розроблено метод визначення коефіцієнту опору дросельних шайб на вході труб панелей НРЧ для усунення ризику міжтрубних пульсацій в широкому діапазоні регулювання навантаження котла при роботі на номінальному та ковзному тиску. Впровадження рекомендацій, розроблених на основі цих висновків, забезпечило суттєве зниження аварійності та збільшення діапазону регулювання навантаження котлоагрегатів Трипільської ТЕС та Черкаської ТЕЦ.

У 2024 році на Трипільській ТЕС після ворожих обстрілів першим був відновлений антрацитовий котел ТПП-210А блоку 300 МВт ст. № 2. За відсутності антрациту в котлі тривалий час спалювався природний газ, що супроводжувалось термічними розривами екранних труб передтопків. Дослідженнями ІТЕТ було обґрунтовано, що в котлах з напіввідкритою топкою при тривалій роботі на газі торкретне покриття передтопка не захищається гарнісажною плівкою застиглого шлаку та поступово порушується, і в цих місцях відбуваються термічні розриви екранних труб. При невеликій частці пошкоджень футерівки сумарне теплосприйняття передтопка залишається відносно низьким, середня температура газового факелу в ньому є високою, а це створює надвисокий тепловий потік на екранні труби в місцях пошкоджень футерівки. Розрахунково встановлено місця найбільшого ризику перегріву металу, які співпадають з місцями найбільших термічних пошкоджень екранів передтопків котла ТПП-210А Трипільської ТЕС при роботі на газі, та впроваджено технічні рішення, що дозволили мінімізувати аварійність котла.

Оскільки з початком повномасштабної агресії імпорту антрациту та пісного вугілля повністю припинився, постала задача термінового переведення антрацитових котлів ТЕЦ ТОВ «ЄВРО-РЕКОНСТРУКЦІЯ» (Дарницької ТЕЦ м. Києва) на доступне газове вугілля. Цю задачу було вирішено для трьох котлів паропродуктивністю 220 т/год. до початку опалювального сезону 2022-2023, ще одного – до початку опалювального сезону 2023-2024 рр. на основі технічних рішень зі збереження сушки вугілля гарячим повітрям, з переведенням транспорту пилу до пальників на слабопідігріте повітря, зі зменшенням діаметру пилопроводів, застосуванням вирівнюючих опорів для рівномірного розподілу пилу та повітря по пальниках та з маловитратною модернізацією існуючих прямооточних пальників (рис. 3) [4]. Транспорт пилу слабопідігрітим повітрям з тиском більшим, ніж тиск гарячого повітря, забезпечив відсутність умов для займання аеросуміші в пилопроводах та подолання додаткового опору від збільшення швидкості аеросуміші понад 25 м/с. Безперебійна робота Дарницької ТЕЦ стала важливим чинником забезпечення тепло- та енергопостачання Києва в умовах ворожих обстрілів.

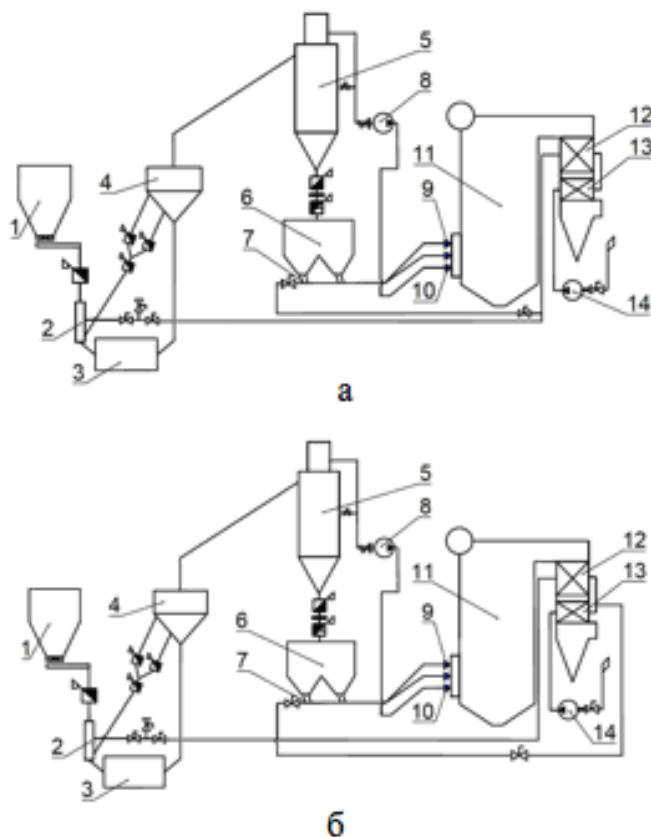


Рисунок 3 – Пилосистема котлів Дарницької ТЕЦ до (а, транспорт пилу гарячом повітрям) та після реконструкції (б, транспорт пилу слабопідігрітим повітрям): 1 – бункер сирого вугілля, 2 – тічка сирого вугілля, 3 – млин, 4 – сепаратор, 5 – циклон, 6 – бункер пилу, 7 – змішувачі пилу, 8 – млиновий вентилятор, 9 – основний пальник, 10 – скидний пальник, 11 – топка, 12 – другий ступінь повітропідігрівника, 13 – перший ступінь повітропідігрівника, 14 – дуттьовий вентилятор

Випробування довели можливість і доцільність зменшення витрати сушильного агента зі зниженням навантаження для оптимізації розподілу витрат окисника між пилосистемою та основними пальниками і показали, що зменшення при цьому продуктивності пилосистем відповідає зменшенню витрати палива при зниженні навантаження, а потоншення помелу компенсує зменшення питомої поверхневої швидкості горіння частинок зі зниженням температури факелу на часткових навантаженнях збільшенням їх реагуючої поверхні. Цей науково новий результат та досвід маловитратної реконструкції Дарницької ТЕЦ були використані при розробленні проєкту переведення на

газове вугілля чотирьох котлів паропроодуктивністю по 210 т/год. Чернігівської ТЕЦ, який планується до реалізації в цьому році. Більш складні технічні рішення, але також з максимальним використанням наявного обладнання та скороченням необхідних термінів виконання, розробляються зараз для переведення на газове вугілля останнього антрацитового котла блоку 300 МВт Трипільської ТЕС.

Не менш важливою є задача створення розподіленої теплової генерації. З урахуванням відсутності інвестиційних можливостей для нового будівництва генеруючих потужностей та дорожчезі природного газу найбільш коротким та ефективним шляхом для цього є реконструкція існуючих газомазутних котлів промислових та комунальних ТЕЦ з їх переведенням на спалювання біомаси – більш дешевого місцевого палива, яке вважається «вуглецево нейтральним» і таким, що забезпечує низькі викиди сірчистого ангідриду за рахунок малого вмісту сірки, а оксидів азоту – за рахунок понижених температур спалювання. З огляду на сезонність надходження відходів біомаси, в якості резервного палива для котлів слід передбачити вугілля та/або торф. Наукове підґрунтя проблеми пов'язане з принциповими відмінностями топкових процесів при спалюванні різних видів відходів біомаси, вугілля та торфу з причини різного виходу летких речовин, різних розмірів, густини частинок та швидкості горіння коксового залишку, температур шлакування поверхонь нагріву, різної питомої витрати продуктів згоряння, тощо. Чинники, що перелічені, призводять до різниці у теплосприйнятті топкових екранів, пароперегрівника, економайзера та повітропідігрівника. Основна складність при спалюванні агробіомаси – високі шлакуючі властивості її золи, які вимагають обмеження температури на виході з топки не більше 850°C та зниження в золі-виносі вмісту недопаленого вуглецю, який спричиняє ризик тління осаджень. Фахівцями ІТЕТ розроблено та впроваджено на ТЕЦ Радехівського та Чортківського цукрових заводів технічні рішення з реконструкції газомазутних котлів БКЗ-75ГМА з їх переведенням на спалювання пелет з лушпиння соняшнику та/або газового вугілля у щільному шарі на механізованій решітці прямого ходу (рис. 4) [5]. Значна різниця цін газу та відходів агробіомаси забезпечила окупність реконструкції за один виробничий сезон 2023-2024 рр.

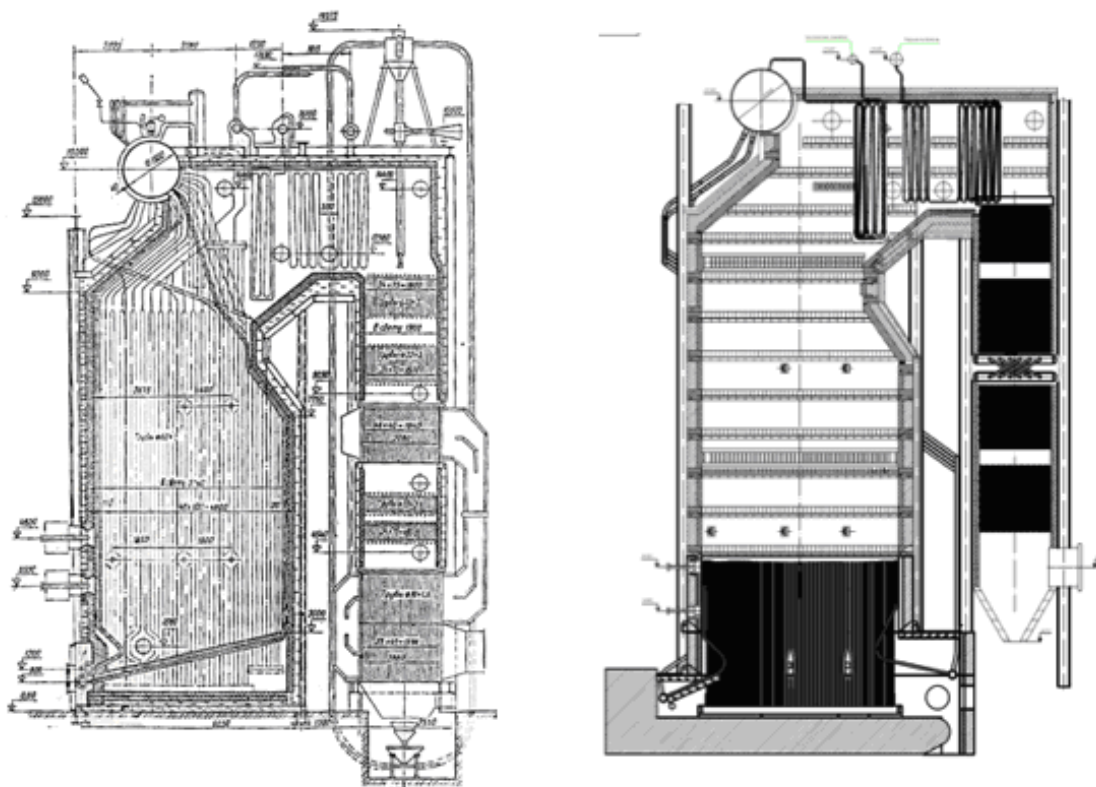


Рисунок 4 – Котел БКЗ-75ГМА Радехівського цукрового заводу до та після реконструкції

В якості палива може застосовуватись сухий гранульований жом цукрових буряків з калорійністю близько 3800 ккал/кг. Енергетичний потенціал цього ресурсу становить понад 270 тис. т умовного палива за сезон переробки, чого достатньо для роботи 14 котлів паропродуктивністю по 50 т/год. протягом 4000 годин на рік. Для спалювання бурякового жому окремо чи спільно з газовим вугіллям або торфом попередньо рекомендується комбіноване факельно-шарове спалювання, яке є найбільш універсальним для спільного спалювання палив з суттєво відмінними властивостями [5].

Таким чином, науково-технічний супровід як традиційної вугільної, так і альтернативної теплової енергетики, в тому числі на відходах агробіомаси, є запорукою стабільного функціонування централізованої та розвитку розподіленої генерації.

Перелік посилань:

1. Чернявський М.В. Стан та перспективи теплової генерації в умовах курсу України на безвуглецеву енергетику. *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 2021, № 4. С. 4–16.
2. Чернявський М.В. Теплові електростанції як елементи системи регулювання режимів енергосистеми України. *Вісник НАН України*, 2024, № 4. С. 45–57.
3. Чернявський М.В. Місце і роль вугільних електростанцій в енергозабезпеченні України на найближчі роки. *XX Міжнар. наук.-практ. конф. «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку»*: Зб. наук. праць. Київ, 2024. – С. 6–12.
4. Чернявський М.В., Мірошніченко Є.С., Провалов О.Ю. Переведення антрацитових котлоагрегатів ТЕЦ на спалювання газового вугілля в умовах воєнного стану. *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 2023, № 3. С. 3–20.
5. Чернявський М.В., Мірошніченко Є.С., Провалов О.Ю., Косячков О.В. Особливості та досвід переведення газомазутних котлів промислових ТЕЦ на спалювання біомаси та газового вугілля. *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 2024, № 3. С. 44–57.
6. Сілашко В.В. Спільне спалювання вугілля та жому цукрових буряків у факельно-шарових котлах ТЕЦ цукрових заводів. *XX Міжнар. наук.-практ. конф. «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку»*: Зб. наук. праць. Київ, 2024. С. 191–1.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

Постановка проблеми та її актуальність. Енергоспоживання в будівлях країн Європейського Союзу, а також України становить приблизно 40 % від загального обсягу первинної енергії [1]. Крім того, викиди CO₂ у цій сфері перевищують 30 % від загального обсягу викидів [1]. Частка енергії, що використовується для теплозабезпечення будівель – набагато вища, ніж для інших цілей [2]. Саме в сфері сконцентровано суттєвий потенціал зменшення споживання викопного палива та зниження негативного впливу на довкілля.

Прорив у розвитку цифрових технологій (збільшення обчислювальних потужностей і зниження їх вартості) дає змогу об'єднати інформаційні технології з операційними процесами і створити так звані цифрові двійники (ЦД) фізичних об'єктів [3, 4]. Заснований на величезному обсязі накопичених даних, отриманих в ході вимірювань цілого ряду показників, та відповідних математичних і комп'ютерних моделях ЦД дає можливість більш точно оцінити та спрогнозувати поведінку об'єкту, швидше виявити можливі дефекти у ньому, більш обґрунтовано запропонувати технічні зміни і, як наслідок, суттєво підвищити ефективність відповідно до вибраних критеріїв.

Аналіз останніх досліджень. В роботі [5] було реалізовано рішення зі зменшення експлуатаційних витрат теплонасосної установки (ТНУ) центральної системи теплозабезпечення (СТ) шляхом оптимізації роботи режимів в режимі реального часу із застосуванням технології ЦД. Це дало можливість зекономити до 5 % експлуатаційних витрат у порівнянні зі існуючою технологією формування режимів роботи.

Автори [6] відстежували деградацію сорбційного матеріалу осушувача всередині адсорбційної холодильної машини за допомогою технології ЦД. Це дало можливість підвищити холодильний коефіцієнт на 8,5 %, 9,5 % та 8,5 % для трьох досліджуваних регіонів, відповідно. Показано, що на відміну від існуючого підходу, оптимізація продуктивності адсорбційного чиллера за допомогою ЦД дала можливість скоротити річне споживання електроенергії до 10,3 %.

В роботі [7] запропоновано модель предиктивного управління, яка інтегрована в ЦД, для регулювання роботи ТНУ в режимі реального часу. Отримані результати показали, що після корекції параметрів на основі даних моніторингу модель ЦД досягла більш точного прогнозування теплової потужності ТНУ і теплового навантаження будівлі (значення ступеня відповідності дорівнювали 0,9574 і 0,9116 відповідно). У порівнянні з існуючим методом управління, запропонована інтелектуальна стратегія оптимального управління на основі ЦД забезпечила зниження енергоспоживання до 15 %.

Автори [8] дослідили напрямки, методології, виклики та можливості ЦД в енергетиці. Подальший розвиток даної технології автори бачать в інтегруванні штучного інтелекту, 5G, IoT, великих даних, хмарних технологій для підвищення ефективності, надійності, можливостей, адаптивності та багатокритеріального прийняття рішень.

На основі огляду літератури автори [4] дійшли висновку, що ЦД мають значний потенціал для підвищення енергоефективності будівель за рахунок можливості реалізації моніторингу в режимі реального часу, прогнозованого технічного обслуговування та прийняття рішень на основі реальних даних. Проведений аналіз результатів існуючих досліджень показав, що за рахунок технології ЦД вдалося підвищити енергоефективність у будівлях на 10...15 % і знизити їх експлуатаційні витрати на 8 %.

Проведений аналіз існуючих робіт показав, що технологія ЦД може успішно застосовуватися для вирішення задач із підвищення ефективності об'єктів та систем енергетики. Зараз є потреба подальшого розвитку та удосконалення методів та засобів застосування цієї технології.

Формулювання мети. Метою роботи є підвищення енергетичної, економічної та екологічної ефективності СТ шляхом обґрунтування за відповідними критеріями її режимних характеристик та розроблення на основі технології ЦД програмно-апаратного комплексу для моделювання сценаріїв модернізації, контролю, моніторингу і діагностики такої системи.

Основна частина.

Завдяки своїм можливостям ЦД може широко використовується в діагностуванні несправностей. В роботі удосконалено підхід та розроблено відповідне програмно-апаратне забезпечення для діагностування погіршення енергоефективності ТНУ на основі ексергетичного аналізу.

На рис. 1 показано фрагмент програмування потоку даних. У нижній частині показано реалізацію у шлюзі IoT. У цьому прототипі дані зчитуються через Modbus з пристрою введення/виводу, підключеного до фізичної системи. Дані, що введені вручну у вигляді таблиці, також можна використовувати для аналізу постфактум. Дані з датчиків обробляються і передаються до вузла запуску моделі. Результати моделі та зібрані дані передаються через WEB Socket в хмару Node-RED. Після цього проаналізовані дані відправляються в InfluxDB для збереження та Dashboard для демонстрації.

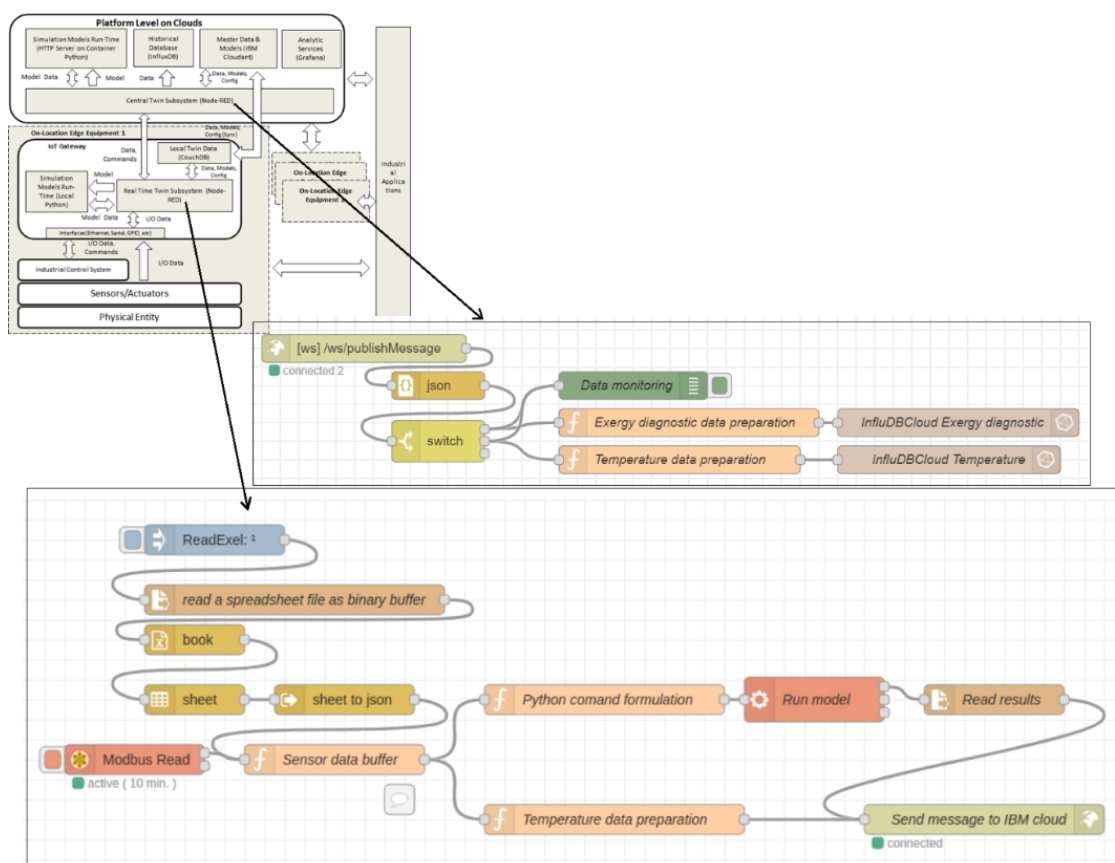


Рисунок 1 – Структура виконавчого засобу діагностики несправностей на основі ЦД

На рис. 2 представлені дані щодо умов роботи досліджуваної ТНУ. У нижньому правому куті можна спостерігати динаміку зміни перепадів температур у пінч-перерізах випарника та конденсатора. Видно, що для обох теплообмінників цей параметр знаходиться в межах від 12 °C до 14 °C. Розрахункові умови випарника та конденсатора відповідають перепадам температур у пінч-перерізах, що дорівнюють 5 °C. Таким чином, через забруднення в теплообмінниках перепади температур збільшуються у порівнянні з їх

проектними характеристиками. Але неможливо визначити, яка несправність має більший вплив на енергоефективність системи. На діаграмі у верхньому лівому куті показано динаміку змін ендогенних частин деструкції ексергії в еталонних і дійсних (з урахуванням відхилень від нормальної роботи) умовах досліджуваної ТНУ. Можна помітити, що лише випарник і конденсатор демонструють зміну ендогенної деструкції ексергії, що чітко вказує на відхилення їх роботи. Крім того, дані чітко вказують на те, що забруднення у випарнику найбільше впливає на зниження енергоефективності ТНУ, а це означає, що очищення або заміна випарника є більш пріоритетним у порівнянні з конденсатором.



Рисунок 2 – Приклад приладової панелі для діагностування несправності теплового насоса на основі поглибленого ексергетичного аналізу

Наступний приклад застосування технології ЦД стосується моніторингу та підвищення ефективності конденсаційного котла в складі СТ.

На рис. 3 наведена розроблена панель керування користувача ЦД.



Рисунок 3 – Головна панель користувача ЦД СТ на базі конденсаційного котла

На рис. 4 наведена динаміка зміни споживання природного газу конденсаційним котлом у реальних та еталонних умовах. Відмінність експериментальних значень витрати газу від еталонних полягає в тому, що перший параметр визначався за показами приладів робочого котла, а другий розраховувався на основі розрахункового ККД котла, оціненого вбудованою моделлю, та замірених значень температури прямої й зворотної води й витрати води системи опалення. Якщо ці дві витрати загалом однакові, то можна стверджувати, що

котел працює без змін своїх характеристик і його реальний ККД залишається рівним еталонному і відображає характеристики котла на початку його експлуатації. В іншому випадку це говорить про необхідність огляду котла, зокрема його поверхонь нагріву, які можуть бути уже достатньо забрудненими.



Рисунок 4 – Динаміка зміни витрати природного газу

В рамках реалізації ЦД СТ конденсаційного котла було передбачено оцінювання рішень із підвищення енергетичної ефективності системи за рахунок переходу на низькотемпературне опалення, застосування переривчастого обігріву та утеплення будівлі. Для цього було розроблено відповідне програмно-апаратне забезпечення та проведено тестування у реальних умовах.

Висновки.

Розроблене програмно-апаратне забезпечення ЦД СТ дає можливість ефективно вирішувати задачі підвищення ефективності таких систем за рахунок моделювання сценаріїв модернізації, удосконалення контролю, моніторингу та діагностики в режимі реального часу.

Перелік посилань:

1. International Energy Agency. (2023) “Energy Efficiency 2023” <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>.
2. Wei, C.; Huang, Y.; Löschel, A. Recent Advances in Energy Demand for Residential Space Heating. *Energy and Buildings* 2022, 261, 111965, doi:10.1016/j.enbuild.2022.111965.
3. Zakharchenko, A.; Stepanets, O. DIGITAL TWIN VALUE IN INTELLIGENT BUILDING DEVELOPMENT. *Adv. Inf. Syst.* 2023, 7, 75–86, doi:10.20998/2522-9052.2023.2.11.
4. Arsecularatne, B.; Rodrigo, N.; Chang, R. Digital Twins for Reducing Energy Consumption in Buildings: A Review. *Sustainability* 2024, 16, 9275, doi:10.3390/su16219275.
5. Aguilera, J.J.; Padullés, R.; Meesenburg, W.; Markussen, W.B.; Zühlsdorf, B.; Elmegaard, B. Operation Optimization in Large-Scale Heat Pump Systems: A Scheduling Framework Integrating Digital Twin Modelling, Demand Forecasting, and MILP. *Applied Energy* 2024, 376, 124259, doi:10.1016/j.apenergy.2024.124259.
6. Chen, W.D.; Hasanien, H.M.; Chua, K.J. Towards a Digital Twin Approach – Experimental Analysis and Energy Optimization of a Multi-Bed Adsorption System. *Energy Conversion and Management* 2022, 271, 116346, doi:10.1016/j.enconman.2022.116346.
7. Zhang, K.; Wu, Q.; Li, H.; Zhang, R.; Li, J.; Jiang, F.; Liu, L. Intelligent Optimal Control Strategy of Heat Pump System Based on Digital Twins. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2023, 2452, 012029, doi:10.1088/1742-6596/2452/1/012029.
8. Do Amaral, J.V.S.; Dos Santos, C.H.; Montevechi, J.A.B.; De Queiroz, A.R. Energy Digital Twin Applications: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2023, 188, 113891, doi:10.1016/j.rser.2023.113891.

ОСВІТА ДЛЯ КЛІМАТИЧНО НЕЙТРАЛЬНОГО МАЙБУТНЬОГО: РОЛЬ ЕНЕРГО-ІННОВАЦІЙНОГО ХАБУ КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО У ПІДГОТОВЦІ НОВОГО ПОКОЛІННЯ ФАХІВЦІВ З ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ

Актуальність теми

В умовах глобальних кліматичних змін, повоєнної відбудови України, декарбонізації економіки, особливої ваги набуває формування нової генерації фахівців у сфері енергоефективності, відновлюваної енергетики та сталого будівництва. Україна, інтегруючись у Європейський зелений курс, потребує нової освітньої парадигми, здатної забезпечити сталу трансформацію енергетичного та будівельного секторів.

Сьогодні країна стикається з кількома ключовими викликами:

- дефіцит кваліфікованих кадрів, здатних впроваджувати сучасні «зелені» технології у практику;
- нагальна потреба у відновленні інфраструктури, зруйнованої внаслідок війни, із дотриманням високих стандартів енергоефективності;
- зростаючі регуляторні та технічні вимоги до проєктування, будівництва та експлуатації об'єктів згідно з принципами NZEB і BIM;
- перехід до кліматично нейтральної економіки, який вимагає нової освітньої парадигми та міждисциплінарної підготовки спеціалістів.

У відповідь на ці виклики, університети, зокрема КПІ ім. Ігоря Сікорського, відіграють ключову роль у трансформації освітнього процесу та розвитку практично орієнтованих платформ на зразок Енерго-Інноваційного Хабу для підготовки нового покоління фахівців, що здатні реалізувати державний курс до кліматичної нейтральності.

Роль ЗВО у підтримці сталого регіонального розвитку України

Хаб (Hub) в перекладі з англійської означає «розгалуження, вузол». Цим словом часто позначають місце, яке об'єднує однодумців у вирішенні спільних ідей. Коли ми говоримо про Енерго-Інноваційний Хаб, то це центр діяльності, що є місцем консолідації зацікавлених сторін, які розвивають інновації у сфері енергоефективності. Це місце, що дозволяє спільно працювати над проєктами, обговорювати актуальні теми, проводити тренінги, майстер-класи, зустрічі з успішними людьми, здійснювати дослідження з використанням сучасного обладнання, підвищувати кваліфікацію, організовувати коворкінг у сфері енергоефективності тощо [1].

Заклади вищої освіти вже давно стали потужними агентами змін – осередками знань, інновацій та соціально-політичного впливу. Вони не лише готують майбутніх лідерів, науковців і фахівців, а й відіграють вагомую економічну роль як роботодавці та споживачі ресурсів на національному й глобальному рівнях [2]. Сьогодні, на тлі зростаючих екологічних викликів та цілей сталого розвитку, університети перебувають під дедалі більшим тиском суспільства: від них очікують активного залучення до вирішення цих проблем і використання нових можливостей. Університети мають стати рушіями сталих трансформацій через навчання, дослідження, інновації та поширення знань. Їхня освітня функція вже давно виходить за межі класичного аудиторного навчання – вона охоплює управління кампусами, планування, реконструкцію інфраструктури, логістику, закупівлі, а також взаємодію з громадами. Зростає усвідомлення того, що університети можуть і мають не лише викладати теорію сталого розвитку, а й демонструвати її в дії – бути моделлю для наслідування, живою лабораторією сталих практик і центром змін на місцевому рівні.

Заклади вищої освіти відіграють ключову роль у консолідації зусиль різних зацікавлених сторін, сприяючи міждисциплінарній співпраці задля пошуку ефективних рішень у сфері сталого розвитку. Їх внесок особливо важливий у контексті трансформаційних процесів, які сьогодні відбуваються в українських містах. Зокрема, ЗВО:

- мають сучасну лабораторну базу, що дозволяє готувати фахівців у сферах енергоефективності, відновлюваної енергетики, екологічного проектування тощо – з урахуванням актуальних потреб регіонів;
- можуть забезпечувати підготовку кадрів за актуальними професіями, затребуваними на локальних ринках праці, сприяючи зміцненню людського капіталу на місцях;
- стають платформами для діалогу та співпраці між органами влади, бізнесом, громадським сектором, науковими та освітніми установами, об'єднуючи їх зусилля для створення інноваційних рішень сталого розвитку;
- сприяють стратегічному плануванню розвитку територій, зокрема як кліматично-нейтральних міських середовищ, шляхом надання експертизи у таких напрямках, як енергоефективність, NZEB, управління відходами, циркулярна економіка та урбаністика;
- здійснюють практичну підтримку муніципалітетів, розробляючи технічну документацію, проводячи енергоаудити та обстеження будівель до і після модернізації;
- просувають ідеї кліматично-нейтрального переходу, розробляючи та впроваджуючи новітні технологічні й управлінські підходи в міське середовище.

Таким чином, ЗВО можуть стати не лише навчальними центрами, а й ключовими гравцями у трансформації українських міст на шляху до стійкого, безпечного та енергоефективного майбутнього.

Сучасне суспільство стрімко трансформується, тому освіта і наука мають постійно адаптуватися до нових викликів і потреб – як абітурієнтів та студентів, так і роботодавців. У цьому процесі заклади вищої освіти відіграють ключову роль як осередки генерації знань, технологій і інновацій у співпраці з різними стейкхолдерами.

Створення Енерго-Інноваційного Хабу на базі ЗВО відкриває нові можливості для залучення партнерів до оновлення освітніх програм, модернізації лабораторної інфраструктури, а також формування центрів наукових досліджень і бізнес-ідей. Такий Хаб стане платформою для активної участі молоді в інноваційних проєктах і підготовки нової генерації фахівців-новаторів, здатних відповідати на актуальні виклики майбутнього.

Історична роль університетів у суспільстві постійно змінювалася, відображаючи соціальні, економічні та технологічні трансформації. Ще у 1892 році англійський біолог Томас Генрі Хакслі, аналізуючи зміни, які принесла індустріалізація, зауважив: «Середньовічний університет дивився в минуле – він був сховищем старих знань. Сучасний університет дивиться вперед – це фабрика нових знань».

Сьогодні університети перетворюються на інтелектуальні та інноваційні хаби, що формують технологічний фундамент суспільного розвитку. Вони стають центрами міждисциплінарного діалогу, платформами для взаємодії між наукою, бізнесом і суспільством. Як транскордонні організації, університети виконують важливу посередницьку роль у передаванні як формальних, так і неформальних знань – з академічного середовища в реальний сектор економіки, до місцевих громад і фінансових спільнот.

Еволюція університетів від традиційних освітніх установ до активних учасників інноваційних процесів демонструє їхню здатність адаптуватися до сучасних викликів і впливати на формування майбутнього (рис. 1) [3].

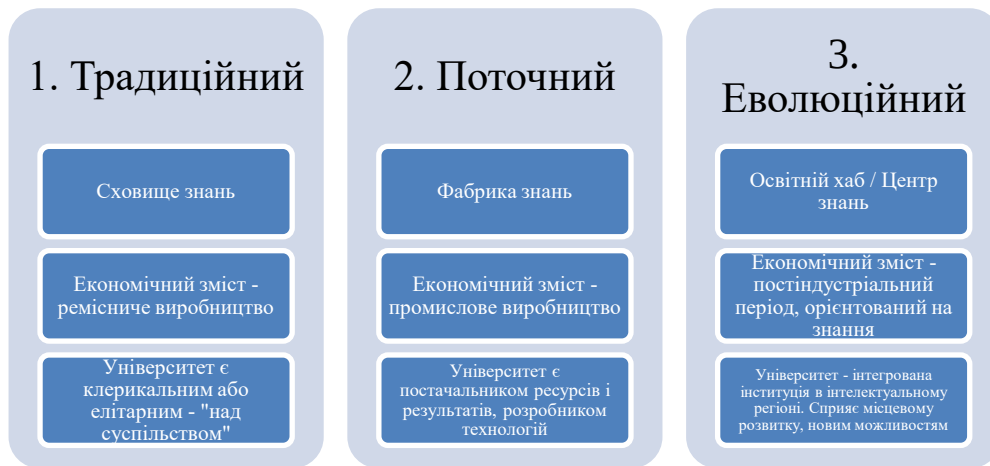


Рисунок 1 – Еволюція ролі університетів [3]

Сьогодні українські заклади вищої освіти продовжують фокусуватися на двох ключових напрямках – підготовці студентів та проведенні наукових досліджень для генерації нових знань. Проте дедалі помітнішою стає трансформація провідних університетів у бік так званої «третьої моделі», де ЗВО виступає не лише освітнім і науковим осередком, а й повноцінним Центром знань і інновацій.

У межах цієї моделі університети стають активними гравцями в розвитку регіонів – підтримують місцеві розробки, створюють нові можливості, стимулюють впровадження інновацій. Такий підхід швидко набуває популярності також і серед закордонних ЗВО. Це підтверджується зростаючим залученням університетів до інноваційних екосистем, активною участю в комерціалізації наукових результатів та зростаючою роллю в соціально-економічному розвитку територій.

Фундаментом нових функцій університетів є здатність створювати, акумулювати, поширювати та ефективно використовувати знання. Хоча традиційно університети завжди були осередками знань, сьогодні їхня діяльність усе більше орієнтована на практичну реалізацію цього потенціалу – через підтримку сталого розвитку, технологічного прогресу та зміцнення регіональної конкурентоспроможності.

У 2024 році Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» доєднався до мережі Енерго-Інноваційних хабів (далі – ЕІнХаБ) України та створює сприятливе середовище для формування інноваційних рішень і підготовки фахівців через його діяльність. ЕІнХаБ КПІ ім. Ігоря Сікорського є мультидисциплінарною платформою, що поєднує науку, освіту, інженерну практику та підприємництво, що об'єднує три енергетичні школи університету:

- Науково-навчальний Інститут атомної та теплової енергетики,
- Науково-навчальний Інститут енергозбереження та енергоменеджменту,
- Факультет електроенерготехніки та автоматики.

Створення даної платформи стало можливим завдяки об'єднанню ініціативних представників університету та підтримці розвитку Енерго-Інноваційних Хабів в Україні від проєкту «Просування імплементації директиви ЄС щодо енергоефективності в Україні» Німецького товариства міжнародного співробітництва (GIZ). ЕІнХаБ КПІ ім. Ігоря Сікорського – центр широкої компетенції в сфері енергоефективності, що включає питання: підвищення енергоефективності будівельного фонду та промислового сектору, впровадження відновлюваних джерел енергії, створення та впровадження технологій «розумне» місто – SmartGrid, MicroGrid, SmartHome та інтелектуальних мереж керування інженерними системами; акредитації спеціалістів у сфері енергоаудиту тощо. Розвиток ЕІнХабу дозволить перетворити простір навколо в енергоефективну демонстраційну зону, що розказуватиме про закони природи та спосіб життя, що не шкодить їй, де будівля використовує нуль енергії і всі процеси в ній можна дослідити і виміряти, створити моделі та інноваційні стартапи для їх впровадження. Енергоефективну зону, де в мікросередовищі

управління навчальним закладом, можна відпрацювати впровадження принципів кліматично-нейтрального міста від питань управління енергією до питань управління відходами.

Основні напрями діяльності ЕнІнХабу КПІ ім. Ігоря Сікорського:

- розробка та впровадження в КПІ ім. Ігоря Сікорського міждисциплінарних освітніх програм з акцентом на енергоефективність, BIM-технології, ВДЕ тощо;
- інкубація студентських стартапів у сфері енергетики та кліматичних технологій;
- проведення тренінгів, воркшопів, хакатонів та інших практико-орієнтованих форматів, в тому числі з метою сталої промоції енергоефективності серед цільових аудиторій;
- партнерство з муніципалітетами, бізнесом та міжнародними організаціями для реалізації пілотних проєктів;
- надання консалтингових послуг у сфері енергоефективності для цільових аудиторій
- практичний коворкінг в сфері енергоефективності, де всі зацікавлені можуть реалізувати свої ідеї у сфері енергоефективності, шляхом надання доступу до технологій, обладнання, інструментів, програмного забезпечення;
- проведення наукових досліджень в сфері енергоефективності та декарбонізації.

Висновки

Освіта є стратегічним інструментом для досягнення кліматичних цілей та повоєнної відбудови України згідно з принципами сталого розвитку. Дефіцит кваліфікованих кадрів і потреба у відновленні інфраструктури створюють запит на практично орієнтовану підготовку спеціалістів нового формату у сферах енергоефективності, відновлюваної енергетики, BIM та NZEB, що є ключовою передумовою переходу до кліматично нейтральної економіки. Інтеграція України у Європейський зелений курс вимагає оновлення освітніх програм, міждисциплінарного підходу та посилення зв'язку між освітою, наукою та практикою. Роль ЗВО, зокрема КПІ ім. Ігоря Сікорського, полягає у створенні інноваційних освітніх екосистем, таких як Енерго-Інноваційний Хаб, що поєднують навчання, дослідження та прикладні рішення для реального сектору. Такі екосистеми відіграватимуть у майбутньому ключову роль у формуванні нової генерації спеціалістів, спроможних вирішувати складні виклики кліматично нейтрального майбутнього через освіту, науку та інновації.

Перелік посилань:

1. Путівник зі створення Енерго-Інноваційного Хабу : посібник / Олена Шевченко, Анастасія Лісовик, Євген Юрченко, Вікторія Гранкіна, Ігор Фодчук ; упор.: І. Лепьошкін, А. Грицай, І. Юр'єва, В. Лісовик, Є. Новак. – Київ : ТОВ «АК-ГРУП», 2024. – 96 с.
2. Moreno Serna, J., Sanchez Chaparro, T., M. Purcell, W., & Mataix, C. (2022). Driving Transformational Sustainability in a University Through Structural and Academic Innovation: A Case Study of A Public University in Spain. *Advances in Engineering Education*, 10.(1.), 1–34.
3. Jan Youtie, Philip Shapira. Building an innovation hub: A case study of the transformation of university roles in regional technological and economic development. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.04.012>, Research Policy, Volume 37, Issue 8, September 2008, Pages 1188–1204.

СЕКЦІЯ № 1

Атомна енергетика

¹ Аспірант 1 курсу Бендюг К.С.

¹ Доц., к.т.н. Клевцов С.В.

https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=NAul3_MAAAAJ

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДХОДИ ЩОДО УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕДУРИ ВІДБОРУ ЕЛЕМЕНТІВ І КОНСТРУКЦІЙ АС ДЛЯ УПРАВЛІННЯ СТАРІННЯМ

Постановка проблеми та її актуальність. На теперішній довгострокова експлуатація атомних станцій (АС) є важливим фактором енергетичної безпеки. Проте, з часом основні елементи та конструкції (ЕК) АС зазнають старіння (*процес погіршення з часом характеристик систем, елементів і конструкцій*), що може призвести до зниження їхньої надійності та безпечності. Тому ефективне управління старінням (*система технічних і організаційних заходів, що здійснюються з метою запобігання деградації систем (елементів і конструкцій) унаслідок їхнього старіння і зносу, нижче припустимих меж*) елементів і конструкцій є критично важливим для забезпечення довгострокової експлуатації об'єктів атомної енергетики та запобігання аварійним ситуаціям.

Оптимізація процедури відбору елементів і конструкцій АС для включення до програми управління старінням є актуальним завданням, оскільки це надає можливість більш точно визначити об'єкти, що піддаються найбільшому ризику. Це, у свою чергу, дозволяє оптимізувати ресурси, покращити процес моніторингу стану металу ЕК АС, прогнозування строків їхньої служби, а також мінімізувати ризик їх відмов.

Аналіз останніх досліджень. У сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється проблемам старіння елементів та конструкцій АС, зокрема їх деградації під впливом експлуатаційних факторів. Останні наукові праці демонструють необхідність удосконалення методів моніторингу технічного стану та впровадження ризик-орієнтованих підходів до управління старінням.

Формулювання мети. Удосконалення процедури відбору елементів і конструкцій для включення в програму управління старінням з урахуванням тих, що не відносяться до важливих для безпеки і пошкодження яких може призвести до невиконання своїх функцій елементами та конструкціями систем безпеки.

Основна частина. На сьогодні 12 із 15 енергоблоків АС України отримали ліцензію на право довгострокової експлуатації, тобто експлуатації у пондапроектний термін, який відповідно до проєкту ядерної установки складав 30 років. Наразі довгострокова експлуатація передбачається на термін 60 років (тобто 30+30). Для забезпечення такої можливості для всіх енергоблоків АС України 1 раз на 10 років виконується Періодична переоцінка безпеки, завдяки якій можна точно визначити та обґрунтувати безпеку енергоблоку на наступний 10 річний період. Виникає питання, які фактори забезпечують можливість експлуатації атомних енергоблоків у понадпроектний період. Відповідь на це питання полягає у наявності значних запасів міцності, закладених на етапі проєктування, та у системному підході до управління процесами старіння конструкцій та елементів.

Старіння – це процес погіршення в часі властивостей матеріалу, але якщо ці властивості ретельно відстежувати і впроваджувати заходи, які здатні зупинити процеси старіння матеріалу або мінімізувати їх, то цілком реально продовжувати безпечну експлуатацію настільки, наскільки це можливо і безпечно. Одним із ключових факторів управління старінням є вибір елементів і конструкцій та занесення їх у відповідний перелік, що підлягає постійному нагляду. Алгоритм визначення таких елементів і конструкцій наразі визначено Експлуатуючою організацією та погоджено Регулюючим органом, водночас існуючий алгоритм вибору елементів і конструкцій не може вважатись

досконалим, оскільки не враховує такі можливі складові як імовірність відмови, проведення технічного обслуговування і ремонтів за технічним станом, впливу відмови елементів четвертого класу безпеки на елементи і конструкції важливі для безпеки. Тобто існуюча процедура вибору елементів для включення в перелік управління старінням потребує удосконалення з метою охоплення всіх компонентів, які могли бути пропущені при відборі.

У даній роботі розглянуто загальні підходи до формування переліку елементів і конструкцій АС, відповідно до вимог національних та вимог МАГАТЕ та проаналізовані основні відмінності між ними.

Порівняння національних нормативних вимог із стандартами безпеки МАНАТЕ виявило суттєві розбіжності. Основна відмінність СОУ НАЕК 141:2023 [2] від SSG-48 [1] у тому, що SSG-48 [1] не регулює вимоги до операцій з технічного обслуговування та ремонту (ТОіР). Також відповідно до вимог SSG-48 [1], якщо ЕК потребують періодичної заміни або запланованої реконструкції, вони не повинні бути включені до переліку управління старінням. Однак СОУ НАЕК 141:2023 [2] містить такі додаткові вимоги:

- обсяг ТОіР передбачає виконання операцій з контролю технічного стану;
- ТОіР дозволяє виявляти та контролювати ефекти старіння (*результат деградації, який може вплинути на виконання елементом, конструкцією своїх проектних функцій*) і пом'якшити деградацію (*процес, при якому характеристики (фізичні, механічні, геометричні, електричні тощо) елемента, конструкції поступово погіршуються з часом і проявляються у вигляді ефектів старіння*).

Окрему увагу приділено аналізу СОУ-Н НАЕК 135:2021 [3], який встановлює загальні принципи та вимоги щодо відбору ЕК енергоблоків АС які не входять до складу систем безпеки, пошкодження яких може призвести до невиконання своїх функцій ЕК систем безпеки. Розглянуті підходи щодо визначення переліку ЕК що можуть вплинути на функціональність систем безпеки з урахуванням імовірнісного аналізу безпеки, що дозволяє оцінити весь спектр вихідних подій та визначити критично важливі компоненти для подальшого контролю.

Висновки. У підсумку доповіді визначено основні проблеми процедури відбору ЕК на основі вимог СОУ-Н НАЕК 135:2021 [3]. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку рекомендацій щодо удосконалення національних стандартів із урахуванням міжнародного досвіду.

Перелік посилань:

1. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2018). Ageing management and development of a programme for long-term operation of nuclear power plants (Safety Standards Series No. SSG-48). Vienna: International Atomic Energy Agency.
2. СОУ НАЕК 141:2023 Інженерна, наукова та технічна підтримка. Управління старінням елементів та конструкцій енергоблока АЕС. Загальні вимоги.
3. СОУ-Н НАЕК 135:2021 Інженерна, наукова та технічна практика. Методика відбору елементів і конструкцій енергоблоків АЕС, пошкодження яких може призвести до невиконання своїх проектних функцій елементами і конструкціями систем безпеки..

¹ Магістрант 1 курсу Ляхор Д.О.

¹ Доц., к.т.н. Коньшин В.І.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

УНІФІКАЦІЯ КОМПЛЕКСУ ДАНИХ АВТОМАТИЗОВАНОГО РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗУВАННЯ РАДІАЦІЙНИХ НАСЛІДКІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Оскільки Україна є державою-членом МАГАТЕ, вона має зобов'язання щодо надання результатів вимірювань радіаційного стану до міжнародної системи радіаційного моніторингу МАГАТЕ в міжнародному форматі обміну радіологічними даними та забезпечення участі постачальників даних у програмах контролю якості вимірювань. Але в Україні наразі відсутня комплексна національна система автоматизованого контролю радіаційного стану, яка б могла забезпечити надання достовірних та своєчасних даних про радіаційний стан в безперервному режимі, особливо при врахуванні втрати зовнішніх джерел електропостачання [1].

Моніторинг радіаційного стану навколишнього середовища в Україні проводиться суб'єктами моніторингу за допомогою об'єктових автоматизованих систем контролю радіаційної обстановки, що ускладнює спільне використання даних. Отриманню узагальненої та достовірної оцінки результатів спостережень перешкоджають також відсутність єдиної методології, належного метрологічного забезпечення, сучасної телекомунікаційної техніки і ресурсів для автоматизації процесів контролю та оперативної передачі інформації до центрів її обробки та аналізу в єдиному міжнародному форматі обміну даними [1].

Створення належної методики проведення уніфікації даних радіаційного моніторингу дозволить підвищити точність отриманих даних радіаційного моніторингу, позбавившись впливу факторів, які пов'язані зі збором даних радіаційного моніторингу та виконанням моделювання джерела викиду за допомогою систем підтримки прийняття рішень. Успішне створення даної методики позитивно вплине на стратегічну мету України – створення інтегрованої системи радіаційного моніторингу, що дозволить у режимі реального часу виявляти радіаційні забруднення та загрози транскордонного перенесення радіоактивних речовин [1].

Аналіз останніх досліджень. В рамках журналу Radiation Protection Dosimetry було проведено дослідження впливу різних факторів, що впливають на відмінність показів детекторів (висота встановлення детекторів, місце встановлення детекторів, територія, будівлі тощо), для чого був застосований підхід «ідеального детектора» - порівняння даних з детектором, встановленим на висоті 1 метр відносно землі (над плоскою поверхнею) [2].

В рамках програми European Joint Programme for the Integration of Radiation Protection Research були визначені коефіцієнти невизначеностей залежно від характеристик місцевості розташування детекторів радіаційного моніторингу, які впливають на точність вимірювань рівня дози [3].

Формулювання мети. Розроблення методології уніфікації даних радіаційного моніторингу з врахуванням невизначеностей, що супроводжують радіаційний моніторинг, та їх використання для уточнення оцінок джерела викиду при спільному використанні з системами підтримки прийняття рішень.

Основна частина. Для української автоматизованої системи радіаційного моніторингу пропонується методологія підвищення точності результатів моделювання за допомогою уточнення характеристик джерела викиду і метеорології даних, отриманих в результаті моделювання, шляхом порівняння з даними, отриманими в результаті реального

радіаційного моніторингу, яка повинна бути повністю автоматизована для ефективного засвоєння даних. Ця процедура має назву «уніфікація даних автоматизованого радіаційного моніторингу».

Уніфікація даних радіаційного моніторингу здійснюється через ряд структурованих етапів. На першому етапі дані моніторингу збираються за допомогою детекторів, звідки отримуються первинні дані радіаційного моніторингу. Після цього враховуються невизначеності, які з'являються через характеристики і властивості місця розташування окремих детекторів, щоб оновити отримані дані так, ніби вони були отримані від теоретично «ідеального» детектора.

На другому етапі для систем підтримки прийняття рішень приймаються первинні дані характеристик джерела викиду і метеорології. Після цього виконується моделювання атмосферної дисперсії для заздалегідь визначеного інтервалу. Це моделювання використовує попередньо прийняті дані та точкову інтерполяцію, яка пов'язує результат із розміщенням детекторів на першому етапі.

На третьому етапі дані, отримані за результатами першого і другого етапів, порівнюються в межах попередньо визначеного критерію оцінки. Якщо ці дані відповідають критерію оцінки, уніфікація для заданого інтервалу вважається завершеною, і вони можуть бути використані в подальших операціях. Однак, якщо отримані дані не задовольняють обраному критерію оцінки, наступний етап передбачає уточнення параметрів джерела викиду та моделі атмосферної дисперсії. Після цього повторно виконується моделювання атмосферної дисперсії.

Наступні етапи дослідження питання уніфікації будуть зосереджені на вивченні її реалізації та можливих майбутніх викликів.

Висновки. Був запропонований підхід до уніфікації даних радіаційного моніторингу для подальшого використання в системах підтримки прийняття рішень.

Підхід передбачає три етапи уніфікації: збір та обробку даних моніторингу, розрахунки з використанням систем підтримки прийняття рішень та порівняння отриманих даних.

Уніфікація дозволяє виконати переоцінку характеристик джерела викиду та результатів моделювання атмосферної дисперсії, що значно покращить якість отриманих результатів.

Перелік посилань:

1. Про схвалення Стратегії інтегрованої автоматизованої системи радіаційного моніторингу на період до 2024 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2022 р. № 323-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/323-2022-%D1%80#Text> (Дата звернення: 24.02.2025).

2. Stöhlker, U., Bleher, M., Doll, H., Dombrowski, H., Harms, W., Hellmann, I., ... Weiler, F. (2018). THE GERMAN DOSE RATE MONITORING NETWORK AND IMPLEMENTED DATA HARMONIZATION TECHNIQUES. RADIATION PROTECTION DOSIMETRY. DOI:doi:10.1093/rpd/ncy154.

3. Bleher M., Gering F., Meisenberg K. and others. D9.7 –Report on uncertainty reduction in exposure assessment based on environmental monitoring data, including concept for identifying critically exposed groups. European Joint Programme for the Integration of Radiation Protection Research. EJP-Concert. URL: https://www.meenas.eu/wp-content/uploads/2023/05/D9.7_Report-on-uncertainty-reduction-in-exposure-assessment-based-on-enviro.pdf. (Дата звернення: 27.02.2025).

¹ Магістрант 1 курсу Остаповець М.О.

¹ Доц., д.т.н. Кондратюк В.А.

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МЕТОДИ КВАЛІФІКАЦІЇ МОДЕРНІЗАЦІЙ НЕЙТРОННО ФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

Постановка проблеми та її актуальність. Ядерне паливо є ключовим компонентом атомних електростанцій (АЕС), і його характеристики безпосередньо впливають на ефективність, економічність і безпеку роботи реактора. Однак традиційне ядерне паливо, таке як діоксид урану (UO_2), має ряд обмежень, зокрема:

- Низьку теплопровідність, що призводить до високих робочих температур палива.
 - Необхідність високого рівня збагачення урану-235.
 - Вразливість до процесів радіаційного розпухання і накопичення продуктів поділу.
- Модернізація ядерного палива дозволяє:
- **Збільшити ефективність паливного циклу** – нові типи палива можуть забезпечити більше вигорання за цикл без зниження безпеки.
 - **Зменшити навантаження на систему охолодження** – використання матеріалів з вищою теплопровідністю знижує робочу температуру палива.
 - **Оптимізувати економіку експлуатації АЕС** – продовження терміну експлуатації паливних збірок і зниження витрат на виробництво палива.
 - **Підвищити безпеку експлуатації** – зниження ризику руйнування твелів і зменшення кількості активних відходів.

Аналіз останніх досліджень. Оксидне паливо (UO_2) широко використовується у реакторах ВВЕР, PWR, BWR через його стабільність і промислову доступність. Однак через низьку теплопровідність ($\sim 2,7 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) воно має високу робочу температуру ($\sim 1200\text{--}1600^\circ\text{C}$ у центрі паливних таблеток), що може викликати:

- Високе накопичення внутрішніх напружень у паливі.
- Зниження механічної стійкості твелів.
- Витік продуктів поділу у випадку руйнування оболонки.

Дослідження показують кілька підходів до покращення характеристик палива:

- Легування оксидного палива оксидами металів (Cr_2O_3 , Al_2O_3 , BeO) – дозволяє збільшити розмір зерен і покращити механічну стабільність палива.
- Використання дисперсійного палива – сполуки U-Mo, U-Nb-Zr у цирконієвій матриці мають кращу теплопровідність і стійкість до розпухання.
- Застосування нітридного (UN) та карбідного (UC) палива – підвищена теплопровідність (до $20 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) і висока густина ($>13 \text{ г/см}^3$) роблять його перспективним для високовигоряючих паливних циклів.
- МОКС-паливо ($\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$) – дозволяє ефективно утилізувати плутоній і має покращені нейтронно-фізичні характеристики [1].

Формулювання мети. Основною метою дослідження є розробка та аналіз методів кваліфікації модернізацій ядерного палива з урахуванням його нейтронно-фізичних характеристик. Це включає:

- Оцінку вигорання палива – кількість використаної енергії на одиницю маси палива.
- Аналіз ефективності поглинання нейтронів – забезпечення стабільної роботи реактора.
- Механічну та хімічну стабільність паливних збірок – вплив тривалого опромінення та температурних навантажень.
- Безпекові аспекти використання нових видів палива – мінімізація ризиків розпаду та витоку радіоактивних елементів.

Основна частина.

В основній частині розглянуті такі питання як: тривалі експериментальні випробування модернізованих паливних збірок у дослідницьких реакторах, аналіз змін структури та механічних властивостей твेलів після опромінення, визначення механізмів радіаційного розпухання та впливу накопичених продуктів поділу.

Також були розглянуті теплофізичні дослідження, такі як: вимірювання теплопровідності нового палива та оцінка теплового розширення, дослідження стійкості палива до температурних навантажень та перепадів температур, оцінка поведінки оболонок твелів у різних експлуатаційних режимах.

Останнім розділом основної частини є оцінка нейтронно-фізичних характеристик, зокрема: визначення ефективності нових паливних композицій у процесі нейтронного поділу, моделювання роботи реактора з різними типами палива для оптимізації завантаження ТВЗ, а також аналіз коефіцієнтів відтворення палива та можливості його повторного використання.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз традиційного та модернізованого палива [2]

Характеристика	Оксидне паливо (UO ₂)	Нітридне (UN)	МОКС (UO ₂ + PuO ₂)	Характеристика	Оксидне паливо (UO ₂)
Теплопровідність (Вт/м·К)	~2,7	18-22	3-4	Теплопровідність (Вт/м·К)	~2,7
Робоча температура (°C)	~1200-1600	~600-800	~900-1200	Робоча температура (°C)	~1200-1600
Вигоряння (МВт·дн/кгU)	~50-60	~100	~60-70	Вигоряння (МВт·дн/кгU)	~50-60
Щільність (г/см ³)	10,5	14,3	11-12	Щільність (г/см ³)	10,5

Висновки.

Модернізоване паливо має значний потенціал для покращення ефективності та безпеки реакторів ВВЕР.

Використання нітридного або дисперсійного палива може суттєво зменшити температуру палива та підвищити рівень безпеки.

МОКС-паливо є перспективним для замкненого паливного циклу, оскільки дозволяє ефективно використовувати вторинне ядерне паливо.

Необхідні подальші дослідження щодо механічної стабільності нових паливних композицій у реальних умовах експлуатації.

Перелік посилань:

1. Відмінність температурних залежностей щільностей теплової джерела мокс-палива та діоксидного палива та пов'язані з цим особливості аварії на третьому блоці АЕС «Фукусіма-1» / В. Д. Русов, Ст. А. Тарасов, З. А. Чернеженко та ін. // Підвищення безпеки та ефективності атомної енергетики: 3-я міжнар. наук.-практ. конф., 24 - 28 вер. 2012 р., Одеса, Україна.

2. The Temperature Dependences Distinction of Thermal Source Densities of MOX-Fuel and Dioxide-Fuel and Related with It the Features of NPP «Fukushima-1» Third Unit Accident / V. D. Rusov, V. A. Tarasov, S. A. Chernenko et al. // Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE- Kyiv2012): Proc. of Int. Conf., 10 – 14 September 2012, Kyiv, Ukraine. – P. 479- 483.

¹ Аспірант 1 курсу Спірідонов О.О.

¹ Доц., д.т.н. Кондратюк В.А.

https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=uk&authuser=1&user=Is14HiYAAAAJ

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЗОВНІШНІХ АВАРІЙНИХ СИСТЕМ ПІДЖИВЛЕННЯ ВОДОЮ ЯЕУ З РЕАКТОРАМИ ВВЕР-1000(В320) ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРАТЕГІЙ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. Аварія на АЕС «Фукусіма-Даїчі» у 2011 році показала критичну вразливість атомних електростанцій при втраті зовнішнього електроживлення, що стало стимулом для досліджень у цій галузі. Одним із основних напрямків є розробка вдосконалених стратегій підживлення реактора та парогенераторів зовнішніми насосними установками, які можуть забезпечувати аварійне охолодження навіть у разі тривалої втрати електроживлення.

В умовах війни в Україні та систематичних атак на енергетичну інфраструктуру постає завдання не лише запобігання розплавленню активної зони реактора, а й збереження реакторної установки для подальшої експлуатації. Цей огляд узагальнює наявні дослідження у сфері аварійного охолодження реакторів ВВЕР-1000, сценаріїв розвитку аварій, методів підживлення теплоносієм та використання мобільних насосних установок.

Аналіз останніх досліджень. При втраті нормального електроживлення, для запобігання пошкодженню активної зони реактора потрібно виконання оперативним персоналом протиаварійних дій, спрямованих на переведення реактора в безпечний кінцевий стан. При цьому, як показали розрахунки, при втраті електроживлення власних потреб та відмові функції безпеки «Забезпечення електропостачання» оператор має як мінімум 2 години після початку аварії для прийняття рішення та виконання протиаварійних дій.

Дослідження показують, що повне знеструмлення станції призводить до критичного перегріву активної зони через 3-6 годин після аварії [1,2]. Додатковий аналіз підтверджує, що без зовнішнього підживлення реактора природна циркуляція теплоносія поступово припиняється, і температура активної зони починає стрімко зростати. Оголення активної зони відбувається в середньому через 2,5-3,5 години після початку аварії, температура ТВЕЛів перевищує 1200 °С через 4-5 годин, а руйнування корпусу реактора можливе через 5-7 годин [3].

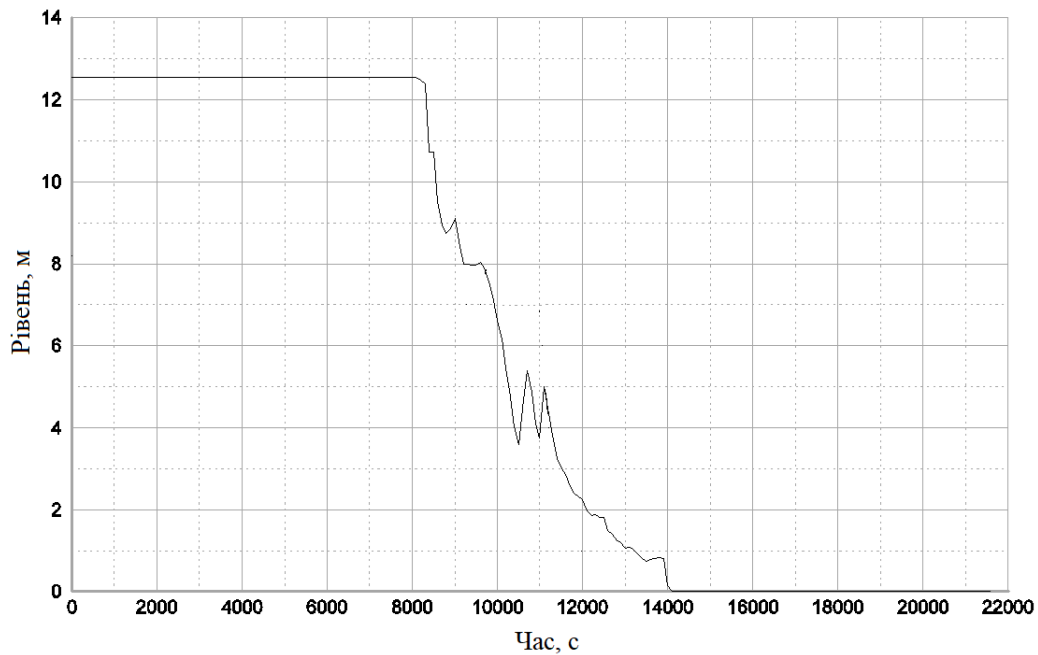


Рисунок 1 – Зміна рівня теплоносія в реакторі в результаті протікання аварії, без будь-яких дій протиаварійних персоналу станції

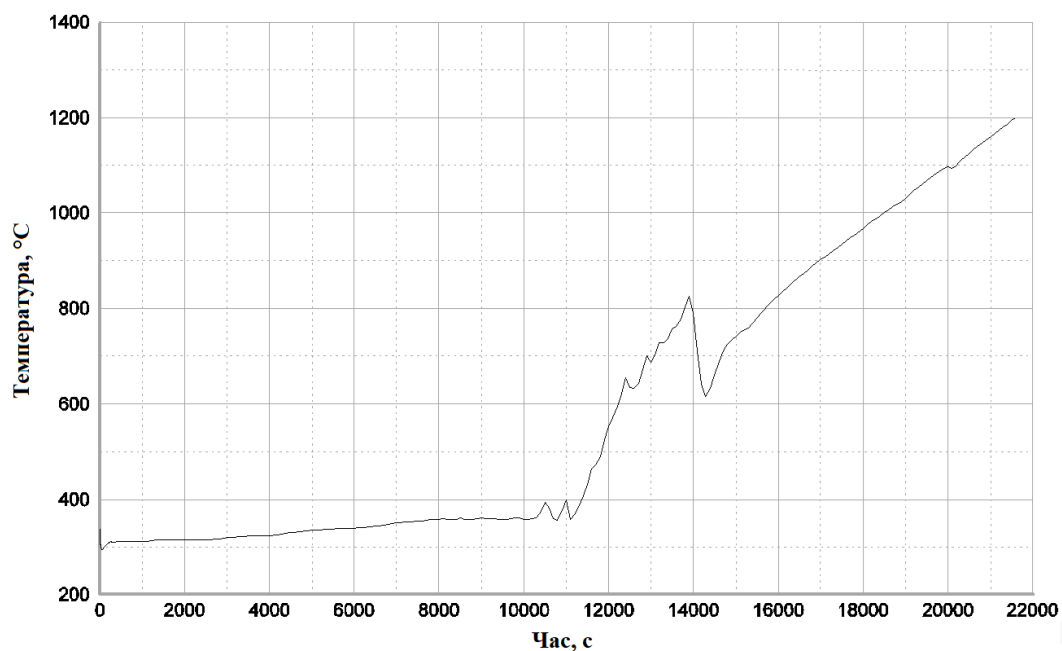


Рисунок 2 – Зміна температури оболонок ТВЕЛ в результаті протікання аварії, без будь-яких дій протиаварійних персоналу станції

Мобільні автономні насосні установки можуть ефективно використовуватися для аварійного підживлення парогенераторів або першого контуру реактора. Також дослідження показують, що навіть при тривалому знеструмленні реактора використання зовнішніх насосних установок може запобігти критичному перегрів активної зони та забезпечити її довготривале охолодження [4].

В якості таких насосних установок можуть бути використані пожежні автомобілі, або спеціалізовані насоси з привідним дизельним двигуном, які встановлюються на самохідних шасі, або причепах, та можуть в короткий час бути доставлені і розгорнуті в зоні підключення до трубопроводів аварійного підживлення першого і другого контурів [5]. Використання таких насосів вимагають попередніх дій персоналу станції по скиданню тиску в першому та другому контурах.

Мінімальні параметри мобільних насосів:

- підживлення парогенераторів другого контура: витрата ~ 13 кг/с при тиску ~ 10 кгс/см²;
- підживлення першого контуру: витрата ~ 13 -20 кг/с при тиску ~ 10 -13 кгс/см².

На основі проведеного аналізу можна виділити кілька аспектів, які досі залишаються малодослідженими:

- **збереження ресурсу реакторної установки після аварії.** Попередні роботи розглядали запобігання критичним пошкодженням активної зони та не допущення витоку радіації в навколишню середу, проте не оцінювали можливість подальшої експлуатації реактора після застосування аварійного охолодження;
- **поєднання підживлення першого та другого контурів.** Усі дослідження розглядали підживлення першого або другого контуру окремо. Не було проведено аналізу ефективності одночасного охолодження обох контурів, або режимів охолодження першого і другого контурів по черзі;
- **оптимізація часу запуску насосів.** Жодне дослідження не аналізувало критичний вплив часу запуску насосів (1/2/3 години після початку аварії) на розвиток аварії;
- **використання насосів високого тиску на пізніх стадіях аварії.** Відомо, що під час пізніх стадій аварії охолодження через другий контур втрачає ефективність через випаровування теплоносія першого контуру, та як наслідок втрати його природної циркуляції. Високий тиск першого контуру виключає можливість використання охолоджуючих насосів нормального тиску (1-2 МПа). Досі не було досліджень можливості використання високонапірних насосів (до 20 МПа) для охолодження першого контуру.

Мета дослідження – розробити оптимізовану стратегію аварійного управління для реакторів типу ВВЕР-1000, орієнтовану на випадки тривалого знеструмлення станції, з використанням автономних насосів для підживлення охолоджуючою водою, а також удосконалити параметри існуючих насосних систем. Для досягнення цієї мети планується провести розрахункове моделювання та оцінку різних сценаріїв аварійного управління для реакторів ВВЕР-1000, що функціонують в Україні.

Висновки. Забезпечення ефективного аварійного охолодження реакторів ВВЕР-1000 у разі аварії з повним знеструмленням станції є одним із ключових завдань ядерної безпеки. Одним із перспективних рішень є використання мобільних автономних насосних установок для підживлення охолоджувальною водою парогенераторів і першого контуру реактора, що дозволить підтримувати стабільний температурний режим навіть за відсутності зовнішнього енергопостачання. Оптимізація стратегій застосування даних установок, та покращення їх параметрів дозволить значно підвищити надійність і безпеку експлуатації атомних електростанцій в Україні.

Перелік посилань:

1. Jabbari, A., Shirani, A., & Salehi, H. (2019). Re-assessment of station blackout accident in VVER-1000 NPP with additional measures following Fukushima accident using Relap/Mod3.2. *Annals of Nuclear Energy*, 128, 35–46.
2. Tusheva, P., Schäfer, F., Reinke, N., & Rohde, U. (2021). Investigation on accident management measures for VVER-1000 reactors. *Nuclear Engineering and Technology*, 53, 890–902.
3. Prošek, A., & Cizelj, L. (2013). Long-term station blackout accident analyses of a PWR with RELAP5/MOD3.3. *Nuclear Engineering and Design*, 265, 123–134.
4. Bonelli, A., Rimoldi, S., & Balestrini, M. (2012). Station black-out analysis with MELCOR 1.8.6 code for Atucha 2 nuclear power plant. *Progress in Nuclear Energy*, 58, 32–47.
5. Park, S.-Y., & Ahn, K.-I. (2015). Evaluation of an accident management strategy of emergency water injection using fire engines in a typical pressurized water reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 285, 1–11.

ОБГРУНТУВАННЯ БЕЗПЕКИ ВПРОВАДЖЕННЯ ПАЛИВА ТВЗ WESTINGHOUSE З ЧАСТКОВОЮ RWFA/TB3A ПЕРШОЮ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОЮ ПАРТІЄЮ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасна атомна енергетика знаходиться на етапі впровадження нових технологічних рішень, спрямованих на підвищення безпеки та ефективності експлуатації ядерних реакторів. Одним із таких рішень є використання паливних збірок ТВЗ виробництва Westinghouse, зокрема з частковою RWFA/TB3A у першій перевантажувальній партії [1]. Це питання є актуальним у контексті диверсифікації постачання ядерного палива, забезпечення енергетичної незалежності та безпеки експлуатації атомних електростанцій (АЕС). Важливим аспектом є обґрунтування безпечності впровадження цих паливних збірок з урахуванням особливостей конструкції активної зони реактора та відповідних регламентів ядерної безпеки [2].

Аналіз останніх досліджень. Останні наукові дослідження у сфері ядерної енергетики зосереджуються на характеристиках паливних збірок різних виробників та їх сумісності з існуючими реакторами [3]. Дослідження, проведені міжнародними та українськими науковими інститутами, підтверджують можливість використання палива Westinghouse у реакторах типу ВВЕР-1000 за умови дотримання відповідних нормативних вимог та виконання моделювань процесів у активній зоні [4]. Особливу увагу приділено аналізу теплогідравлічних характеристик ТВЗ, оцінці радіаційного впливу та прогнозуванню довговічності паливних збірок при змінних режимах роботи [5].

Формулювання мети. Метою даної роботи є аналіз безпеки впровадження палива ТВЗ виробництва Westinghouse з частковою RWFA/TB3A у першій перевантажувальній партії реактора ВВЕР-1000, оцінка можливих ризиків та розробка рекомендацій щодо його експлуатації.

Основна частина. При оцінці безпечності впровадження ТВЗ з частковою RWFA/TB3A враховуються наступні аспекти:

1. Технічні характеристики ТВЗ Westinghouse.

ТВЗ Westinghouse відрізняються конструкційними особливостями, включаючи модернізовані дистанційні решітки, оптимізовану геометрію паливних елементів та використання нових матеріалів для підвищення їхньої термостійкості [6]. Дослідження показують, що ці удосконалення сприяють покращенню теплопровідності та зменшенню ризиків пошкодження оболонок паливних стрижнів під час експлуатації.

2. Взаємодія з активною зоною реактора.

Впровадження нових ТВЗ у першу перевантажувальну партію потребує детального аналізу взаємодії палива з активною зоною реактора, включаючи розподіл теплового навантаження, локальні перегріви та механічну стабільність конструкції [7]. Важливим аспектом є контроль деформацій паливних збірок у процесі експлуатації, що може впливати на ефективність теплообміну та коригування регулюючих органів реактора.

3. Аналіз ядерної та радіаційної безпеки.

У процесі впровадження нових ТВЗ необхідно оцінити зміну реактивності активної зони, коригування стратегії управління регулюючими органами, а також можливі ризики пошкодження паливних елементів [8]. Дослідження показали, що ТВЗ Westinghouse демонструють стабільні характеристики при номінальних та аварійних режимах роботи, що знижує ймовірність втрати герметичності паливних оболонок.

4. Теплогідравлічні дослідження.

Проведені чисельні моделювання показали, що ТВЗ Westinghouse забезпечують рівномірніший розподіл температур у активній зоні реактора, що сприяє зменшенню локальних перегрівів і зниженню ризику теплових пошкоджень [9]. Крім того, використання удосконалених дистанційних решіток забезпечує кращу циркуляцію теплоносія та зменшення механічних напружень на паливні стрижні. Це також сприяє зниженню гідравлічного опору в активній зоні, що позитивно впливає на ефективність роботи реактора.

5. Механічні навантаження та довговічність ТВЗ.

Важливим фактором експлуатації є стійкість ТВЗ до механічних навантажень, спричинених змінами температури та потоком теплоносія. Дослідження підтверджують, що конструкція ТВЗ Westinghouse дозволяє зменшити ризики вібраційного зношування, що є одним із основних чинників пошкодження паливних збірок у довготривалій перспективі.

6. Досвід експлуатації на інших АЕС.

Світова практика використання палива Westinghouse у реакторах ВВЕР-1000 свідчить про його ефективність та безпеку за умови дотримання регламентованих норм експлуатації [10]. Аналіз даних з українських АЕС демонструє поступову адаптацію до змішаного завантаження ТВЗ, що підтверджується експлуатаційними показниками та результатами досліджень [11].

Висновки. На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що впровадження ТВЗ Westinghouse з частковою RWFA/ТВЗА у першій перевантажувальній партії є перспективним рішенням для підвищення енергетичної незалежності України. Водночас, для безпечної експлуатації необхідно дотримуватися всіх технічних регламентів, проводити детальне моделювання поведінки палива у реакторі та здійснювати постійний моніторинг експлуатаційних параметрів [12].

Перелік посилань:

1. Іванов В.І., Петренко О.М. «Аналіз характеристик паливних збірок Westinghouse для реакторів ВВЕР-1000» // Ядерна енергетика, 2022.
2. Офіційний сайт ДП «НАЕК «Енергоатом». Інформація щодо впровадження альтернативного ядерного палива. [Електронний ресурс].
3. Звіт МАГАТЕ щодо безпеки експлуатації змішаного завантаження ТВЗ у ВВЕР-1000, 2021.
4. Westinghouse Electric Company. «Technical Report on RWFA Fuel for VVER Reactors», 2020.
5. Наукові доповіді ХФТІ НАН України з питань теплогідравлічного аналізу нових ТВЗ, 2023.
6. Дослідження теплогідравлічних характеристик ТВЗ на основі CFD-аналізу // Ядерна фізика, 2021.
7. Літературний огляд щодо механічних властивостей паливних збірок Westinghouse // Наукові записки, 2022.
8. Звіти про тестування ТВЗ у експериментальних умовах // Енергетична безпека, 2023.
9. Досвід експлуатації альтернативного палива на європейських АЕС // Технічний журнал, 2020.
10. Аналіз стратегії управління активною зоною при змішаному завантаженні ТВЗ // Атомна енергетика, 2022.
11. Результати випробувань ТВЗ Westinghouse на українських АЕС // Офіційні матеріали НАЕК «Енергоатом», 2023.
12. Загальні тенденції розвитку паливних технологій для ВВЕР-1000 // Науковий вісник, 2024.

¹ Магістрант 2 курсу Бутелько В.С.

¹ Доц., к.т.н. Коньшин В.І.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЇ НА 1 БЛОЦІ МЕЦАМОРСЬКОЇ АЕС

Постановка проблеми та її актуальність. В Україні експлуатуються два блоки ВВЕР-440 моделі V-213, котрі мають наступний вік: 1 блок – 45 років, 2 блок – 44 роки відповідно. Побудовані в 1980-их, вони випрацювали свої строки експлуатації, закладені проєктом, та саме через це їхній термін експлуатації продовжується кожні 10 років. З кожним роком обладнання енергоблоків випрацює свій ресурс, й не дивлячись на щорічні перевірки – імовірність відмови такого обладнання зростає. Та при виникненні незначної аварійної ситуації можливі групові відмови обладнання в роботі, та незначна вихідна подія може розвинути в аварію з розширеними проєктними умовами.

В 1982 році на 1 блоці Вірменської АЕС відбулася подія, а саме – знеструмлення енергоблоку через пожежу, при якій велика кількість обладнання відмовила в роботі, чим ускладнила аварію та погіршила першопочаткову причину.

Саме через ці додаткові чинники, була втрачена можливість розхолоджувати активну зону по 2 контуру, активна зона стала некерована та почала грітися, і як наслідок імовірність розвитку запроєктної аварії зростає. Подача води в парогенератори була відновлена та контроль над активною зоною було встановлено. Через завдані пошкодження блок ніколи не відновив свою роботу, та був знятий з експлуатації.

Прецедент вихідної події «Знеструмлення енергоблоку» вже відбувся на ЗАЕС. То саме для того, щоб вберегти 1 та 2 блоки РАЕС від подібних сценаріїв та руйнувань, необхідно змодельовати та дослідити події, а зокрема поведінку активної зони під час всього перебігу аварії.

Після того як буде змодельована поведінка активної зони, буде складений алгоритм дії оперативного персоналу (ОП), та він буде порівняний з алгоритмом дій, котрий надається в симптомно-орієнтованих аварійних інструкціях (СОАІ).

Аналіз останніх досліджень. Для прикладу подання такого матеріалу розглянемо моделювання перехідних процесів в реакторі ВВЕР-1000, з урахуванням вихідної події.

Для того, щоб запобігти аварії на початкових етапах її виникнення потрібен алгоритм дій, котрий, якщо аварії в реальному житті не ставалося, можна змодельовати віртуально. Зараз існують методи для моделювання активної зони та перехідних процесів в ній, без яких було б важко або неможливо отримати за допомогою традиційних методів моделювання результати з достатньо малою похибкою [1-2]. Активну зону моделюють, застосовуючи різні засоби та рівняння для того, щоб отримати той чи інший результат.

Формулювання мети. Для створення алгоритму потрібно віртуалізувати активну зону за допомогою фізики перехідних процесів, яку відображатиме модель кінетики, доопрацювати її шляхом ітерацій та змодельовати вихідну подію в різних станах активної зони. Після того як аварію буде змодельовано та складено алгоритм дій при такій вихідній умові з урахуванням усіх заданих відмов обладнання результати порівнюються з СОАІ, та при виявленні можливих пробілів в керівництві, результатом такої роботи буде пропозиція щодо внесення можливих змін.

Основна частина. Чітке формування вихідної події необхідне для того, щоб зрозуміти яка група фізичних процесів моделюватиметься, та котрі чинники потрібно враховувати.

Після того як вихідна подія була сформована, відбувається моделювання фізики активної зони шляхом побудови за допомогою комп'ютерних кодів моделі кінетики активної зони (АКЗ), що відображатиме зміну густини нейтронів у ній при зміні реактивності. Моделювання кінетики АКЗ застосовується для обґрунтування безпеки реактора та в імовірнісному аналізі [2].

Після того як віртуалізована активна зона була створена та були враховані наступні чинники: рівень вигорання палива, час кампанії та інші, в рівняння вносять змінні, які змінюють поведінку активної зони, тим самим імітуючи подію [3].

Для того, щоб створити модель кінетики є можливість використовувати різні рівняння, кожне з яких спеціалізується на визначених умовах.

Існують різні способи для моделювання кінетики реактора, але застосовуються найчастіше дифузійна та точкова моделі.

Дифузійна модель кінетики – являє собою розрахункову сітку, в кожній точці якої задане рівняння, що обчислює необхідні параметри з урахуванням визначених коефіцієнтів.

Модель базується на рівняннях дифузії, які описують, поширення нейтронів в активній зоні реактора у всіх трьох напрямках (x , y , z). За допомогою цих рівнянь враховуються джерела нейтронів, їх поглинання та витік.

Перевагами використання такої моделі є те, що вона відображає розподіл густини нейтронів по всьому об'єму активної зони, враховує неоднорідності в розподілі матеріалів та температури. Така модель ефективна для застосування при моделюванні складних перехідних процесів, аварійних послідовностей та різних режимів роботи, а також при аналізі локальних ефектів, таких як гарячі точки, неоднорідності в розподілі потужності, події з точковою розгерметизацією ТВЕЛів, середньо та сильнонавантажених чарунок, а також для аналізу розподілу виділення нейтронів по висоті активної зони реактора. Недоліком моделі є час обрахунку [4-5].

Точкова модель кінетики – це рівняння, що спрощують ядерний реактор до точки, в якій відповідно всі величини є сталими, та незмінними по об'єму. Рівняння також базуються на припущеннях, таких як добре перемішана активна зона реактора і постійний час генерації нейтронів. Перевагами такої моделі є простота та надійність, вона є доволі простою і одночасно час доконаною. З недоліків, враховуючи припущення, така модель не враховує об'ємного виділення нейтронів по активній зоні.

Після того як модель кінетики була обрана проводиться моделювання, та ітерація результатів, модель корегують під початкові вимоги: укрупнюють чи зменшують розрахункову сітку.

Метою проведення маніпуляцій, котрі були вказані вище, є розробка алгоритму дій при такій аварії та при виникненні ознак, притаманних саме цій вихідній події.

Висновки. Підсумовуючи розгляд такого методу, можна зробити висновки, що він є безпечним, перевіреним та може допомогти в моделюванні аварій, чи подій, котрі ще не ставалися, але ймовірність їхнього виникнення існує.

Перелік посилань:

1. Борисенко В.І. Вдосконалення методів і засобів оперативного контролю та діагностики нейтронно-фізичних параметрів ядерних установок. Київ : НАНУ ІПБАЕ, 2018. 37 с.
2. Павлович В.М. Фізика ядерних реакторів: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Чорнобиль, 2009. 100–170 с.
3. Халімончук В.А. Безпека атомних станцій: динаміка ядерного реактора з розподіленими параметрами у дослідженнях перехідних режимів експлуатації ВВЕР та РВПК. Київ 2008. 206 с.
4. Демченко В.А. Автоматизація і моделювання : Технологічних процесів АЕС та ТЕС. Одеса, 2001. 114 с.
5. Jaakko Miettinen Nuclear Power Plant Simulators: Goals and Evolution. Finland 2008. p. 112.

¹ Магістрант 2 курсу Годунок Б.В.¹ Доц., к.т.н. Коньшин В.І.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=G8kKS2MAAAAJ&hl>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АНАЛІЗ ВПЛИВУ РІЗНИХ КОМПОНОВОК ПАЛИВНИХ ЗАВАНТАЖЕНЬ НА РАДІАЦІЙНЕ НАВАНТАЖЕННЯ ВКП ТА КР ВВЕР-1000

Постановка проблеми та її актуальність. Вплив експлуатаційних чинників (нейтронного опромінення, підвищеної температури, циклічного навантаження) на корпус реактора (КР) та внутрішньокорпусні пристрої (ВКП) призводить до зміни властивостей металу, насамперед, до зниження опору крихкому руйнуванню (окрихчуванню). 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.

Формулювання мети. Проаналізувати прогнозні паливні кампанії та запропонувати найбільш оптимальне розміщення палива, яке дозволить зменшити радіаційне навантаження на КР та ВКП.

Основна частина. У світовій практиці прийнято такий підхід, за якого у випадку значного флюенсу нейтронів на стінку реактора застосовуються відповідні захисні заходи. На енергоблоках атомних електричних станцій України як превентивний захід щодо мінімізації деградації металу корпус реактора 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) [1].

Для коректної оцінки впливу використання різної компоновки, вирішено розглянути паливні кампанії, де застосовано повне завантаження паливом компанії Westinghouse – ТВЗ-WR. А саме із використанням двох свіжих касет в периферійному ряді (рис. 1) та із застосуванням 4 касет свіжого палива в периферійному ряді (рис. 2).

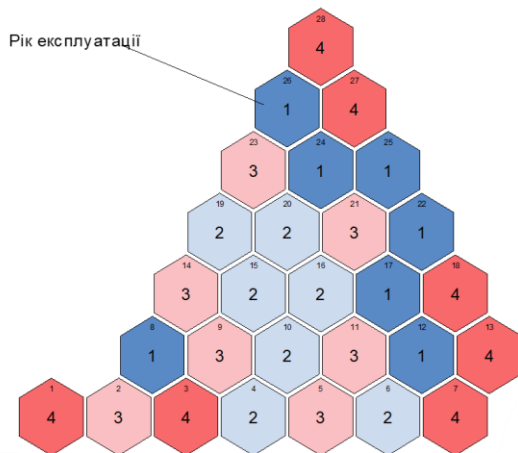
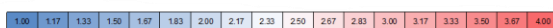


Рисунок 1 – Картограма паливного завантаження з використанням 2-ох свіжих касет в периферійному ряді (60°-сектор)

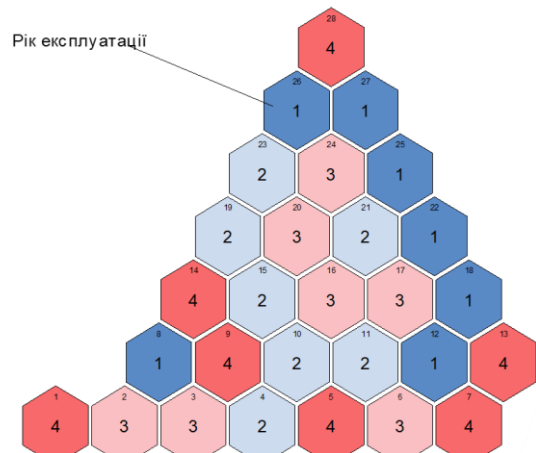
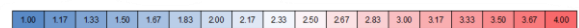


Рисунок 2 – Картограма паливного завантаження з використанням 4-ох свіжих касет в периферійному ряді (60°-сектор)

Наступні результати розрахунків (рис. 3 та рис. 4) підтверджують, що застосування згаданого вище компонування палива в АкЗ, з більшим використанням вигорілого палива замість свіжого, в периферійному ряді, призводить до зменшення впливу нейтронних потоків на КР та елементи ВКП.

Розрахунки виконувались за допомогою розрахункового пакету DOORS [2].

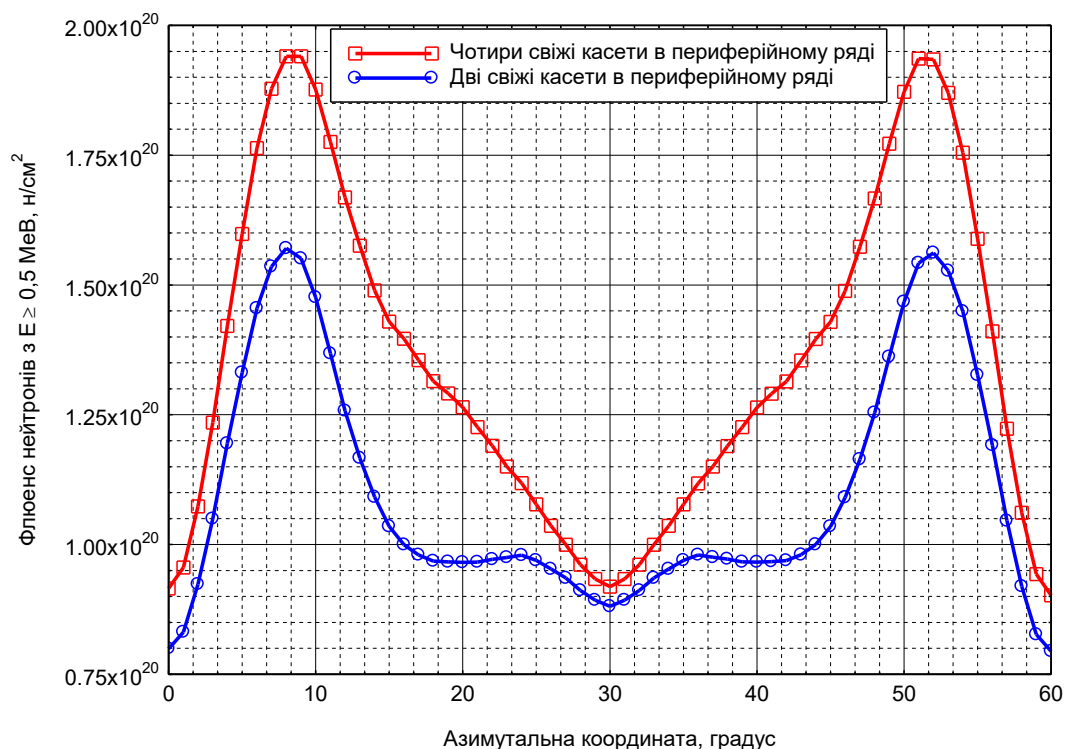


Рисунок 3 – Азимутальний розподіл флюенсу нейтронів на внутрішній поверхні шахти внутрішньокорпусної в шарі максимального радіаційного навантаження

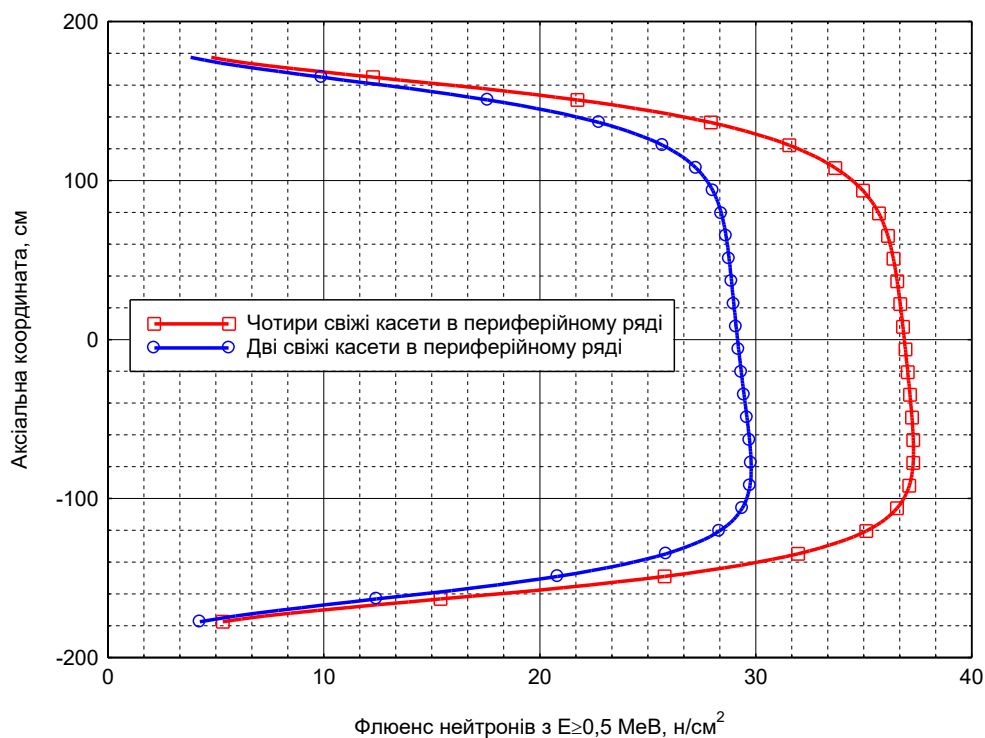


Рисунок 4 – Аксіальний розподіл флюенсу на зовнішній поверхні вигорідки в місцях заміни свіжого палива на ТВЗ 4-го року експлуатації

Розрахунок енерговиділень у вигородці РУ ВВЕР-1000 демонструє характерні відмінності застосування різної компоновки паливних завантажень (рис. 5).

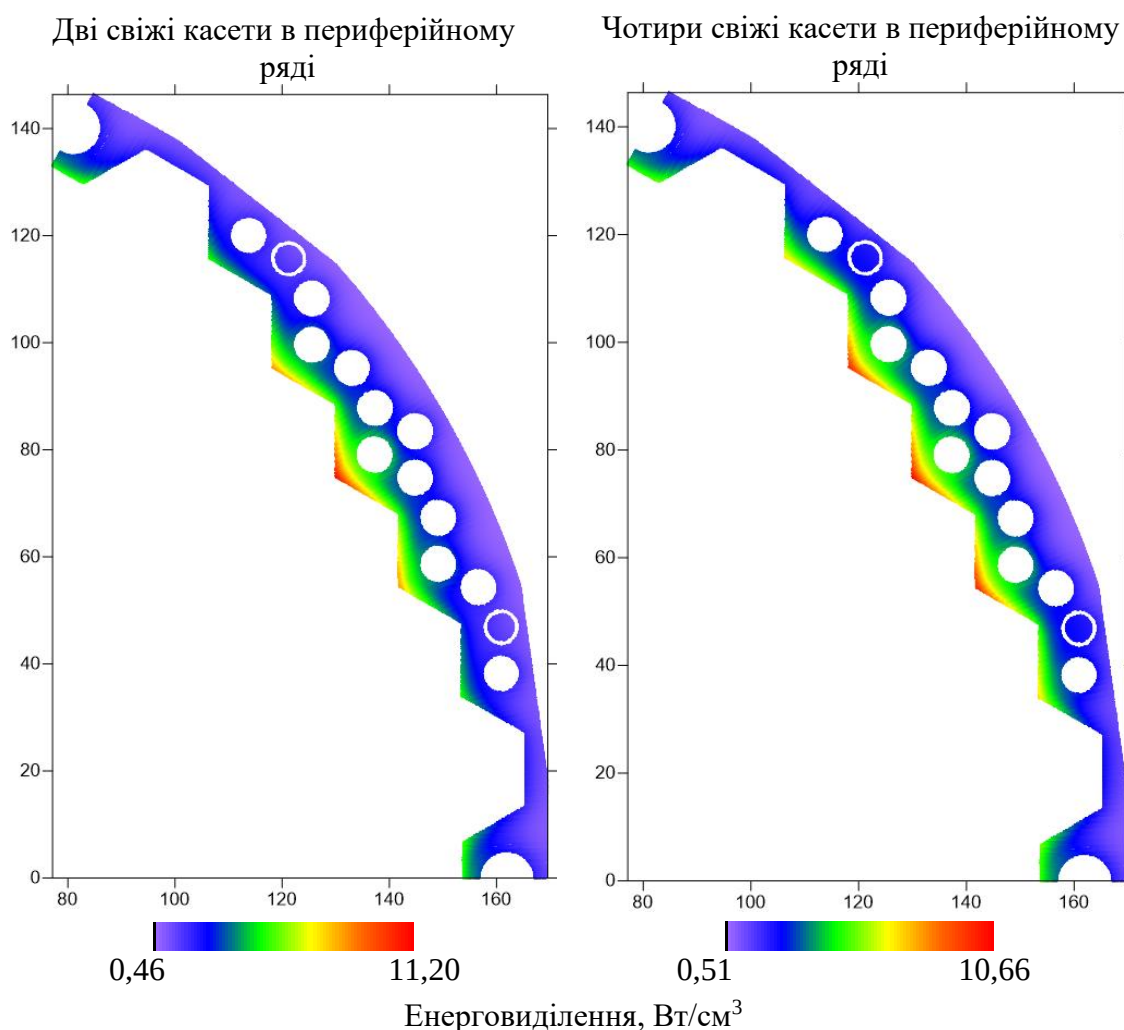


Рисунок 5 – Радіальний розподіл енерговиділення у вигородці на аксіальних рівнях максимального значення

Зокрема спостерігається зниження радіаційного навантаження на вигородку, за рахунок заміни свіжого палива в периферійному ряді на вигорілі ТВЗ 4-го року експлуатації.

Висновки. Різна кількість свіжого палива на периферії впливає на радіаційне навантаження. Розподіл енерговиділення демонструє відмінності між різними компоновками паливних завантажень. Зменшення ТВЗ 1-го року експлуатації в крайніх рядах призводить до зниження радіаційного навантаження на елементи ВКП та КР.

Перелік посилань:

1. 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>

2. DOORS 3.2: One-, Two- and Three-Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code System. RSIC Code package CCC-65

URL: <https://rsicc.ornl.gov/codes/ccc/ccc6/ccc-650.html>.

¹ Магістрант 2 курсу Гупало М.Б.

¹ Проф., д.т.н. Кравець В.Ю.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ФАКТОРІВ ДВОФАЗНИХ ТЕРМОСИФОНІВ НА ЇХНІ ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Постановка проблеми та її актуальність. Протягом багатьох років пасивний спосіб транспортування тепла набув величезної популярності, який включає в себе двофазні пристрої, а саме: теплові труби (ТТ) та закриті двофазні термосифони (ЗДТ). В основному це зв'язано з такими теплопередавальними характеристиками як їх висока еквівалентна теплопровідність $\lambda_{\text{екв}}$ [1]. Наприклад, максимальна $\lambda_{\text{екв}}$ ЗДТ діаметром $10 \cdot 10^{-3}$ м і довжиною 1,0 м дорівнює $2 \cdot 10^5$ Вт/м·К [2]. Це, приблизно, у 500 разів більше за теплопровідність міді. Тому, пошук оптимальних теплопередавальних характеристик термосифонів в залежності від їх призначення, є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень. Закриті двофазні термосифони широко використовуються для передачі теплоти в багатьох пристроях [3]. Особливістю роботи ЗДТ є те, що повернення сконденсованого теплоносія із зони конденсації в зону нагрівання здійснюється за допомогою сил тяжіння, тому передача теплоти ЗДТ може відбуватися тільки в умовах дії гравітації [4]. Проте, ЗДТ як і ТТ мають обмеження за максимальними тепловими потоками, які пов'язані з рядом визначних факторів. По перше це теплофізичні властивості теплоносія (в'язкість, теплота пароутворення, теплоємність, густина, коефіцієнт поверхневого натягу рідини), а також геометричні характеристики термосифонів (внутрішній діаметр, довжини зон нагріву та конденсації, кількість теплоносія) [5]. ЗДТ знайшли широке застосування у багатьох галузях техніки. В елементах охолодження ядерного обладнання АЕС, хімічній і нафтовій промисловості, електроніці, залізничних транспортних системах, в потужних термоелектричних генераторах, і різних нагрівальних системах для видобування тепла з ґрунту.

Формулювання мети. Метою дослідження було визначення особливостей процесів теплообміну у термосифонах при зміні геометричних параметрів для пошуку їх оптимальних конструкцій.

Основна частина. В якості об'єкта дослідження вибрано ЗДТ довжиною 1,5 м якій заповнювався дистильованою водою. Кількість теплоносія контролювалася ваговим методом. При однаковому внутрішньому діаметрі $d_{\text{вн}}$ (9,0 мм) висота заповнення теплоносія L_p дорівнювала 60 мм. Довжина зони конденсації змінювалася від 200 мм до 700 мм.

Експериментальна установка приведена на рис. 1. Підведення теплоти до зони нагріву термосифона здійснювалося за допомогою електричного нагрівача (2). Відведення теплоти від зони конденсації здійснювалося проточною водою через конденсатор типу «труба в трубі» і витрата контролювалася по показанням ротаметра (8). Температура в основних зонах термосифонів визначалася за допомогою мідь-константанових термопар, з діаметром електродів $0,16 \cdot 10^{-3}$ м. Гарячі спаї термопар припаювалися до корпусу термосифонів. Сигнал від термопар через аналого-цифровий перетворювач передавався на персональний комп'ютер.

Зміна довжини зони конденсації термосифона при однакової довжині зони нагріву впливає на його теплопередавальну здатність. При цьому основним фактором, від якого це залежить є ефективна довжина термосифона l_{ef} , а також співвідношення між зонами підводу $l_{\text{зн}}$ і відводу $l_{\text{зк}}$ теплоти (рис.2).

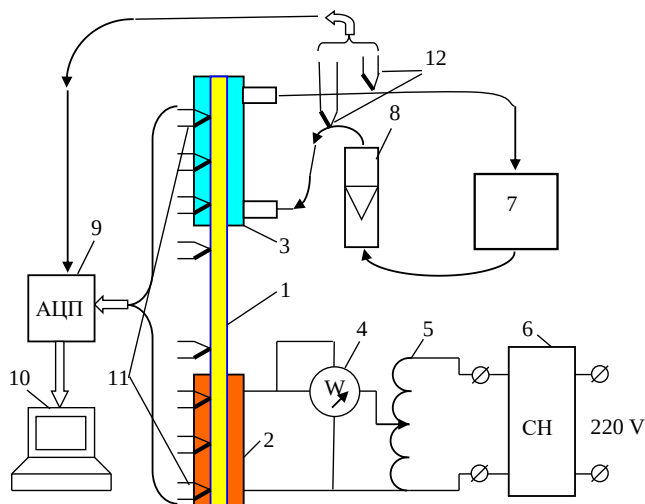


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки: 1 – двофазний закритий термосифон; 2 – омичний нагрівач зони випаровування; 3 – конденсатор типу «труба в трубі»; 4 – ватметр; 5 – лабораторний автотрансформатор; 6 – стабілізатор напруги; 7 – термостат; 8 – ротаметр; 9 – аналогово-цифровий перетворювач; 10 – персональний комп'ютер; 11, 12 – мідь-константанові термопари

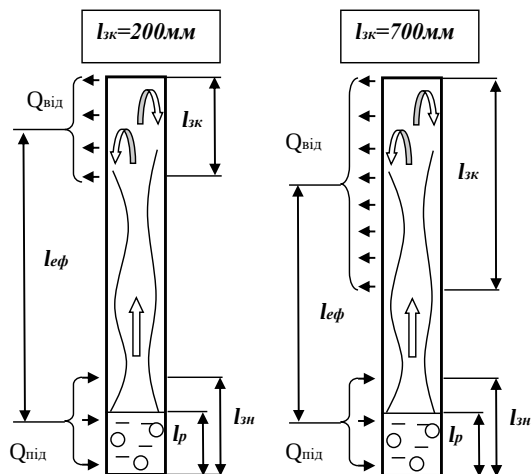


Рисунок 2 – Схема передачі теплоти при різних довжинах зон конденсації. Довжина термосифона 1500 мм

Збільшення l_{ef} , що відповідає також зростанню довжини адиабатної зони термосифонів, впливає на гідродинамічну картину передачі теплоти від зони нагріву до зони конденсації. При цьому втрата тиску в паровому каналі залежить від швидкості руху пари. На рис. 3 показано, що при довжині $l_{зк} = 700$ мм швидкість пари підвищується в порівнянні з $l_{зк} = 200$ мм більше ніж у два рази. Це відбувається за рахунок зміни внутрішнього тиску пари в термосифоні. При збільшенні довжини зони конденсації тиск пари зменшується, а швидкість і витрата тиску в зоні транспорту збільшуються (рис. 3, рис. 4).

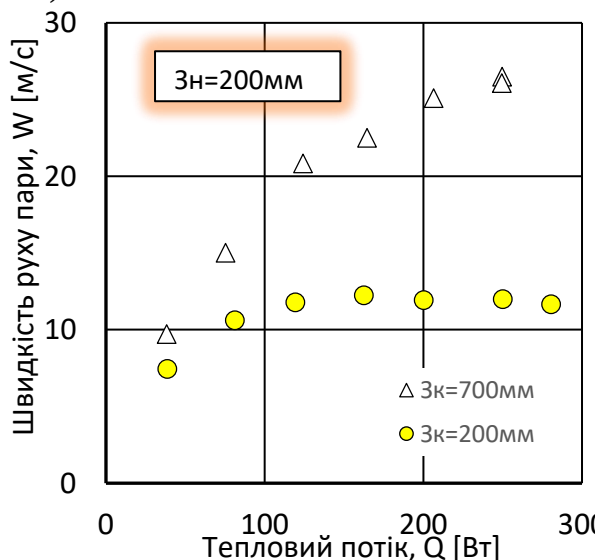


Рисунок 3 – Залежність швидкості руху пари в зоні транспорту від теплового потоку, що передається

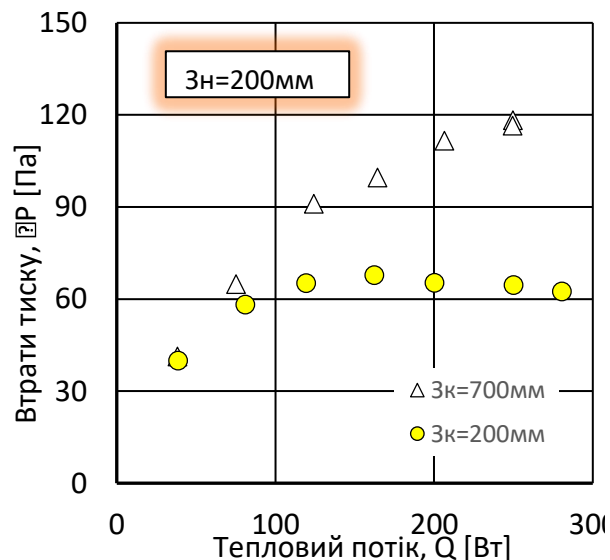


Рисунок 4 – Залежність витрати тиску в зоні транспорту термосифону

Розрахунок $\lambda_{екв}$ термосифонів проводився по залежності.

$$\lambda_{екв} = \frac{Q_{від} l_{ef}}{F_{ТС} (\bar{t}_{зн} - \bar{t}_{зк})},$$

де $F_{ТС}$ – зовнішня площа перерізу термосифону; l_{ef} – відстань між серединами зон нагріву і конденсації. $\bar{t}_{зн}$, та $\bar{t}_{зк}$ – відповідно, середні температури в зонах нагріву, і конденсації.

При довжині зони конденсації $l_{зк} = 700$ мм ефективна довжина термосифона у порівнянні з $l_{зк} = 200$ мм зменшується приблизно на 20 %. Однак $\lambda_{екв}$ при $l_{зк} = 200$ мм у всьому діапазоні теплових потоків перевищує еквівалентну теплопровідність при $l_{зк} = 700$ мм у 1,5...2,0 рази (рис. 5). Це зв'язано із сумісною дією різниці температур між зонами нагріву і конденсації та різними довжинами l_{ef} .

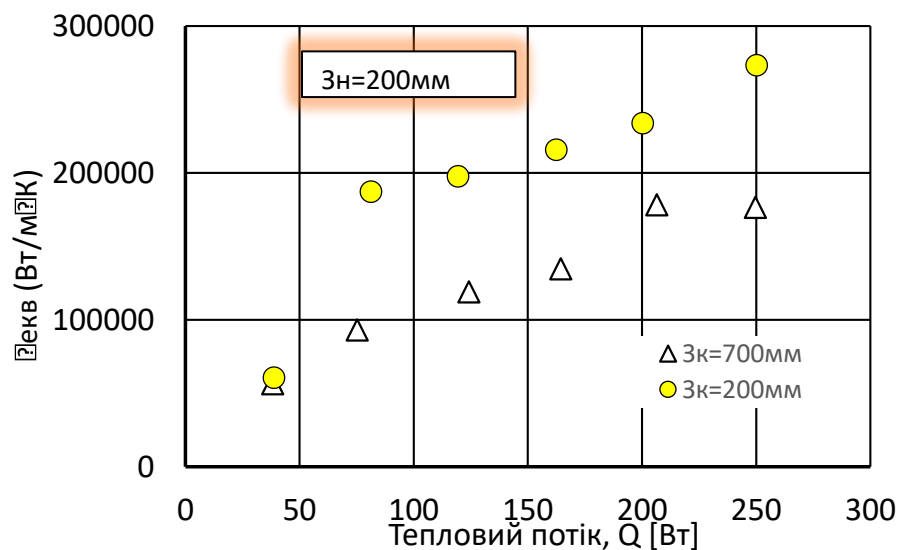


Рисунок 5 – Вплив довжини зони конденсації на еквівалентну теплопровідність термосифону

Також за рахунок збільшення довжини зони конденсації густина теплового потоку зменшується і одночасно знижується інтенсивність тепловіддачі. Це відбувається тому, що товщина плівки конденсату при витіканні в зону транспорту стає максимальної і швидкість її руху стає недостатньою для ефективного повернення в зону нагріву.

Висновки.

Таким чином, дослідження показало, що при збільшенні довжини зони конденсації еквівалентна теплопровідність $\lambda_{екв}$ термосифонів суттєво зменшується. Це слід враховувати при розробці оптимальних конструкцій термосифонів.

Перелік посилань:

1. Кравець В.Ю. *Процеси теплообміну у мініатюрних випарно-конденсаційних системах охолодження*. Харків, ФОП Бровін О.В., 2018, 288 с.
2. Кравець В.Ю., Шепель Г.С., Гуров Д.І., Данилович А.О. Вплив геометричних факторів на теплопередовальні характеристики двофазних термосифонів. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2024. № 1–2, с. 43–48.
3. Reay D., Kew P., Mcglen R. *Heat pipes theory, design and applications*. – USA. Published by Elsevier LTD. 2014. – 251 p.
4. Di Marco P., Filippeschi S., Franco A., Jafari D. Theoretical analysis of screened heat pipes for medium and high temperature solar applications. *J. Phys Conf.* – 2014. – 547:012010.
5. Peterson, G.P., *An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing and Applications*, John Wiley & Sons, New York, NY, September 1994, 356 p.

НАДЗВУКОВИЙ ЕЖЕКТОР ІЗ ТАНГЕНЦІАЛЬНИМ НАДЗВУКОВИМ СОПЛОМ

Загальновідомо, що в процесі гальмування надзвукових течій відбувається утворення ряду взаємодіючих стрибків ущільнення, що призводять до зростання ентропії, тому при вивченні взаємодії надзвукового струменя з потоком в ежекторі особлива увага приділяється параметрам надзвукового сопла з точки зору його розрахунків щодо тиску [1].

У доповіді представлені результати розрахунків полів надзвукової течії, що формується на виході з тангенціального надзвукового косого кільцевого сопла в осесиметричну камеру змішування ежектора. Розглянуто спрощене конусне сопло, надзвукова частина якого утворена двома коаксіальними усіченими конусами з кутами при вершині α_1 , α_2 і з критичним перерізом $r_2 - r_1$, що забезпечує поєднання стінки сопла зі стінкою камери змішування ежектора під кутом $\beta = 180^\circ - \alpha_1$. Змінюючи висоту усічених конусів, із закону збереження маси для адіабатичної течії при заданих значеннях α_1 і α_2 виходить необхідне число Маха на виході сопла:

$$M(x, \alpha_1, \alpha_2),$$

де $x = \frac{h}{r_2 - r_1}$ - безрозмірна висота конусів.

За розподілом числа Маха вздовж сопла для ідеального газу можна визначити тиск на зрізі сопла за тиском у форкамері (ресивері).

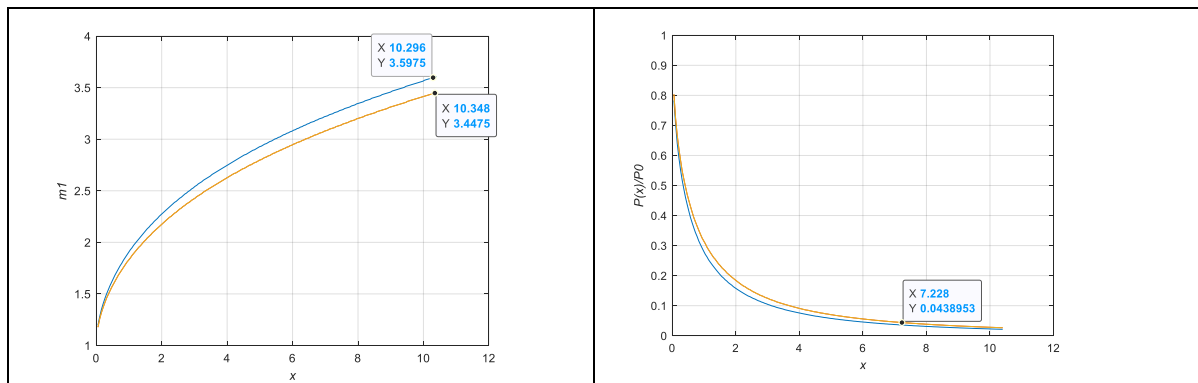


Рисунок 1 – Розподіл числа Маха та відповідні значення тиску вздовж кільцевого сопла при $\alpha_2 = 53^\circ$ та $\alpha_1 = 38^\circ$ – синя крива, 41° – жовта крива

Однак для пристінного надзвукового струменя, що формується тангенціальним кільцевим соплом ідеальної постановки недостатньо, особливо при обтіканні кута сполучення стінки сопла зі стінкою камери змішування. Так, для перерозширеного сопла, коли стрибок ущільнення формується ще в соплі, і товщина турбулентного прикордонного шару, і його відрив від сполучної стінки тангенціального сопла якісно та кількісно змінюють картину перебігу гальмування надзвукового струменя [2]. Тому моделювання трансзвукової і надзвукової течії в ежекторі фіксованої геометрії виконується шляхом вирішення повної системи рівнянь Нав'є-Стокса усереднених по Рейнольдсу для в'язкого стисливого теплопровідного газу в осесиметричній постановці. Чисельне рішення системи рівнянь здійснюється методом контрольного об'єму без виділень в області розрахунку

скачків ущільнення на структурованій сітці в соплі і меж стінок камери змішування, і на неструктурованій сітці в іншій області розрахунку (рис. 2).

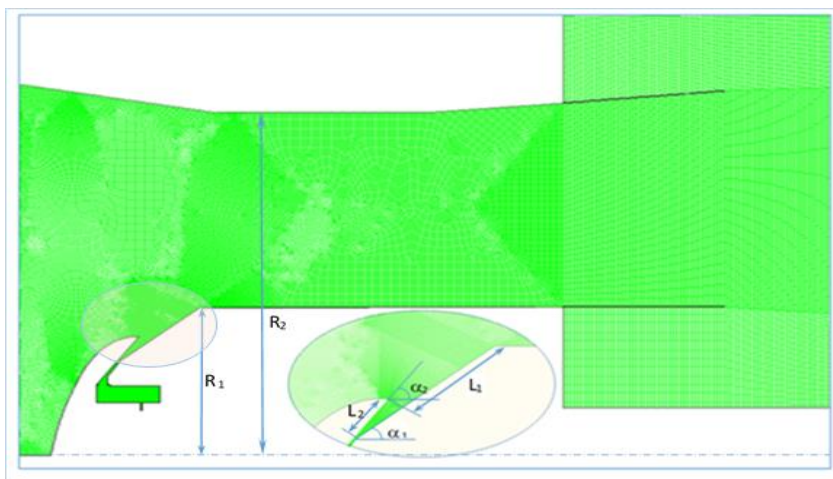


Рисунок 2 – Осьовий переріз осесиметричного аспіратора та різницева сітка розрахункової області

Для визначення турбулентних коефіцієнтів в'язкості та теплопровідності застосовується модель турбулентності Спаларта-Аллмараса[3].

Показано, що ежектуюча здатність, тангенціального надзвукового сопла, що реалізує ефект Прандтля-Майєра, істотно більше ежектуючої здатності ежекторів з співвісними надзвуковими соплами. Разом з тим, при відношенні $R_2/R_1 > 2$ повний поворот надзвукового струменя у напрямку осі ежектора зменшує здатність ежектора. Однак кутом повороту надзвукового струменя і, відповідно, коефіцієнтом ежекції при фіксованих параметрах ежектора можна керувати змінюючи довжину сполучної стінки сопла з камерою змішування (рис. 3).

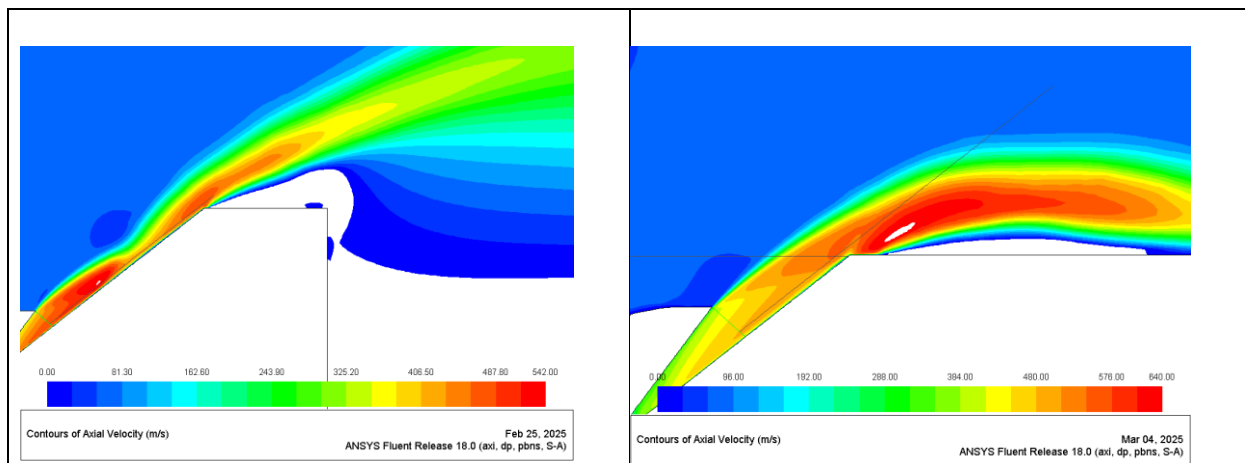


Рисунок 3 – Поле швидкості в камері змішування ежектора біля тангенціального сопла

Положення надзвукового струменя, наведене зліва на рис. 3, забезпечує коефіцієнт ежекції рівний 5,26, в той час як на укороченій стінці тангенціального сопла (правий частина рис. 3) отриманий коефіцієнт ежекції рівний 4,92.

Висновки. Таким чином, показано, що тангенціальні надзвукові сопла в надзвукових ежекторах більш ефективні порівняно з ежекторами з співвісними надзвуковими соплами. Однак для отримання оптимальної геометрії ежектора необхідні проведення подальших розрахунків та проведення експериментальних досліджень для

підтвердження чисельних результатів.

Перелік посилань:

1. Тимошенко В.І., Білоцерковець І.С. Розрахункові моделі газоструминного ежектора при надзвуковій швидкості робочого тіла. // Технічна механіка. 2008. № 1. С. 50-63.
2. Воропаєв Г.А., Розумнюк Н.В., Загуменний Я.В., Сірош Є.А. Чисельне моделювання імпульсної надзвукової внутрішньої течії. Збірник тез V Міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерна гідромеханіка», Київ, 2016, с. 15.
3. Юн А.А. Теорія та практика моделювання турбулентних течій. М.: Книгарня «ЛІБРОКОМ», 2009, – 272 с.

¹ Магістрант 2 курсу Корнілов О.М.¹ Доц., к.т.н. Бібік Т.В.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=f-13UKcAAAAJ&hl=uk>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ РОЗРАХУНКУ ПАСИВНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНОГО КОДУ TRACE

Постановка проблеми та її актуальність. Застосування комп'ютерних кодів є важливою діяльністю в галузі атомної енергетики, починаючи від проектування ядерної установки, визначення безпечних меж безпеки, формування експлуатаційної документації і закінчуючи подовженням експлуатації і зняття з експлуатації. Незважаючи на очевидні переваги такого методу над прямим експериментом, він також може вимагати значну кількість часу через необхідність великої кількості ітераційних налаштувань на фазі претесту. Отже, проблема скорочення часу окремого розрахунку при збереженні точності, а також збільшення точності при незначному погіршенні часової характеристики є важливою для експлуатації та модифікації АЕС, і в перспективі їх вирішення може здешевити ці діяльності. Одним з найбільш поширених кодів такого типу є TRACE.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження в цій галузі, здебільшого стосуються типів і способів розбиття гідравлічних об'ємів і геометричних структур. Зазвичай, рекомендації щодо кращих підходів зазначаються в технічній документації до того чи іншого програмного забезпечення [1].

Окремо досліджувався вплив часового кроку на протікання певних процесів [2], однак незалежність результатів розрахунку загалом від часової складової є обов'язковою умовою. Розрахунок, який її порушує, не може бути прийнятним [3]. Так само і час розрахунку, очевидно, є обернено пропорційний мінімальному використаному часовому кроку. Однак, ця залежність в певному діапазоні значень може порушуватись у випадку обчислень процесів, що протікають у пасивних системах. Це є наслідком складної взаємодії математичних моделей коду з притаманною таким системам осциляцією параметрів.

Формулювання мети. Для визначення налаштувань моделі в коді TRACE, які дозволять покращити процес розрахунку як в якісному, так і кількісному відношенні, необхідно дослідити основні налаштування, які визначають застосовані рівняння, спрощення і граничні умови. Одним з визначальних значень в цьому сенсі є мінімальна збіжність тисків в сусідніх нодах.

Основна частина. В якості критеріїв збіжності обраний код пропонує дві змінні: EPSO – критерій збіжності зовнішніх ітерацій за тиском, та EPSS – критерій збіжності стаціонарного стану. Офіційна технічна документація для програмного продукту рекомендує залишати обидва налаштування на рівні встановити рівним 10^{-4} , однак, зважаючи на те, що цей параметр оцінювався для систем з примусовою циркуляцією і може відрізнятись для систем з природньою циркуляцією, так само, як у випадку часового кроку.

Для проведення дослідження була використана попередньо валідована за допомогою експериментальних даних модель OSU-MASLWR розроблена за допомогою графічного інтерфейсу SNAP. Також, модель була протестована відносно чутливості до часового кроку, що показало незалежність отриманих результатів.

Дослідження проводилося на результатах розрахунку тиску в реакторній оболонці під час перехідного процесу, пов'язаного зі втратою живильної води. Детальний опис експерименту наведено в [4]. Експеримент SP-2 являє собою втрату установкою MASLWR живильної води, внаслідок якої відбувається швидке зростання тиску в корпусі реактора, і ділиться на три фази.

Для оцінки впливу обраного налаштування була виконана серія розрахунків зазначеного перехідного процесу зі змінною EPSO в діапазоні від 10^{-2} до 10^{-6} . Далі отримані результати порівнювалися між собою і з оригінальним розрахунком. Для оцінки впливу параметру на точність результату порівнювався перебіг зміни тиску в компенсаторі тиску, при чому враховувалися характер і часові рамки різних фаз процесу (рис. 1). Вплив на тривалість розрахунку оцінювався через кількість часу, яка була витрачена на розрахунок при сталій завантаженості центрального процесора використаного комп'ютера.

Як видно з рис. 1 при зміні критерію збіжності перебіг подій змінюється незначно, і відхиленням знехтувати. Тривалість перебігу та час зміни фаз процесу також змінюється в рамках відхилень, якими можна знехтувати.

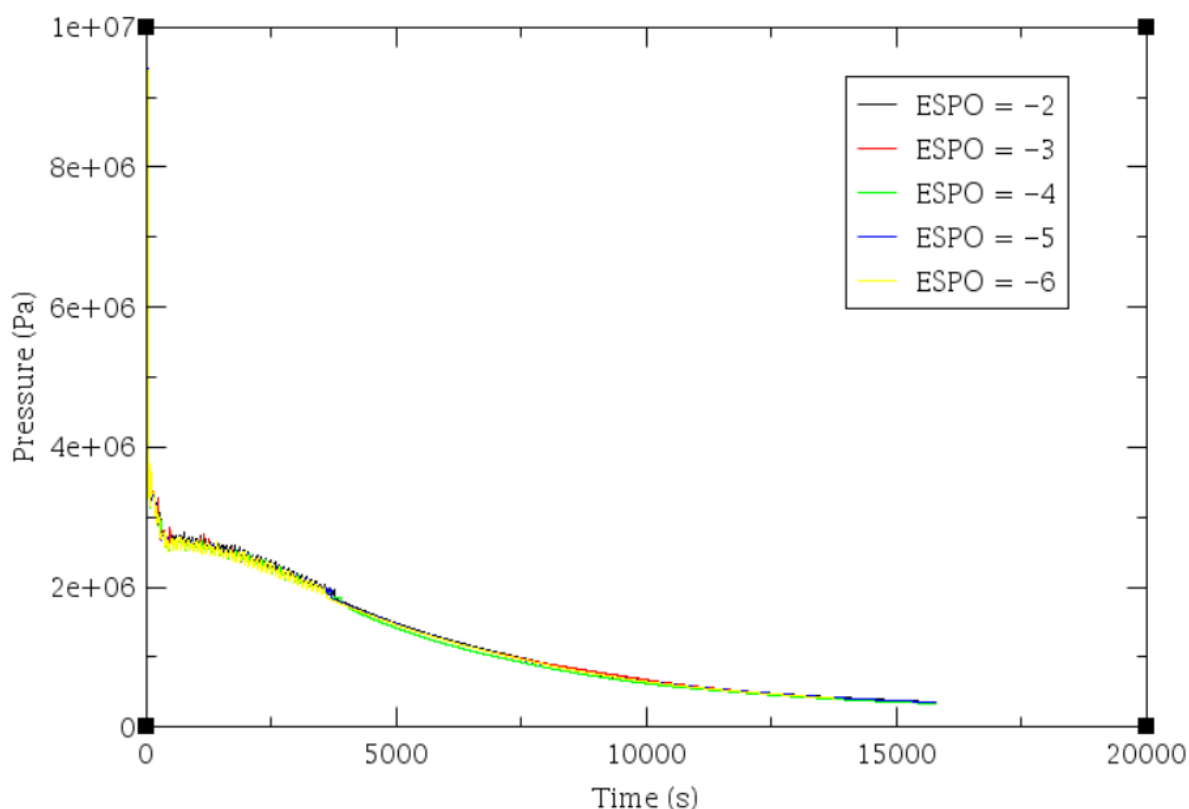


Рисунок 1 – Вплив обраного параметру на перебіг подій на прикладі зміни тиску в компенсаторі тиску

Таким чином, можна зробити висновок, що з точки зору точності розрахунку критерієм збіжності тиску можна знехтувати, прийнявши значення за замовчуванням $ESPO = 10^{-4}$.

Стосовно впливу на часову характеристику, змінна значно впливає на час розрахунку, коливання складають більше 1000 секунд, тобто 25 % (відносно оригінального розрахунку), що є очікуваним, зважаючи на природу параметра. Для першої фази різниці в часі майже немає, після початку другої фази вона різко зростає і продовжує поволі зростати до кінця розрахунку.

Неочікуваним результатом є те, що збільшення часу розрахунку не є пропорційним зростанню критерію збіжності (рис. 2). Крива часу зростає аж до $ESPO = 10^{-4}$, після якого спостерігається різке падіння після чого різко зменшується до значення $ESPO = 10^{-5}$. Далі значення продовжує змінюватися нелінійно. Початково, ефект був спостережений при проведенні серії дослідів в кроком зміни параметра в 1000, однак після деталізації результатів було отримано, що найменших часових затрат розрахунок вимагає при значенні $ESPO = 1,1 \cdot 10^{-4}$. При цьому відносно оригінального розрахунку затрачений час скоротився на 54 % без втрати точності. Таким чином, наприклад, при зменшенні критерію в 1000 разів відносно другого розрахунку, час розрахунку майже не зростає. Значення параметру,

запропоноване розробниками коду, є найбільш часозатратним в діапазоні, що розглядається (рис. 6), найменш затратним є значення $ESPO = 1,1 \cdot 10^{-5}$.

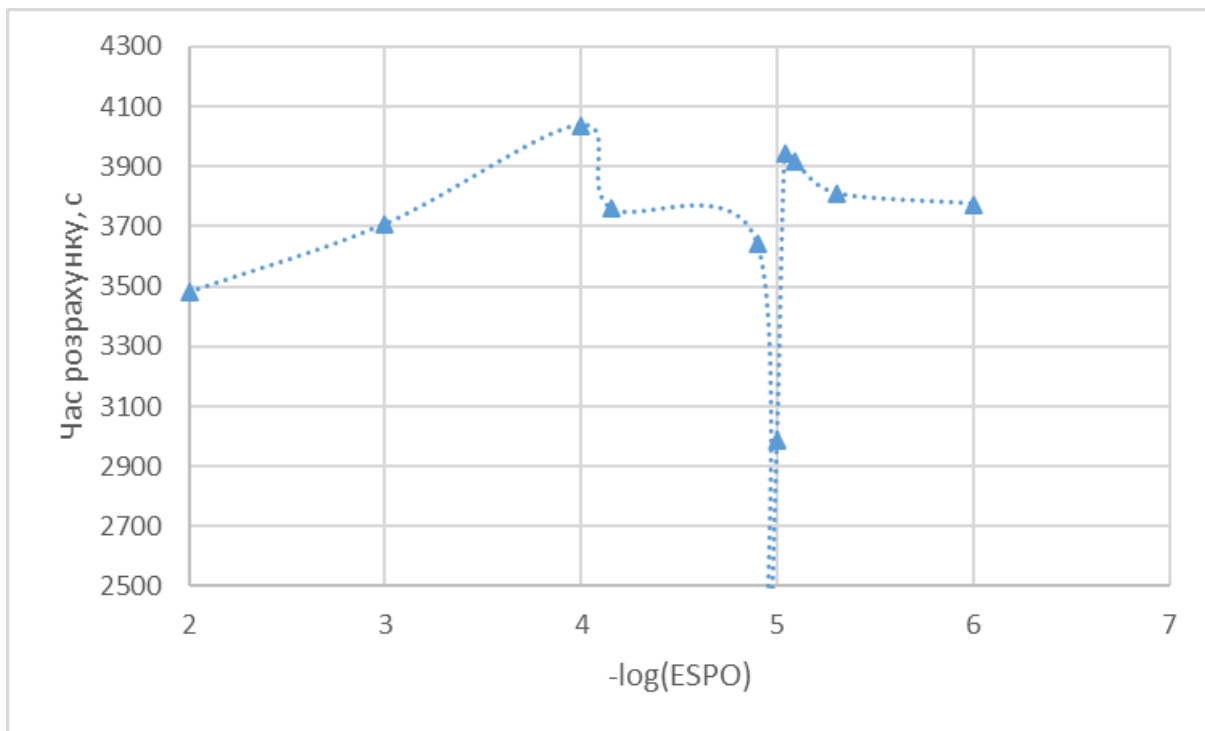


Рисунок 2 – Порівняння часу розрахунку для різних значень параметру, що розглядається (в логарифмічній шкалі)

Висновки. Підсумовуючи, розглянута змінна не впливає значною мірою на точність розрахунку, однак застосовуючи значення, відмінне від запропонованого технічною документацією, можна досягти значного прискорення розрахунків. Це дозволить виконувати більший обсяг роботи за той самий час, здешевшуючи експлуатацію існуючих ЯУ і введення в експлуатацію нових.

Перелік посилань:

1. TRACE V5.0 Theory Manual. - Washington, DC: Division of Safety Analysis, Office of Nuclear Regulatory Research, 722 c.
2. Bertran M. J. TRACE Code Validation for Natural Circulation During Small Break LOCA in EPR-Type Reactor : thesis. 2011.
3. Analyses of the OSU-MASLWR Experimental Test Facility / F. Mascari et al. Science and Technology of Nuclear Installations. 2012. Vol. 2012. P. 1–19.

¹ Магістрант 2 курсу Корольчук В.Ю.

¹ Доц., к.т.н. Бібік Т.В.

<https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=f-13UKcAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

РОЗРОБКА ПЛАНУ ІНТЕГРАЦІЇ ВОДНЕВОЇ СТАНЦІЇ У ПРОЄКТ АЕС

Вступ

Застосування атомної енергетики для виробництва водню є перспективним напрямком розвитку енергосистеми України, що відкриває широкі можливості для зменшення залежності від викопного палива та сприяє екологічній трансформації промисловості. Атомні електростанції (АЕС), які забезпечують стабільне електропостачання та працюють у базовому режимі, можуть використовувати частину виробленої електроенергії для електролізного виробництва водню. Це особливо актуально в умовах, коли є надлишок електроенергії, наприклад, у нічний час або в періоди низького споживання. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати наявні енергетичні ресурси та зменшити ризики перевантаження мережі.

Концепція інтеграції

Запропоновано використання електролізних установок безпосередньо на території АЕС або в її санітарно-захисній зоні. Це рішення дозволяє мінімізувати втрати електроенергії під час її транспортування та забезпечити безперервне виробництво водню без необхідності створення додаткової генерації. Основними технологіями, що застосовуються для виробництва водню, є лужний електроліз (AEL) та протонно-обмінна мембрана (PEM). Лужний електролізер характеризується високою надійністю та довговічністю, тоді як PEM-електролізери мають вищу ефективність і можуть працювати в умовах змінного навантаження [1].

Електролізери підключаються до мережі середньої напруги (20-30 кВ), що дозволяє ефективно використовувати надлишкову генерацію електроенергії. Вибір конкретної технології залежить від параметрів електропостачання АЕС, доступних ресурсів води та необхідного рівня чистоти водню для подальшого використання [2].

Технічна дорожня карта

Технічне обґрунтування включає підключення електролізерів до електромережі середньої напруги, що забезпечує їх стабільну роботу та високу ефективність. Інтеграція з системами охолодження та водопостачання є критично важливою, оскільки процес електролізу супроводжується значним виділенням тепла. Використання сухих градирень дозволяє забезпечити необхідне охолодження без додаткового навантаження на основні технологічні процеси АЕС.

Також передбачається встановлення автономних насосних станцій, які забезпечать стабільну подачу води необхідної якості, та систем стисненого повітря для роботи електролізерів. Усі ці заходи спрямовані на підвищення ефективності процесу та зменшення впливу на наявну інфраструктуру АЕС [3].

Економічне обґрунтування

Розрахунки показують, що витрати на виробництво 1 кг водню становлять 3-6 євро, залежно від вартості електроенергії. Основні витрати включають енергоспоживання електролізерів, витрати на водоочищення, компресію та зберігання водню. Основними потенційними споживачами водню є металургійні підприємства, які можуть використовувати його для відновлення заліза, а також транспортний сектор, що переходить на екологічно чисте паливо.

Крім того, водень може використовуватися для балансування енергосистеми шляхом його подальшої конверсії в електроенергію у періоди пікового навантаження. Враховується можливість транспортування водню трубопроводами, залізничними цистернами або автомобільним транспортом залежно від потреб ринку.

Ліцензування та регулювання

Визначено ключові регуляторні аспекти впровадження водневих технологій у сектор атомної енергетики. Основними нормативними документами є директива ЄС 2018/2001 (RED II) [4], яка визначає правила виробництва відновлюваної енергії, та стандарт ISO 14687, що встановлює вимоги до чистоти водню для різних галузей промисловості.

Для безпечної інтеграції водневого виробництва на АЕС необхідно забезпечити відповідність стандартам IEC 60079 [5], що регулюють проектування обладнання у вибухонебезпечних середовищах. Також важливим аспектом є розробка нормативних документів щодо транспортування та зберігання водню, які повинні відповідати міжнародним стандартам безпеки [6].

Реалізація проекту

Передбачається реалізація водневої станції на промисловому майданчику АЕС із потужністю 45 МВт, де електролізери будуть підключені до мережі середньої напруги для оптимального використання надлишкової електроенергії [7, 8]. Для компресорних установок передбачено окреме електроживлення на рівні 6 кВ, що дозволяє підвищити ефективність процесу стиснення водню перед його транспортуванням чи зберіганням.

Для зберігання водню будуть використовуватися високонапірні резервуари (350-700 бар) або криогенні установки, що забезпечать можливість довготривалого зберігання водню при температурі - 253 °С.

Комунікація та поширення інформації

З метою популяризації водневих технологій проводяться наукові конференції, публікації у спеціалізованих виданнях, а також освітні заходи для студентів та фахівців галузі. Важливим напрямком є залучення міжнародних партнерів та інвесторів, що дозволить забезпечити фінансування подальших досліджень та впровадження водневих технологій у промисловість [9].

Висновки

Інтеграція водневого виробництва на базі АЕС є економічно та технологічно обґрунтованим рішенням, що сприятиме підвищенню енергетичної незалежності країни. Використання водню як енергоносія дозволяє знизити викиди CO₂ та сприяє розвитку низьковуглецевої економіки.

Подальші дослідження повинні бути зосереджені на оптимізації технологій зберігання та транспортування водню, а також на розробці ефективних механізмів його використання у промисловості та транспортному секторі.

Перелік посилань:

1. Мазурок О.С. (Ph.D.). «Атомна воднева когенерація на АЕС України в рамках проекту Євроатом NPHYCO: Перші результати.» ТОВ «Енергобезпека груп», Київ, Україна.
2. Oleksandr Mazurok (Ph.D.), Martin Kykal, Vasyl Korolchuk. «NPP modification opportunity by hydrogen technologies implementation: assessment in frame of the Euratom project NPHyCo.» ES Group LLC, Kyiv, Ukraine. ICONE31
3. Мазурок О.С. (Ph.D.), Корольчук В.Ю. «Атомна воднева когенерація на АЕС України в рамках проекту Євроатом NPHYCO» // Збірник тез VI Міжнародної конференції «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику», Київ, 26-27 вересня 2024 р. – С. 139-143.
4. Директива (ЄС) 2018/2001 щодо сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел (RED II).
5. IEC 60079:2020 Вибухонебезпечні атмосфери – класифікація зон та вимоги до встановлення.

6. ISO 14687:2019 Водневе паливо – специфікація продукту.
7. Програма Hydrogen TSP. Міжнародне енергетичне агентство (IEA), Щорічний звіт, Париж, 2022.
8. Регламент (ЄС) 2020/852 про створення системи для сприяння сталим інвестиціям.
9. Технології та застосування зберігання водню. Elsevier, Science Direct, 2020.
10. Інтеграція водневих технологій в атомні електростанції. OECD – Ядерне енергетичне агентство (NEA), Звіт № 7564, Париж, 2021.

¹ Аспірант 2 курсу Печериця І.О.

¹ Доц., к.т.н. Клевцов С.В.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДХОДИ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ МУЛЬТИФУНКЦІОНАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРУ ВВЕР-1000 ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЗАХИСТІВ АТОМНОЇ СТАНЦІЇ

За результатами аналізу [1] були обрані події які мали такий характерний вхідний стан: Переведення реакторної установки енергоблоку в підкритичний стан дією аварійного захисту внаслідок складних перехідних процесів в енергосистемі України, що виникли через ракетну атаку агресора (рф) на об'єкти енергетичної інфраструктури:

- 1ХМЕ-П23-10-11-22 [2].
- 2ХМЕ- П23-11-11-22 [3].
- 0РОВ-П23-06-11-22 [4].
- 3ЮУК-П05/1-05-11-22 [5].

Насправді у всіх цих подій одна схожість: ракетна атака, що призвела до складних перехідних процесів у енергосистемі.

Згідно перебігу цих подій було встановлено необхідні вимоги для моделювання і проведено аналіз існуючої моделі мультифункціонального тренажеру ВВЕР-1000. Через недостатню деталізацію існуючої моделі (більшість необхідних захистів та процесів не знаходились в об'ємі моделювання), було визначено об'єм необхідного домоделювання, а саме:

- Збільшення ефективності роботи 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.
- Розробка та валідація спеціальної автоматики виділення енергоблоків АЕС на окремий район навантаження.

Так, як моделювання відбувається засобами 3KEYMASTER, система буде складатися з двох частин.

Першою частиною буде система детекторів для моніторингу в реальному часі режимних параметрів роботи енергосистеми, в т.ч. параметри що впливають на стійкість ОЕС, а саме поточні значення кутів та частоти, рівнів напруги, перетоків потужності, а також режимів роботи основних механізмів АЕС, в тому числі ГЦН, при пуску, роботі та гальмуванні агрегатів, стану засобів регулювання напруги, для ефективного виявлення ненормальних режимів роботи. При моделюванні даної системи важливо впровадити фіксування гармонік 3-го і 5-го порядку, так як в існуючій моделі тренажеру такого функціоналу немає.

Гармоніки були реалізовані за допомогою об'єкту «Remote function», який при його активації імітує гармоніки необхідного порядку.

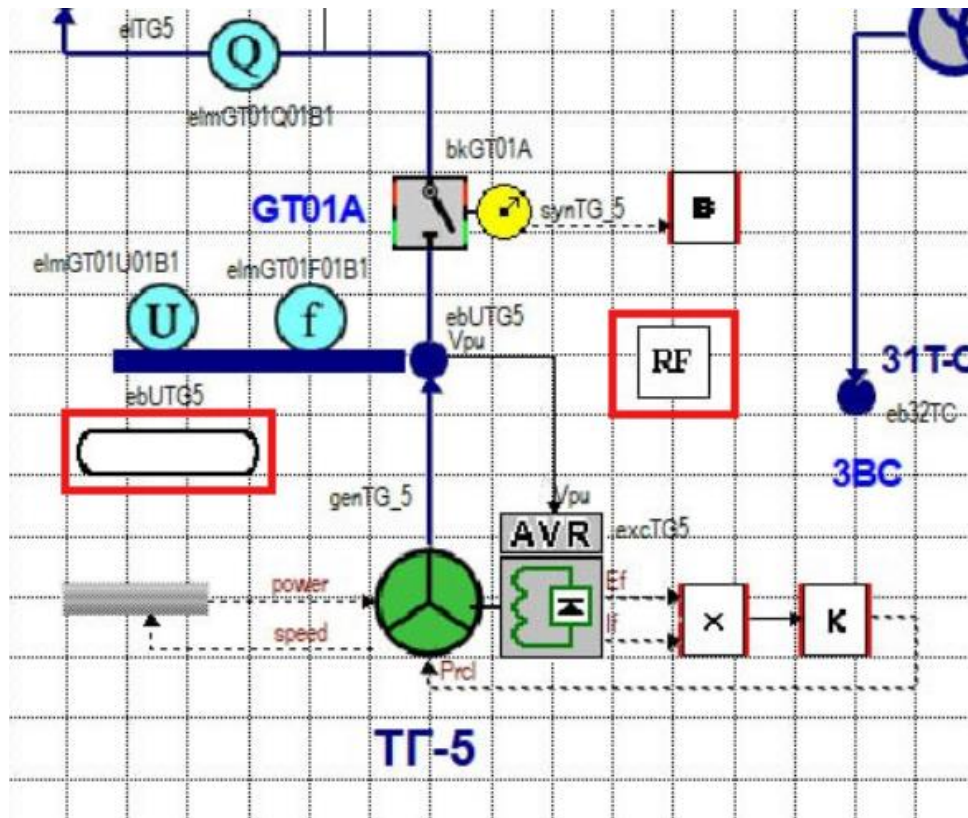


Рисунок 1 – Датчики та керуючі функції системи у моделі

Також на рисунку є частина моніторингової системи, яка реалізована за допомогою «ASSIGN» підмодулю, тому що класичний модуль «TRANSFER» не надає необхідного функціоналу.

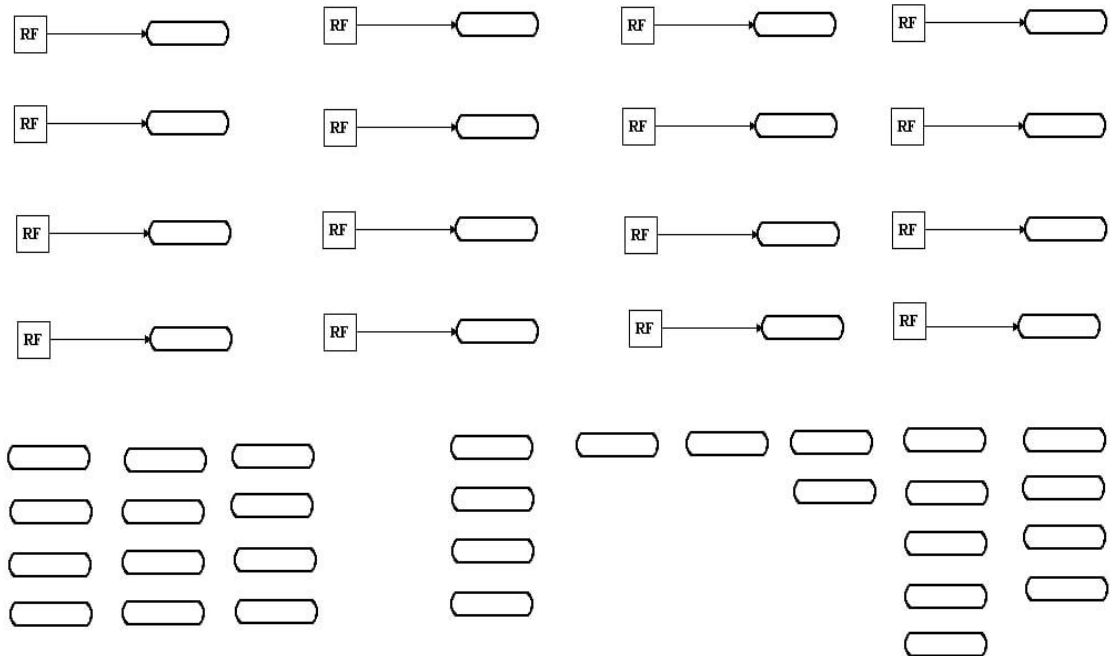


Рисунок 2 – Моніторингова частина системи. Датчики

Датчики та «Remote function» були встановлені в частинах систем, вказаних раніше і їх інтерфейси зібрані на одні сторінці моделі для подальшого валідації и тестування.

Далі, згідно [6] ця система передає необхідні сигнали впливу на системи безпеки та аварійного реагування (наприклад диференційні захисти блокових трансформаторів), щоб уникнути зайвого спрацювання захистів та вимкнення енергоблоків від мережі.

Перелік посилань:

1. Печериця І.О., Клевцов С.В. «Огляд звіту з аналізу експлуатаційних подій на українських атомних електростанціях за 2022 рік». Матеріали XXI Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів м. Київ, 23–26 квітня 2024 року. С 26-27.

2. 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.

3. 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.

4. Звіт 0РОВ-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. 12. 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;

6. 00123456.ЕЦ.00.ІН.04 Інструкція щодо попередження та ліквідації аварій в електричній частині ПАЕС.

¹ Магістрант 2 курсу Самчук М.Б.

¹ Доц., к.т.н. Філатов В.І.

https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=new-article&hl=ru&imq=

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОБГРУНТУВАННЯ ЗНЯТТЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ АЕС З ВВЕР

Постановка проблеми та її актуальність. Ядерна енергетика є ключовим елементом енергетичної безпеки України, забезпечуючи значну частку електроенергії. Проте кожен атомний енергоблок має обмежений термін експлуатації, після чого постає необхідність його безпечного виведення з експлуатації. В Україні значна частина реакторів типу ВВЕР наближається до завершення проектного терміну служби, що вимагає розробки ефективних стратегій їх зняття з експлуатації. Процес зняття з експлуатації АЕС є складним і багатофакторним завданням, яке включає технічні, екологічні, економічні та соціальні аспекти. Основні проблеми, що виникають у цьому контексті, включають [1]:

- Вибір оптимального методу демонтажу (невідкладний, відкладений або часткове захоронення).
- Високі витрати на зняття з експлуатації та управління радіоактивними відходами.
- Забезпечення безпеки персоналу та мінімізація екологічного впливу.
- Відповідність нормативним вимогам та міжнародним стандартам.

Актуальність проблеми зумовлена тим, що Україна вже зараз повинна визначити ефективну стратегію демонтажу АЕС, яка забезпечить безпеку населення, мінімізує фінансові витрати та сприятиме подальшому використанню майданчиків після зняття з експлуатації [2]. Досвід міжнародних програм у сфері демонтажу ядерних установок підтверджує важливість детального планування та оптимізації ресурсів, що дозволить уникнути екологічних і технічних ризиків у майбутньому.

Аналіз останніх досліджень. Проблема зняття з експлуатації атомних електростанцій (АЕС) є актуальною як для України, так і для світової спільноти. Останні дослідження у цій сфері зосереджуються на розробці оптимальних стратегій демонтажу, оцінці економічної ефективності методів зняття з експлуатації, мінімізації радіаційних ризиків та екологічних наслідків [3].

Технічні аспекти та методи демонтажу. Сучасні дослідження вказують на три основні методи зняття з експлуатації: невідкладний демонтаж (Immediate Dismantling), відкладений демонтаж (Deferred Dismantling), захоронення на місці (Entombment).

Дослідження OECD Nuclear Energy Agency (2023) [4] підкреслюють, що країни з розвинутою інфраструктурою зняття з експлуатації частіше обирають невідкладний демонтаж, тоді як відкладений демонтаж є економічно привабливішим для країн із обмеженими ресурсами.

Економічні дослідження та фінансова складова. За даними IAEA (2022), витрати на зняття з експлуатації одного реактора типу ВВЕР можуть становити від 135 до 185 млн євро залежно від обраного методу [5]. Європейські країни створюють спеціалізовані фонди для фінансування демонтажу, що дозволяє уникнути економічних ризиків. Україна також має такі фонди, але їх ефективність потребує вдосконалення.

Екологічні та безпекові аспекти. Міжнародні дослідження (IAEA, 2021) підкреслюють необхідність багаторівневої системи захисту під час демонтажу ядерних об'єктів. Особлива увага приділяється поводженню з радіоактивними відходами (РАВ), які становлять найбільшу загрозу для довкілля [6]. В Україні діють стандарти НП 306.2.230-

2020, що регулюють цей процес, але дослідники вказують на необхідність гармонізації національних нормативів з міжнародними стандартами.

Досвід міжнародних програм. Дослідження демонтажу АЕС у Німеччині, Франції, США та Великій Британії (OECD, 2022) свідчать про ефективність комплексного підходу, що включає інноваційні технології (роботизовані системи, автоматизоване дезактивування) та ретельне фінансове планування. Зокрема, успішний демонтаж АЕС у Грайфсвальді (Німеччина) показав, що використання сучасних технологій дозволяє значно скоротити терміни та витрати на процес [7].

Формулювання мети. Метою даного дослідження є обґрунтування оптимального варіанту зняття з експлуатації атомних електростанцій з реакторами типу ВВЕР в Україні на основі аналізу технічних, економічних, екологічних та нормативно-правових аспектів.

Основна частина

1. Теоретичні основи зняття з експлуатації АЕС.

Зняття з експлуатації атомних електростанцій є завершальним етапом життєвого циклу ядерних установок. Процес передбачає демонтаж обладнання, поводження з радіоактивними відходами (РАВ) і відновлення території. Згідно з міжнародними стандартами (МАГАТЕ, OECD NEA), існує три основні підходи до демонтажу:

Невідкладний демонтаж – розпочинається одразу після зупинки реактора.

Відкладений демонтаж – передбачає консервацію на 30–50 років для зменшення активності матеріалів.

Захоронення на місці – використовується в крайніх випадках, коли демонтаж неможливий або економічно недоцільний.

Для України найбільш актуальним є вибір між першим і другим методом.

2. Нормативно-правова база і стандарти зняття з експлуатації.

В Україні процес зняття з експлуатації регулюється такими нормативно-правовими актами:

НП 306.2.230-2020 – встановлює основні вимоги до безпеки.

Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» – регламентує загальні принципи поводження з АЕС.

Міжнародні стандарти МАГАТЕ (SSG-47, GSR Part 5) – визначають глобальні підходи до демонтажу ядерних об'єктів.

Досвід країн ЄС і США показує, що ефективне зняття з експлуатації вимагає ретельного планування, прозорості фінансування та дотримання екологічних норм.

3. Аналіз варіантів зняття з експлуатації АЕС з ВВЕР.

Реактори ВВЕР мають особливу конструкцію, що впливає на вибір методу демонтажу. Оптимальним для України є відкладений демонтаж із частковими елементами невідкладного демонтажу.

4. Економічний розрахунок вибраного методу зняття з експлуатації.

Фінансові витрати на зняття з експлуатації АЕС оцінюються у 135–185 млн євро на один енергоблок ВВЕР-1000. Основні статті витрат:

Етап	Витрати, млн євро
Підготовчий етап	10–20
Вилучення ВЯП	15–20
Дезактивація та демонтаж	80–100
Управління РАВ	20–30
Рекультивация території	10–15
Загальні витрати	135–185

Міжнародна практика показує, що країни з розвинутою фінансовою інфраструктурою створюють фонди для накопичення коштів, що дозволяє уникнути перевищення бюджету та фінансових криз у процесі демонтажу [8].

5. Технічні та організаційні аспекти вибору методу зняття з експлуатації.

Технічні аспекти:

Використання роботизованих систем для демонтажу активних зон реакторів.

Хімічна дезактивація обладнання для зменшення рівня радіації.

Будівництво сховищ для довготривалого зберігання РАВ.

Організаційні аспекти:

Ліцензування процесу відповідно до вимог українського законодавства та міжнародних норм.

Забезпечення підготовки персоналу та використання сучасних засобів індивідуального захисту.

Чітке фінансове планування та контроль витрат.

Успішна реалізація зняття з експлуатації можлива лише за умови співпраці між державними органами, операторами АЕС та міжнародними партнерами.

Висновки. Зняття з експлуатації атомних електростанцій є складним багатофакторним процесом, що потребує ретельного планування, дотримання міжнародних стандартів безпеки та значних фінансових вкладень. Аналіз варіантів демонтажу реакторів типу ВВЕР показав, що найбільш доцільним для України є відкладений демонтаж із використанням сучасних технологій дезактивації та управління радіоактивними відходами.

Перелік посилань:

1. Письменний Є.М., Філатов В.І., Бойко Н.Г. (2023). Щодо підходу з визначення та обґрунтування стратегії зняття з експлуатації ядерних установок. Ядерна та радіаційна безпека, 1(97). 51-53.

2. НП 306.2.230-2020 «Загальні положення безпеки зняття з експлуатації ядерних установок».

3. International Atomic Energy Agency. Decommissioning of Nuclear Power Plants, Research Reactors and Other Nuclear Fuel Cycle Facilities. IAEA Safety Standards Series No. SSG-47. Vienna: IAEA, 2018.

4. OECD Nuclear Energy Agency. Decommissioning Nuclear Power Plants: Policies, Strategies and Costs. Paris: OECD, 2003.

5. IAEA. Design and Construction of Nuclear Power Plants to Facilitate Decommissioning. Technical Reports Series No. 382. Vienna: IAEA, 1997.

6. Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку».

7. OECD NEA. Selecting Strategies for the Decommissioning of Nuclear Facilities. Paris: OECD, 2012.

8. European Commission. Recommendations on the Financing of Decommissioning Activities for Nuclear Installations. Brussels, 2015.

9. United States Nuclear Regulatory Commission. Regulations for Decommissioning of Nuclear Facilities. Washington D.C.: NRC, 2011.

СЕКЦІЯ № 2

**Ядерна захищеність
та
нерозповсюдження**

¹ Магістрант 1 курсу Ушач С.М.

¹ Асист. Остапенко І.А.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВПЛИВ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРА НА ФІЗИЧНИЙ ЗАХИСТ ОБ'ЄКТІВ З ВИСОКИМ РІВНЕМ РИЗИКУ: АНАЛІЗ МІЖНАРОДНОГО ДОСВІДУ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ УКРАЇНИ

Постановка проблеми та її актуальність. Фізичний захист об'єктів критичної інфраструктури залежить не лише від технічних засобів, а й від професіоналізму персоналу. Помилки, недбалість, корупційні ризики або недостатній рівень підготовки можуть звести нанівець навіть найсучасніші технологічні системи. Міжнародний досвід свідчить, що якісна підготовка кадрів, застосування психологічного відбору та впровадження культури безпеки є ключовими елементами ефективного захисту. Україна, маючи значну кількість об'єктів критичної інфраструктури, потребує вдосконалення системи підготовки персоналу відповідно до кращих міжнародних практик. Невирішеним раніше завданням у рамках цієї проблеми є створення уніфікованої методології оцінки впливу людського фактора на фізичний захист критичної інфраструктури України, яка б інтегрувала кращі міжнародні практики та сучасні підходи до аналізу ризиків. Дослідження у цій сфері зазвичай зосереджені на технічних аспектах захисту, тоді як роль людини часто розглядається лише поверхово.

Аналіз останніх досліджень. Міжнародні організації, зокрема МАГАТЕ та INTERPOL, проводять численні дослідження щодо людського фактора у сфері фізичної безпеки. Дослідження Sandia National Laboratories (США) демонструють, що до 80 % інцидентів у сфері фізичної безпеки пов'язані з людськими помилками або зловмисними діями персоналу [1].

Досвід Великої Британії показує, що програми постійного тренування персоналу значно знижують ймовірність загроз, а регулярні перевірки на доброчесність суттєво зменшують корупційні ризики.

У Франції використовується модель «Чотири рівні контролю», що передбачає психологічне тестування, навчання, симуляційні тренування та безперервний моніторинг поведінки персоналу [2].

Наразі в Україні існують окремі навчальні ініціативи та курси для персоналу об'єктів критичної інфраструктури, але єдиної централізованої системи підготовки, яка б відповідала міжнародним стандартам і включала психологічне тестування, немає.

Формулювання мети. Дослідити міжнародні підходи до управління людським фактором у фізичному захисті об'єктів критичної інфраструктури, оцінити їхню ефективність та запропонувати можливі напрями вдосконалення системи підготовки персоналу в Україні.

Основна частина. У міжнародній практиці існує кілька ефективних підходів до мінімізації людського фактора у сфері фізичного захисту.

У США та Великій Британії діють програми, що включають тестування кандидатів на стресостійкість, уважність, лояльність та моральну стійкість. В Україні цей підхід застосовується фрагментарно, що підвищує ризики внутрішніх загроз.

В Ізраїлі щомісячні симуляційні тренування дозволяють підтримувати високу готовність персоналу до реагування на надзвичайні ситуації. В Україні недостатня кількість тренувальних центрів та застарілі методики навчання обмежують можливості постійного підвищення кваліфікації.

У Франції та Німеччині впроваджено програми з формування культури безпеки, що включають анонімні канали повідомлення про порушення, корпоративну відповідальність та суворі санкції за недбалість. Також система безпеки критичних об'єктів передбачає спеціалізовані курси для співробітників, що працюють у високоризикових секторах, а також застосування симуляційних тренінгів для підготовки до надзвичайних ситуацій. В Україні такі механізми відсутні або малоефективні.

У Сінгапурі активно використовуються біометричні системи доступу, штучний інтелект для аналізу поведінки персоналу та автоматизовані системи контролю. В Україні потенціал таких технологій використовується недостатньо.

Для України актуальним є створення комплексної програми навчання персоналу критичної інфраструктури. Для прикладу створення Національного центру підготовки персоналу об'єктів критичної інфраструктури, де поєднувалися б міжнародні стандарти навчання, сучасні технології та практика психологічного тестування кадрів. Також доцільно впровадити обов'язкову атестацію працівників критичних об'єктів та регулярні психологічні перевірки для запобігання внутрішнім загрозам [3].

Деякі навчальні програми реалізуються при вищих навчальних закладах, МВС, Держспецзв'язку та Національній академії СБУ. Крім того, МАГАТЕ та інші міжнародні організації періодично проводять тренінги для фахівців із фізичного захисту. Однак ці ініціативи не є систематизованими, вони не охоплюють усі категорії персоналу, а також не передбачають єдиних вимог до оцінки знань і навичок.

Обов'язкова атестація працівників критичних об'єктів проводиться у певних сферах (наприклад, ядерна енергетика), але немає єдиного стандарту для всієї інфраструктури. Регулярні психологічні перевірки також не є загальноприйнятою практикою, хоча в деяких відомствах (зокрема, в силових структурах) такі процедури застосовуються.

Висновки. Розвиток системи підготовки та сертифікації персоналу у сфері фізичного захисту критичної інфраструктури є необхідним кроком для підвищення рівня національної безпеки. Україна повинна адаптувати міжнародний досвід та розробити власні стандарти підготовки кадрів, враховуючи специфіку національних загроз. Запровадження системи професійного навчання, оцінки компетенцій та регулярних тренінгів сприятиме зміцненню безпеки об'єктів критичної інфраструктури та підвищенню готовності до можливих кризових ситуацій.

Людський фактор є одним із ключових викликів у забезпеченні фізичного захисту ОКІ. Міжнародний досвід свідчить, що ефективна підготовка персоналу, регулярні тренування, застосування технологій контролю та формування культури безпеки значно знижують ризики, пов'язані з людським фактором. Україна має розширити програми навчання та впровадити системний підхід до підготовки кадрів, адаптувавши кращі міжнародні практики до національних умов.

Перелік посилань:

1. Garcia, M.L. (2008). The Design and Evaluation of Physical Protection Systems. Sandia National Laboratories, USA.
2. International Atomic Energy Agency. (2018). Enhancing Nuclear Security Culture in Organizations Associated with Nuclear and Other Radioactive Material. IAEA Nuclear Security Series No. 38-T. Vienna: IAEA.
3. Національний інститут стратегічних досліджень. Сучасні методологічні підходи до оцінки критичності об'єктів інфраструктури. – 2016.

¹ Аспірант 3 курсу Борзенков В.В.

¹ Доц., к.т.н. Бібік Т.В.

<https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=f-13UKcAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЗАХИСТ ЯДЕРНИХ УСТАНОВОК В УМОВАХ ВІЙНИ

Минуло більше трьох років відтоді, як світ сколихнула російська окупація Запорізької атомної електростанції в Україні. Але, незважаючи на плин часу, жахлива реальність залишається: росія зберігає контроль над АЕС, і ця ситуація постійно нагадує про страшні загрози, що стоять перед фізичним захистом у сучасному світі. У цих нових умовах для створення ефективної системи фізичного захисту потрібно переоцінити пріоритети, оскільки окупація показала абсолютно новий вид ризику: росія – ядерна держава – продовжує атакувати, обстрілювати, мінувати, окупувати та експлуатувати українські ядерні об'єкти в рамках своєї так званої «спеціальної військової операції» проти України.

Фізичний захист зазвичай спрямований проти загроз скоєння диверсій, терористичного акту або крадіжки ядерного матеріалу [1]. Але які загрози існують сьогодні? Одна з них є очевидною: навмисні ворожі дії державних суб'єктів проти об'єктів, що містять ядерні матеріали, такі як ядерні реактори, що може призвести до небезпечних для життя радіологічних наслідків.

Очевидним також є факт, що ядерні реактори, захоплені в рамках проведення військових операцій однієї країни проти іншої, можуть експлуатуватись без дотримання вимог законодавства у сфері фізичного захисту. Потенційні наслідки таких дій непередбачувані – від розплавлення активної зони до порушення захисної оболонки, що призведе до смерті людей, забруднення територій, паніки та безладу серед населення. І це не суто теоретичний сценарій. Російське вторгнення в Україну та захоплення Запорізької АЕС може призвести до транскордонного витоку радіоактивних матеріалів. Більше того, загроза таких дій перетворює станцію на інструмент примусу, де вона може бути використана як важіль для забезпечення військових або політичних переваг.

Російська окупація Запорізької АЕС з березня 2022 року вказує на численну кількість прогалин у підходах до побудови сучасних систем фізичного захисту. Однак в цій ситуації досить складно визначити межі ризиків та загроз, проти яких повинна протистояти система фізичного захисту. Деякі експерти використовують термін «ядерний тероризм» або «підтримуваний державою ядерний тероризм» для характеризування загрози.



Рисунок 1 – Окупаційні війська на тимчасово захопленій ЗАЕС

У 2002 році Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) опублікувало свій план дій із забезпечення фізичного захисту при боротьбі із загрозою ядерного тероризму. Цей план дій значною мірою сформував сучасний міжнародний режим фізичного захисту – величезну систему національних і міжнародних ініціатив, організацій, норм та правил, які на сьогодні є неефективними в ситуації, в якій опинились ядерні об'єкти в Україні [2].

Досі МАГАТЕ називало окупацію Запорізької АЕС «ризиком для ядерної безпеки», яка забезпечується, серед іншого, заходами з фізичного захисту. Але такі засоби як контроль доступу, відеоспостереження не є ефективними в умовах активної військової окупації. З огляду на те, що сучасна система фізичного захисту розроблялась з акцентом на загрозу з боку недержавних суб'єктів, запроваджені до цього часу підходи та технічні рішення залишаються неефективними.

Крім того, як чітко зазначено в Міжнародній конвенції про боротьбу з актами ядерного тероризму 2005 року, дії збройних сил регулюються іншими нормами міжнародного права, а не Конвенцією [3]. Іншими словами, термін «ядерний тероризм» не є корисним у ситуації із окупацією Запорізької АЕС. Використання цього терміну також ускладнює розуміння ризику саме збройного нападу, оскільки ядерний тероризм вже має свою власну систему підходів.

Як наслідок, доцільно запровадити новий термін «військова загроза», щоб відрізнити такого роду загрозу, яка характеризуватиметься саме збройним захопленням регулярною армією іншої країни ядерного об'єкту. На відміну від акту ядерного тероризму, властивого виключно на недержавних суб'єктів, цей новий термін стосуватиметься унікальних викликів, коли державний суб'єкт використовує власну армію для захоплення ядерного об'єкта іншої країни. При цьому, такі загрози потребуватимуть нових, нестандартних підходів для ефективної протидії їх негативним наслідкам.

Однією із життєздатних стратегії протидії військовим загрозам є створення зон захисту навколо атомних електростанцій. У цих зонах доцільно запровадити як режимні обмеження шляхом запровадження додаткових фізичних бар'єрів, посилення контролю доступу тощо, так і надати їм юридичний статус з метою розробки відповідних норм та правил її захисту на політичному рівні.

Нажаль, маючи досить тривалий час негативний досвід захоплення Запорізької АЕС, враховуючи постійні зусилля МАГАТЕ та особисто Генерального директора МАГАТЕ Гроссі на вирішення ситуації в Україні, створення таких зони досі не розглядається.

Наразі МАГАТЕ отримує повний доступ до Запорізької АЕС. У серпні 2022 року Гроссі очолив спеціальну місію з підтримки та допомоги для встановлення постійної присутності на захопленій атомній електростанції. Його команда стикнулась із проблемою обмеженого доступу до деяких зон, що робить неможливим здійснити об'єктивну оцінку стану ядерної безпеки на об'єкті. За таких обставин, саме МАГАТЕ має достатньо досвіду для того щоб оцінити реальні ризики військових загроз для ядерних об'єктів з метою напрацювання підходів до побудови захисту від такого роду загроз.

Наразі ми чуємо заклики від європейських лідерів про те, що росія продовжуватиме агресію проти України і країни Європи можуть стати наступною мішенню. За таких обставин вже зараз потрібно вжити заходів для посилення захисту ядерних об'єктів вдосконалюючи в першу чергу рекомендації МАГАТЕ з фізичного захисту.

І чим швидше міжнародне співтовариство запровадить ефективні заходи для протидії сьогоднішнім ризикам, тим більше шансів уберегтися від потенційно катастрофічних наслідків.

Перелік посилань:

1. IAEA, National Nuclear Security Threat Assessment, Design Basis Threats and Representative Threat Statements: Implementing Guide, IAEA Nuclear Security Series no. 10-G (Rev. 1).
2. IAEA, Nuclear Security Series no. 20.
3. Міжнародна конвенція про боротьбу з актами ядерного тероризму від 15.03.2026.

¹ Аспірант 3 курсу Гончарук В.Г.

¹ Доц., к.т.н. Бібік Т.В.

<https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=f-13UKcAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОПТИМІЗАЦІЯ ВПЛИВУ СИСТЕМИ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ НА ЕЛЕМЕНТИ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ ЯДЕРНОЇ УСТАНОВКИ

Постановка проблеми та її актуальність. У Збройних силах України під терміном радіоелектронна боротьба (РЕБ) розуміють [1] 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.

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

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 організовують окремим коштовним комплексом радіорозвідки [2].

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.

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.

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.

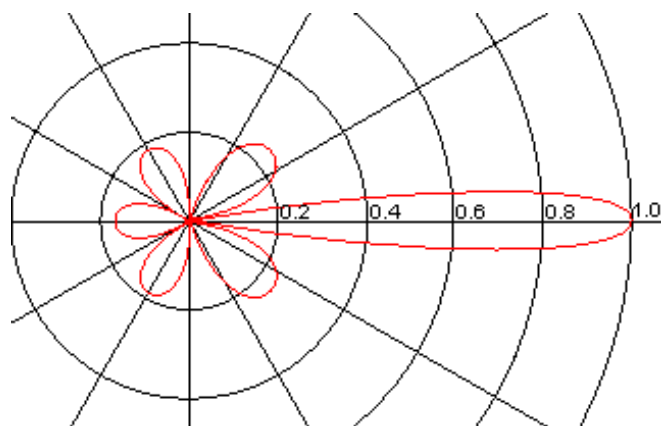


Рисунок 1 – Діаграма випромінювання направленої антени

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.

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. Мельников Ю.П. Радіотехнічна розвідка. Методи оцінки ефективності визначення джерел радіовипромінювання / Ю.П. Мельников, С.В. Попов. – М.: Радіотехніка, 2008. – 432 с.
2. Белокурський Ю.П., Іохов О.Ю., Козлов В.Є., Щербина О.О., 3D Принципи побудови системи радіоелектронного захисту підрозділів національної гвардії України під час виконання завдань за призначенням. Системи озброєння і військова техніка, 2017, № 4(52).

СЕКЦІЯ № 3

Теплогідравлічні процеси в тепло- і парогенеруючих установках

¹ Бакалаврант 4 курсу Волошин В.С.¹ Доц., к.т.н. Новаківський Є.В.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=ovbouE8AAAAJ&hl=uk>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ І ТЕМПЕРАТУРИ ПО ПЕРЕРІЗУ ТОПКОВОЇ КАМЕРИ ПРИ ПОЗОННОМУ РОЗРАХУНКУ

Постановка проблеми та її актуальність. З розвитком машинобудування в енергетиці постає проблема безперервно покращувати технології конструювання та побудови котельних агрегатів. Позонний розрахунок топки котла є важливим етапом теплотехнічного аналізу, що дозволяє оцінити розподіл температури газів по висоті топки. Температура газів в кожній із зон розраховуються, виходячи з тепловиділення в зоні, зміною ентальпії продуктів згорання і тепловідводу від зони. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення енергоефективності та екологічної безпеки котлів, особливо в умовах жорстких екологічних вимог та економічного прагнення до зменшення витрат на паливо. Використання позонного розрахунку дозволяє більш точно проєктувати топкові камери, оптимізувати режими роботи котла та продовжити термін служби обладнання.

Аналіз досліджень. Позонний тепловий розрахунок топкової камери виконують знаходячи розподіл теплових навантажень по висоті топки коли остання умовно розділяється на декілька зон і температура газів визначається на виході кожної з них. Перед цим розраховують топку в цілому і знаходять температуру газів на виході із неї [1].

Формулювання мети. Проаналізувати розподіл теплового навантаження і температури по висоті топкової камери за допомогою існуючих методик, зробити висновки та надати приклади по покращенню проєктування топкової камери.

Основна частина. Температура газів на виході із зони максимального тепловиділення розраховують методом послідовних наближень:

$$\vartheta'' = \frac{\frac{100}{100 - q_4} \beta_{\text{ст}} Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{в}} + i_{\text{тл}} + r l_{\text{г.отб}} - Q_{\text{бшл}}}{V c''} - \frac{4,9 \cdot 10^{-8} a_{\text{т}} T^{\text{м}4}}{B_{\text{р}} V c''} \varphi F, ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

де $\beta_{\text{ст}}$ – степінь вигорання;

$Q_{\text{в}}$ та $r l_{\text{г.отб}}$ – кількість тепла, на вході в топку з повітрям і газами рециркуляції;

$Q_{\text{бшл}}$ – втрати тепла з видаленням із зони шлаком;

$V c''$ – середня сумарна теплоємність продуктів згорання 1 кг палива;

$a_{\text{т}}$ – степінь чорноти топки;

φF – коефіцієнт ефективності на сумарну поверхню:

$$\varphi F = F_{\text{ст}} \varphi_{\text{ср}} + \varphi' F_{\text{с1}} + \varphi'' F_{\text{с2}}, \quad (2)$$

де $F_{\text{ст}}$ – степінь вигорання;

$\varphi_{\text{ср}}$ – середній коефіцієнт теплової ефективності стін зони;

φ' – коефіцієнт, характеризуючий віддачу тепла в вищерозміщену зону;

φ'' – коефіцієнт, характеризуючий віддачу тепла в сторону поду топки чи холодної воронки.

Температура газів на виході із зон, розміщених вище зони максимального тепловиділення:

$$\vartheta'' = \frac{\Delta\beta_{\text{ст}} Q_{\text{н}}^{\text{p}}}{V c''} + \frac{c'}{c''} \vartheta' - \left[1 + \left(\frac{T''}{T'} \right)^4 \right] \times \frac{4,9 \cdot 10^{-8} a_{\text{т}} T'^4 [F_{\text{с.ср}} (\varphi'' - \varphi') + \varphi_{\text{ср}} F_{\text{ст}}]}{2 B_{\text{р}} V c''}, ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

де $\Delta\beta_{\text{ст}} = \beta''_{\text{ст}} - \beta'_{\text{ст}}$ – доля вигорання палива в зоні;

$\vartheta', \vartheta''; T', T''$ – температури газів на вході і виході з аналізованої зони;

c', c'' – середнє значення теплоємності газів при температурах ϑ', ϑ'' ;

$F_{\text{ст}}$ – поверхня стін аналізованої зони;

$\varphi_{\text{ср}}$ – середній коефіцієнт теплової ефективності стін зони;

φ' – коефіцієнт, характеризує передачу тепла випромінюванням із нижче розташованої зони;

φ'' – те ж в вище розташовану зону.

Розбиття топки на зони відбувається виходячи з наступних міркувань. Зону розміщення пальників що характеризується максимальним тепловиділенням, доцільно розраховувати як одне ціле (зона активного горіння). Інша частина топкової камери можна розбити на 3-6 приблизно рівні частини по висоті топки. Приклад зображено на рисунку нижче (рис. 1).

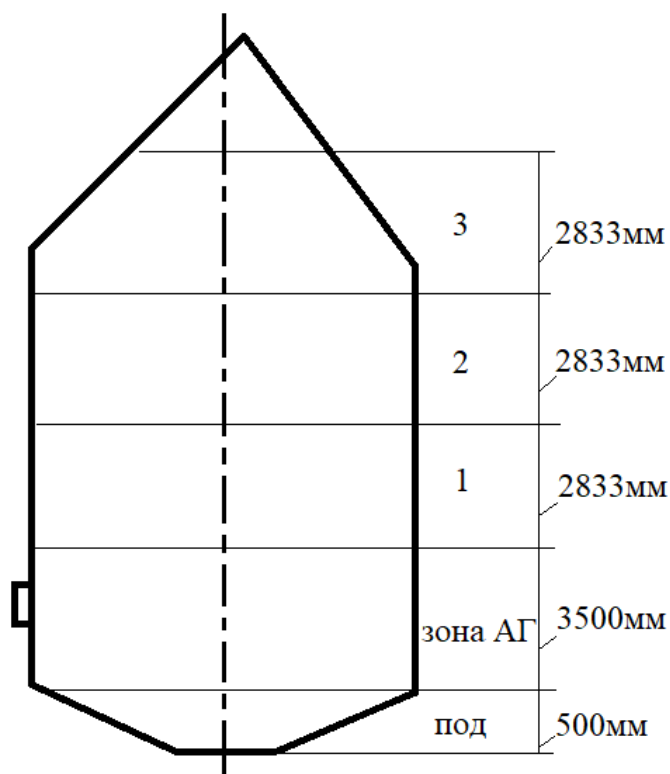


Рисунок 1 – Приклад розбиття топки

Процес розрахунку починається з визначення конструктивних характеристик кожної зони, після чого проводиться аналіз теплового навантаження та температури в кожній зоні. Цей аналіз передбачає визначення розподілу теплової енергії в межах топкової камери, що дає змогу оцінити ефективність процесу спалювання палива та рівномірність передачі тепла теплоносію. Результати позонного розрахунку прототипа котла БКЗ-75 на твердому паливі представлено в таб. 1.

Таблиця 1 – Розподіл теплового навантаження та температури в кожній зоні

Зона	Висота топки, м	Температура t , °C	Теплове навантаження q , кВт/м ²
Под	0,5	1700	265,9
АГ	3,5	1915	402,3
1	6,33	1377	238
2	9,16	1204	105
3	12	1090	72,5

На рисунку (рис. 1.2) графічно представлені результати розрахунків (таб. 1). На (рис. 1.2, а) представлена залежність теплового навантаження по висоті а на (рис. 1.2, б) розподіл температури.

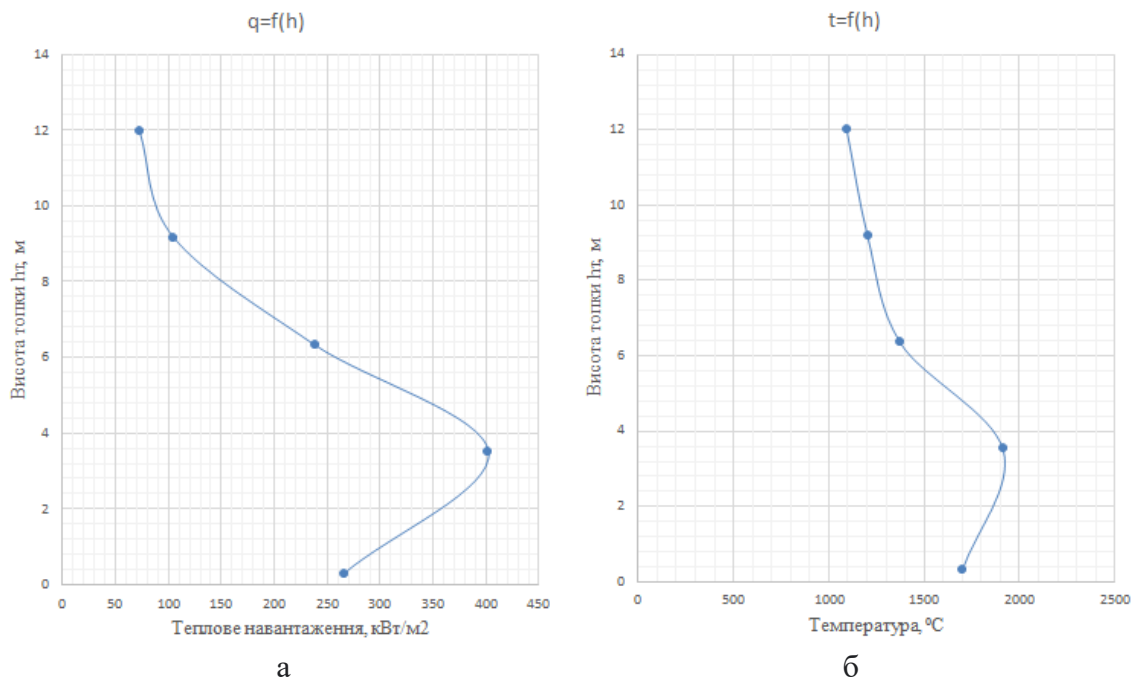


Рисунок 1.2 - Графіки розподілу теплового навантаження та температури

а – залежність теплового навантаження по висоті топки

б – розподіл температури по висоті топки

Висновки. Позонний розрахунок топки котла має ряд переваг перед тепловим розрахунком, що робить його важливим етапом сучасного теплотехнічного аналізу. Позонний розрахунок дозволяє визначати температурний режим у кожній зоні топки, а не використовувати усереднені значення для всієї камери. Визначення зон із найбільшим тепловим навантаженням дозволяє коригувати конструкцію, розташування пальників і системи теплообміну. Позонний аналіз дає змогу визначити місця утворення шкідливих викидів (CO, NO_x, сажі), що відповідає сучасним екологічним нормам. В підсумку позонний розрахунок є більш точним підходом у порівнянні з тепловим розрахунком, оскільки дає розподіл температур та теплових навантажень, що підвищує енергоефективність і надійність котельних агрегатів на стадії проектування.

Перелік посилань:

1. СОУ-Н ЕЕ 25.302:2007. Котли парові та водогрійні, турбіни, трубопроводи пари і гарячої води з тиском до 4 МПа. Положення про експертне обстеження (технічне діагностування): Настанова. – Київ: 2007

¹ Аспірант 3 курсу Горяной С.В.

² Проф., д.т.н. Вольчин І.А., ¹ проф., д.т.н. Туз В.О.
<https://scholar.google.ru/citations?user=8jO0IwoAAAAJ>

¹ КПІ імені Ігоря Сікорського

² Інститут теплоенергетичних технологій НАН України

ВИКОРИСТАННЯ АМІАЧНОЇ ВОДИ В ТРУБІ ВЕНТУРІ

Постановка проблеми та її актуальність. Високий рівень забруднення атмосферного повітря є однією з гострих проблем в Україні [1, 2], що вимагає створення нових, більш ефективних технологій боротьби із викидами забруднюючих речовин. Тому необхідність модернізації очисного обладнання теплоелектроцентралей, на яких здійснюється виробництво електричної та теплової енергії для комунального господарства та промисловості, є актуальною задачею [3, 4].

Аналіз останніх досліджень. Було розглянуто роботи авторів, що займаються очищенням димових газів твердопаливних котлів від забруднюючих речовин, зокрема в [5] пропонується застосування двох- або трьох-етапної схеми очищення запиленних газів для досягнення вищої ефективності. В [6] описано загальні аспекти технологій очищення від основних видів забруднюючих речовин. Дана тематика була висвітлена в Інституті теплоенергетичних технологій НАН України в фундаментальній науково-дослідній роботі «Комплексне очищення димових газів».

Формулювання мети. Мокрі скрубери з трубою Вентурі є основними пилоочисними установками існуючих підприємств теплоенергетичного сектору України. Тому в даній статті розглядається можливість використання мокрих скрубєрів Вентурі як апаратів комплексного очищення димових газів від твердих частинок та діоксиду сірки.

Основна частина. При математичному моделюванні було виконано оцінку заходів зростання ефективності осадження твердих частинок на краплях в дифузорі труби Вентурі. Ефективності уловлення твердих частинок в трубі Вентурі розраховано за формулою:

$$\eta = 1 - \exp \left(-\frac{3}{2} \frac{q_w}{D_d \cdot \rho_l} \cdot \int_0^L \eta_\Sigma(x) \cdot \left| \frac{v_p(x) - v_d(x)}{v_d(x)} \right| dx \right), \quad (1)$$

де q_w – щільність розпилення води в запиленому газовому потоці, кг/м³; η_Σ – коефіцієнт осадження твердих частинок діаметром d_p на сферичні краплі діаметром D_d ; ρ_l – густина рідини, кг/м³; v_p – швидкість частинок золи діаметром d_p , м/с; v_d – швидкість краплі діаметром D_d , м/с; L – довжина трубки Вентурі від сопла до виходу з трубки, м; x – координата вздовж осі трубки Вентурі [22].

Ефективність видалення твердих частинок можна підвищити за рахунок збільшення щільності розпилення і звуження горловини труби Вентурі. Розрахункова ефективність уловлювання твердих частинок краплями розміром 150 мкм при питомій витраті рідини більше 0,5 кг/м³ була вище 99,9 %.

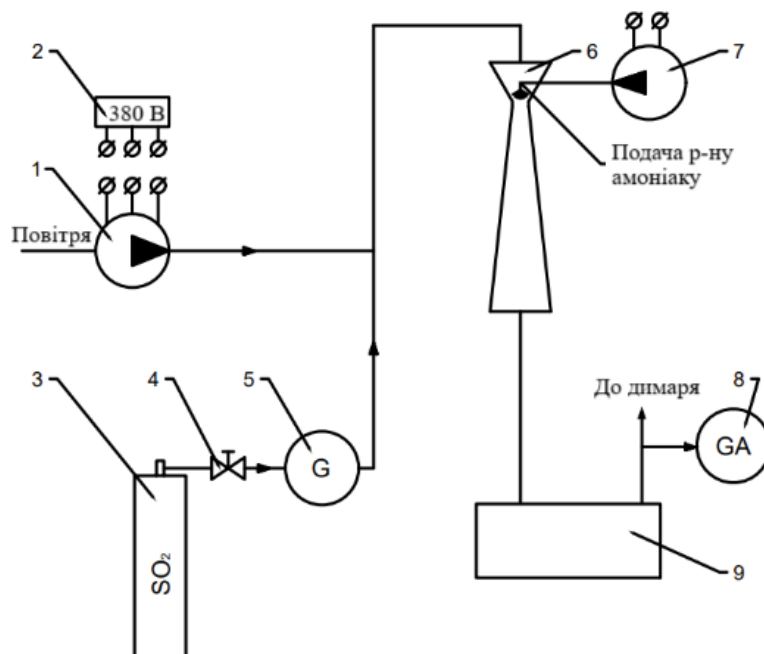
Використання водного розчину амоніаку в якості реагенту забезпечує зв'язування діоксиду сірки за загальною реакцією:



Перевагами мокрого амонійного методу десульфуризації димових газів є висока ефективність реагування між діоксидом сірки та амоніаком як в рідкій, так і в газовій фазі

в присутності водяної пари з можливістю отримати корисний продукт – сульфат амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, що є добривом. Висока розчинність солей амонію дає можливість відділити цільовий продукт від нерозчинної частини – легкої золи.

В ході експериментального дослідження вивчався процес поглинання діоксиду сірки водним розчином амоніаку. Схему експериментальної установки зображено на рис. 1.



- 1 – відцентровий вентилятор; 2 – частотний перетворювач; 3 – балон з діоксидом сірки;
4 – редуктор; 5 – реометр; 6 – труба Вентурі; 7 – розпилювач; 8 – газоаналізатор,
9 – сепаратор

Рисунок 1 – Схема експериментальної установки

В якості газової фази використовувалось повітря, в яке подавався діоксид сірки з витратою 6 л/хв, що забезпечувало концентрацію діоксиду сірки 1500 ppm. Було розраховано необхідну концентрацію водного розчину амоніаку для повного поглинання діоксиду сірки в залежності від щільності зрошення. Результати розрахунків представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Концентрації водного розчину амоніаку в залежності від щільності зрошення в трубі Вентурі

Щільність зрошення, кг/м ³	Витрата розчину, кг/год	Витрата розчину, кг/хв	Концентрація розчину амоніаку, %
0,1	17,813	0,297	2,039
0,2	35,626	0,594	1,019
0,3	53,438	0,891	0,680
0,4	71,251	1,188	0,510
0,5	89,064	1,484	0,408
0,6	106,877	1,781	0,340
0,7	124,690	2,078	0,291
0,8	142,503	2,375	0,255
0,9	160,315	2,672	0,227
1,0	178,128	2,969	0,204

Питома витрата водного розчину амоніаку була 0,6 кг/м³ модельного газу. Концентрація амоніаку у водному розчині відповідала стехіометричному мольному відношенню NH₃/SO₂=1,9-2.0. Залишкова концентрація діоксиду сірки становила 40 ppm. Тобто ефективність очищення димових газів від діоксиду сірки водним розчином амоніаку становила 97,15 %. Результати експериментального дослідження вказують на те, що використання водного розчину амоніаку є ефективним методом зв'язування діоксиду сірки.

Висновки

1. Експериментальні дослідження довели ефективність використання водного розчину амоніаку при розпиленні в горловині труби Вентурі для зв'язування діоксиду сірки.

2. Збільшення щільності зрошення відхідних газів крапельним реагентом позитивно впливає також на видалення твердих частинок, що дає можливість використовувати водний розчин амоніаку для комплексного очищення димових газів від твердих частинок та діоксиду сірки в одному апараті.

Перелік посилань:

1. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>.

2. Іванюта С.П., Яковлев Є.О. Аналіз тенденцій і характеру змін стану навколишнього середовища в Україні в контексті європейської інтеграції. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2013-12/Zminy2014-244f0.pdf>.

3. Модернізація ТЕЦ і розвиток «зеленої» енергетики. . – Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3863285-modernizacia-tec-i-rozvitok-zelenoi-energetiki-naftogaz-ta-swedfund-domovilisa-pro-spivpracu.html>.

4. Lauri Myllyvirta, Rosa Geiners (2021). Health Impacts of Coal Power Plant Emissions in Ukraine. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://energyandcleanair.org/publication/health-impacts-of-coal-power-plant-emissions-in-ukraine/>.

5. Глущенко О., & Литвинов М. (2023). Development of the Flue Gas Cleaning System of Boiler Units Operating on Solid Fuel. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, 1(26-01), 37–43. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-26-01-051>.

6. Ратушняк Г.С. Теоретичні основи технології очищення газових викидів / Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 96 с. – Електронний ресурс. – Режим доступу: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2023/Ratushnyak_2002_96.pdf.

¹ Магістрант 1 курсу Євтушок В.А.

¹ Доц., к.т.н. Новаківський Є.В.

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ЕКОНОМАЙЗЕРІ КОТЛА ТП-35У

Постановка проблеми та її актуальність. Моделювання теплообміну та гідродинаміки є фундаментальним елементом для проектування та оптимізації роботи енергетичного обладнання. У сучасних умовах необхідно постійно удосконалювати проектування таких систем, зважаючи на розвиток новітніх методів розрахунків та моделювання. Одним із найефективніших інструментів для аналізу та оптимізації теплогідравлічних процесів є CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics), що дозволяє чисельно визначати характеристики потоків та оцінювати ефективність роботи теплообмінників [1].

Аналіз останніх досліджень. CFD-моделювання активно застосовується у дослідженні та проектуванні енергетичного обладнання, включаючи водяні економайзери. Численні дослідження демонструють стабільність, надійність та точність CFD у забезпеченні необхідних результатів [2 – 4].

Формулювання мети. Метою даної роботи є розробка CFD-моделі водяного економайзера котла ТП-35У, оцінка можливостей ANSYS Fluent для виконання таких розрахунків, а також порівняння чисельного методу з іншими підходами до аналізу теплообміну.

Основна частина. Дослідження динаміки рідин і газів включає багато складних обчислень і великої кількості змінних. CFD-моделювання, на відміну від інших підходів, дозволяє гнучко налаштовувати умови дослідження, враховуючи складну геометрію та вплив різних параметрів потоку. CFD дозволяє відображати розподіл потоків і температурних полів, що неможливо реалізувати спрощеними аналітичними підходами [1]. Перевагами CFD є можливість багаторазового проведення моделювання без фізичних витрат і глибокий аналіз впливу конструктивних змін на ефективність роботи. Основними недоліками CFD є висока обчислювальна складність і необхідність ретельної верифікації отриманих результатів, оскільки точність розрахунків залежить від якості розрахункової сітки, вибору моделей турбулентності та коректного задання граничних умов [5].

CFD-моделювання базується на методі скінченних об'ємів. Область у потоці, яка аналізується, дискретизується на безліч малих елементів скінченного об'єму. Цей процес поділу області називається створенням сітки (meshing). Таким чином, кожен об'єм розглядається як контрольний об'єм. Контрольні об'єми мають певні характеристики, такі як маса, імпульс, енергія, турбулентні величини, часткові концентрації компонентів суміші та матеріальні властивості. Виходячи з поставленої задачі, вибираються потрібні характеристики контрольного об'єму для аналізу та розв'язання задачі течії. Теоретичний опис течії у контрольному об'ємі фізично представлений у вигляді системи диференціальних рівнянь, які можливо чисельно розв'язати. Ці рівняння описують рух рідини в обчислювальній області. Крім того, вони також піддаються дискретизації для подальшого аналізу течії [3, 6].

Аналіз у CFD передбачає багаторазове і послідовне розв'язання алгебраїчних рівнянь. Основна мета таких ітерацій – постійне покращення якості рішення після кожного кроку. Процес ітерацій триває до тих пір, поки не будуть досягнуті достатні значення глобальної похибки. Глобальна похибка – це різниця між значеннями вихідних параметрів, отриманими в поточному та попередньому розв'язках, усереднена по всій обчислювальній

області. Після багаторазових ітерацій досягається стан збіжності, коли глобальна похибка зменшується на 4 – 5 порядків [6].

При вирішенні тривимірних задач теплообміну та гідрогазодинаміки у складних геометріях, які вимагають детального опису цих процесів, ANSYS Fluent має переваги перед іншими програмними комплексами, такими як Simcenter STAR-CCM+, COMSOL, Autodesk CFD та ін. [5]. Fluent пропонує всі необхідні інструменти для проектування, оптимізації та аналізу роботи теплообмінного обладнання. Вбудовані в Fluent модулі, дозволяють по черговому виконувати окремі задачі моделювання, не залучаючи інше програмне забезпечення (рис. 1) [1, 6].

A	
1	Fluid Flow (CFX)
2	Geometry ✓
3	Mesh ✓
4	Setup ✓
5	Solution ✓
6	Results ✓

► Створення геометрії

► Генерація сітки

► Препроцесор (задання граничних умов)

► Вирішувач

► Постпроцесор

Рисунок 1 – Послідовність рішення задач в ANSYS Fluent

У рамках дослідження було побудовано 3D-модель економайзера котла ТП-35У, враховуючи реальні геометричні параметри (рис. 2). Для цього було використано вбудований модуль Geometry DesignModeler. Наступним етапом є генерація сітки (Mesh), яка впливає на точність результатів. На основі цієї моделі проведено CFD-аналіз методом скінченних об'ємів. Далі в препроцесорі (Setup) задаються граничні умови: INLET (вхід середовища), OUTLET (вихід середовища), WALL (поверхні теплообмінника). Файл з постановкою задачі передається модулю розрахунку (Solution), а результати розрахунків виводяться у постпроцесорі (Results) для аналізу та візуалізації.

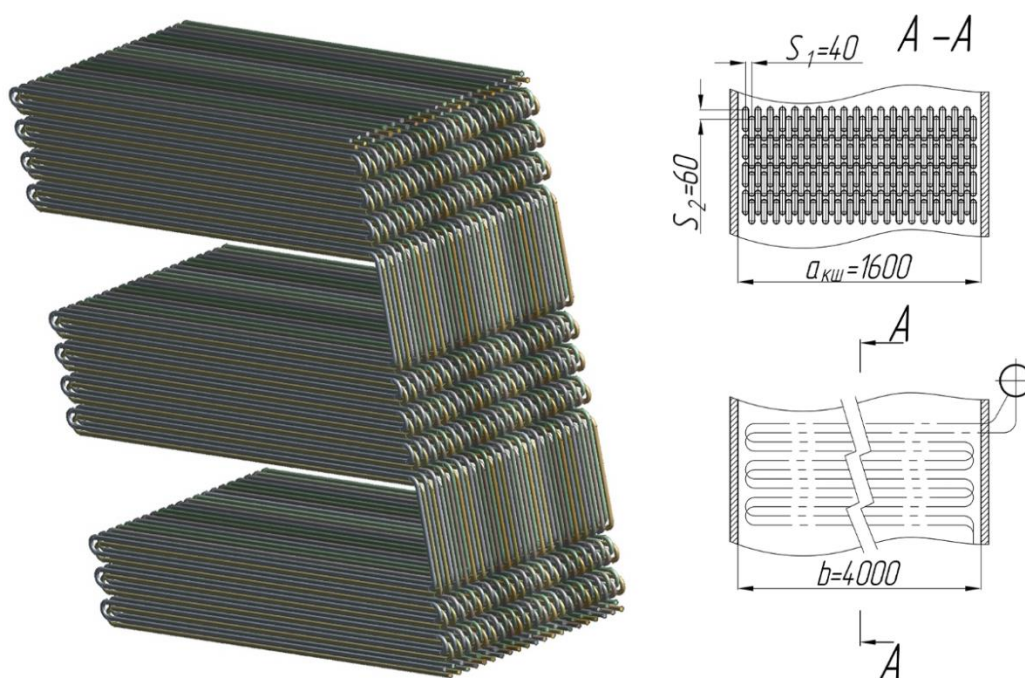


Рисунок 2 – Геометрична модель економайзера котла ТП-35У

Для дослідження роботи водяного економайзера CFD-модель дозволяє визначити розподіл температури, швидкості потоків та втрати тиску. Результати комп'ютерного моделювання далі слід верифікувати (підтвердити достовірність) з експериментальними або надійними теоретичними даними, як це виконано в дослідженнях [2 – 4]. Для розрахунку теплообміну і гідродинаміки вже існують перевірені часом розрахункові методики (нормативні методи). Тепловий та гідравлічний розрахунки економайзера дозволяють оцінити основні параметри за допомогою класичних аналітичних методів. Результати такого підходу показують, що CFD-методика забезпечує глибше розуміння процесу моделювання та дозволяє детальніше аналізувати розподіл температур, швидкостей потоків і втрати тиску в системі. При цьому похибка в рішенні, при правильно спроектованій моделі, складає близько 5 – 20 % [2 – 4]. Порівняння аналітичного розрахунку та можливостей CFD-моделювання свідчить про значну перевагу чисельних методів у відображенні реальної роботи теплообмінного обладнання [2].

Висновки. CFD-моделювання є ефективним інструментом аналізу та підвищення ефективності роботи теплообмінного обладнання. Чисельне моделювання дозволяє отримати інформацію, яку можна здобути лише шляхом дорогих експериментів або яка є недоступною для визначення жодним іншим методом. Використання CFD-методів у проектуванні дозволяє зменшити витрати на експериментальні дослідження та підвищити точність інженерних розрахунків. Основною метою застосування CFD є поглиблене розуміння фізичних процесів, що робить його важливим доповненням до інших методів аналізу та проектування.

Перелік посилань:

1. CFD-моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки засобами програмного комплексу : монографія / О.В. Баранюк, М.В. Воробйов, А.Ю. Рачинський. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. – 164 с.
2. MODELING OF FLOW AND TEMPERATURE FIELD IN AN ECONOMIZER / F. Brumerčjk et al. Applied Computer Science. 2016. Vol. 12, no. 2. P. 63–73.
3. CFD ANALYSIS OF ECONOMIZER TO OPTIMIZE HEAT TRANSFER / K. Obual Reddy et al. IJMET. 2014. Vol. 5, no. 3. P. 66–76.
4. Patil A. D. Optimization of Economiser Design for the Enhancement of Heat Transfer Coeffifficient. IJARME. 2012. Vol. 1, no. 3. P. 171–176.
5. Свинчук О.В., Клименко Я.В. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ ТА ГІДРОДИНАМІКИ ПЕРЕБІГУ РІДИН У ТРУБАХ. Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. 2024. Т. 1, № 07. С. 92–98. URL: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-13>
6. ANSYS Fluent Theory Guide [Електронний ресурс]. – Canonsburg, PA: ANSYS Inc., 2021. – URL: https://dl.cfdexperts.net/cfd_resources/Ansys_Documentation/Fluent/Ansys_Fluent_Theory_Guide.pdf.

¹ Аспірант 1 курсу Коваль С.О.

¹ Проф., д.ф.-м.н. Воропаєв Г.О.

https://scholar.google.com.ua/citations?user=Z_PYjkGAAAAJ&hl=ru

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕЧІЇ БАГАТОФАЗНОГО СЕРЕДОВИЩА З УРАХУВАННЯМ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ФАЗ І ФАЗОВ

Постановка проблеми та її актуальність

Airlift-насоси часто використовують для забезпечення циркуляції рідин у багатофазних середовищах. Зокрема, в енергетиці вони можуть слугувати для перекачування теплоносіїв у системах охолодження та в біореакторах (виробництво біогазу, біопалива), мінімізуючи при цьому витрати енергії [1, 2]. Водночас для високошвидкісних підводних апаратів (торпед, снарядів) застосовують явище суперкавітації: штучне створення великих парових порожнин, що дає змогу помітно знизити тертя і, відтак, скоротити витрати пального та навантаження на двигун [3].

Аналіз останніх досліджень

У низці робіт (наприклад, [1, 4]) продемонстровано, що правильний вибір параметрів Airlift-насоса (висота, наповненість, витрати газу, діаметр труби) забезпечує істотне зменшення втрат і підвищення загальної ефективності в енергетичних системах. Окремо в [3] наголошується на можливості значно збільшувати швидкість підводного руху за рахунок суперкавітації, що зменшує опір води й, таким чином, знижує витрати палива.

Формулювання мети

Визначити конструктивні та режимні параметри Airlift-насоса для ефективного застосування в енергетичних установках (теплообмін, біореакторні процеси).

Оцінити вплив суперкавітації на високошвидкісні підводні апарати та сформулювати рекомендації щодо зменшення споживання палива й навантаження на двигун.

Основна частина

1. Airlift-насос.

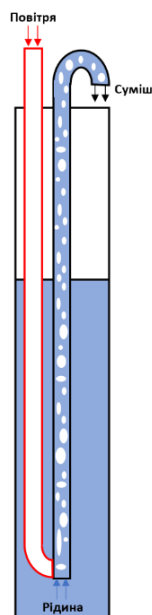


Рисунок 1 – Типова схема airlift насоса

Ефективність або ККД airlift насоса визначається формулою:

$$\eta = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\rho_l g \dot{Q}_l H_l}{p_{atm} \dot{Q}_a \ln\left(\frac{p_{inj}}{p_{atm}}\right)}. \quad (1)$$

Тут N_1 – потужність, яка потрібна для підняття маси води на висоту H_l . А N_2 – потужність компресору, яка необхідна для ізотермічного(зазвичай) стискання повітря від атмосферного тиску p_{atm} до тиску p_{inj} . $\dot{Q}_l$ – об’ємна витрата води, що виливається з труби, а $\dot{Q}_a$ – об’ємна витрата повітря, що подається інжектором, або компресором. ρ_l , g – густина рідини та прискорення вільного падіння відповідно.

Попередній аналіз показав, що регулювання співвідношення повітря/рідини і висоти занурення впливає на інтенсивність циркуляції та ККД насоса [1, 4].

Дослідження теплообмінних контурів та біореакторних систем свідчить, що Airlift-насоси забезпечують ліпшу енергоефективність порівняно з традиційними механічними помпами, оскільки немає рухомих лопатей і відносно низький рівень зносу.

2. Суперкавітація.

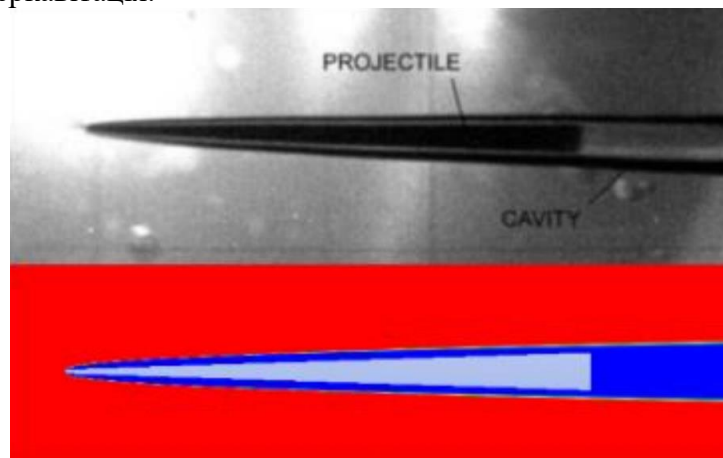


Рисунок 2 – Суперкавітуючий снаряд на швидкості 970 м/с

У підводних апаратах, що рухаються на високих швидкостях, створюється парогазова «оболонка» навколо корпусу, котра різко знижує тертя.

Це суттєво впливає на показники паливної економичності: при тій самій швидкості потрібна менша потужність, а отже зменшуються витрати пального та навантаження на двигун [3].

Правильний вибір кавітатора і вентиляційного режиму дозволяє підтримувати стійку суперкавітаційну бульбашку та забезпечує ефективне переміщення апарата[5, 6].

Experimental Photo



Рисунок 3 – Суперкавітуючий снаряд у повітряній порожнині

Висновки

Оптимізований Airlift-насос може суттєво підвищити енергоефективність у системах теплообміну та біореакторах (області, пов’язані з виробництвом та переробкою енергоресурсів).

Суперкавітація у високошвидкісних підводних снарядах забезпечує зниження опору води, що скорочує витрати пального та дозволяє зменшити розміри й потужність двигуна.

Подальші дослідження у цих напрямках дадуть змогу розробити комплексні рішення, спрямовані на підвищення загальної ефективності таких систем і швидкісних підводних технологій.

Перелік посилань:

1. Chisti Y., Moo-Young M. Airlift Reactors: Characteristics, Applications, and Design Considerations. Chem. Eng. Comm. 1987. Vol. 60. P. 195–242.
2. Dare A.A., Oturuhoi O. Experimental Investigation of Air Lift Pump // African Journal of Science and Technology. 2007. Vol. 8, № 1. P. 56–62.
3. Jiang Y., Shao S., Hong J. Experimental Investigation of Ventilated Supercavitation with Gas Jet Cavitator. Physics of Fluids. 2018. 30(1) 012103.
4. Hanafizadeh P., Ghorbani B. Review Study on Airlift Pumping Systems // Multiphase Science and Technology. 2012. 24(4). P. 323–362.
5. Lu R., Pan G., Tan K., Yin S. Numerical Simulation of Cavitation and Damping Force Characteristics for a High-Speed Supercavitation Vehicle // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. 9(11). 1171.
6. He Y., Zhang H. Analysis of Characteristics on a Compressed Air Power System Generating Supercavitation Drag Reduction for Underwater Vehicles // Energies. 2024. 17(7). 1735.

¹ Мол. вчений Мельник Р.С.¹ Пр.н.спів., д.т.н. Ніколаєнко Ю.Є.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=6KEGKcEAAAAJ&hl=uk>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ТЕПЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАВІТАЦІЙНОЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ З МЕТИЛАЦЕТАТОМ

Постановка проблеми та її актуальність. Розробка вітчизняних потужних світлодіодних освітлювальних пристроїв для освітлення територій під час проведення аварійно-рятувальних робіт в зоні виникнення надзвичайних ситуацій в темний час доби є актуальним завданням. Разом з тим, з підвищенням потужності світлодіодних джерел світла збільшується кількість теплоти, що виділяється, яка призводить до підвищення температури світлодіодних модулів та зниження їхньої надійності. З метою забезпечення нормального теплового режиму світлодіодних модулів використовуються різні системи охолодження. Найбільш ефективними з них є системи охолодження на основі двофазних теплопередавальних пристроїв – теплових труб та термосифонів, теплові характеристики яких значною мірою визначаються обраним теплоносієм. Оскільки освітлювальні пристрої можуть застосовуватися в різні пори року, важливо обирати такі теплоносії, які б забезпечували ефективну роботу теплових труб та термосифонів в широкому діапазоні температури оточуючого середовища, наприклад, від мінус 30 °С до плюс 40 °С. Тому, вибір таких теплоносіїв та дослідження теплових характеристик двофазних теплопередавальних пристроїв з такими теплоносіями є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень. Для роботи гравітаційних теплових труб (ГРТТ) з різьбовим випарником в складі світлодіодних освітлювальних приладів відоме застосування таких теплоносіїв, як [1, 2]: етанол, ацетон, хладон R141b, н-пентан, хладон R600a (ізобутан) та інші, які не замерзають при температурі до мінус 30 °С. Було показано, що термічний опір алюмінієвих ГРТТ з хладоном R141b та н-пентаном при тепловій потужності 30 Вт не перевищує 0,2 °С/Вт, а температура основи світлодіодних модулів при потужності кожного 26,7 Вт не перевищувала 56 °С при температурі оточуючого повітря 25±1 °С. Разом з тим відомості в літературі щодо ефективності застосування в ГРТТ таких теплоносіїв, як ефіри, дуже обмежені [3], що потребує проведення додаткових досліджень.

Формулювання мети. Метою даної роботи є експериментальне вивчення основних теплових характеристик мідної гравітаційної теплової труби з різьбовим випарником, заповненої метиловим ефіром оцтової кислоти – метилацетатом ($\text{CH}_3\text{COOCH}_3$).

Основна частина. Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено тестовий зразок мідної гравітаційної теплової труби довжиною 260 мм, зовнішнім діаметром 12 мм, внутрішнім діаметром 10 мм. Довжина зони нагріву – 40 мм, зони транспорту – 20 мм, зони охолодження 200 мм. На внутрішній поверхні зони нагріву з метою збільшення потенційних центрів пароутворення виконано різьбові канавки з кроком 0,5 мм. Коефіцієнт заповнення випарника метилацетатом – 0,7. Підведення теплоти до зони нагріву здійснювали за допомогою електричного нагрівача з максимальною потужністю 200 Вт. Відведення теплоти від зони охолодження здійснювали за допомогою алюмінієвого радіатора, теплообмінна поверхня якого обдувалася двома вентиляторами. Для вимірювання температурного поля корпусу ГРТТ використовувалось 12 мідь-константанових термопар. Зовнішній вигляд робочої ділянки експериментальної установки показано на рис. 1.

Експериментальні дослідження теплових характеристик ГРТТ з метилацетатом було проведено при трьох кутах нахилу ГРТТ до горизонту: 15°, 60° та 90° при температурі оточуючого повітря 20±1 °С. В доповіді наводяться отримані результати досліджень. За результатами досліджень було побудовано графічні залежності: температури вздовж корпусу

ГРТТ при різних значеннях теплового потоку (рис. 2 (а)), середнього значення температури в зоні нагріву від теплового потоку (рис. 2 (б)) при різних кутах нахилу, термічного опору ГРТТ від потужності, що передавалась, тощо.

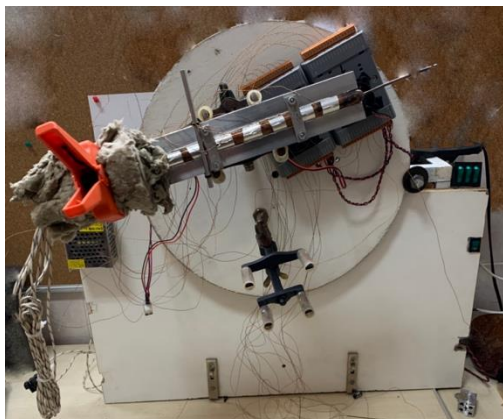
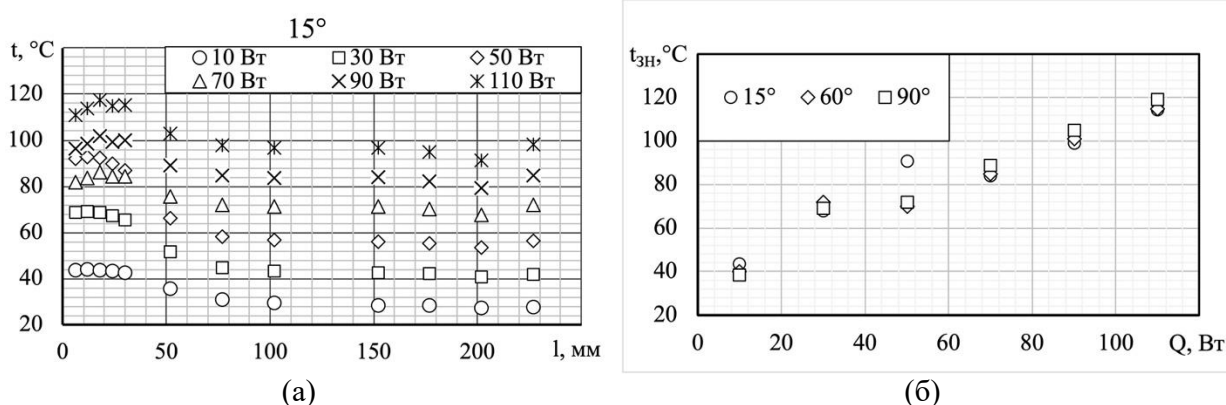


Рисунок 1 – Загальний вигляд робочої ділянки при куті нахилу ГРТТ 15°



(а) розподіл температури t по довжині l ГРТТ при куті 15° нахилу до горизонту;
(б) залежність температури t_{zh} в зоні нагріву ГРТТ від потужності Q нагрівача

Рисунок 2 – Теплові характеристики ГРТТ з метилацетатом

Висновки. Аналіз результатів досліджень показує, що в цілому за своєю ефективністю ГРТТ з метилацетатом дещо поступається ГРТТ з раніше згаданими теплоносіями, особливо при малих теплових потоках (до 50 Вт). Запуск ГРТТ починався лише з потужності нагрівача 50 Вт. Мінімальний тепловий опір становив 0,18 °C/Вт при тепловому потоці 110 Вт. Вплив кута нахилу на температуру в зоні нагріву ГРТТ не значний.

Грантова підтримка: Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2023.04/0055) за автори висловлюють подяку.

Перелік посилань:

1. Ніколаєнко Ю.Є., Басок Б.І., Козак Д.В. Термічний опір теплових труб для світлодіодних освітлювальних приладів енергоефективних будівель. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2017. № 4. С. 57-66. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2017.127546>
2. Nikolaenko Yu. E., Aleksei E.S., Kozak D.V., Nikolaienko T.Yu. Research on two-phase heat removal devices for power electronics, Thermal Science and Engineering Progress, 8 (2018) 418-425. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.09.012>.
3. Keshvari Tabatabaei F.S., Khalili M., Mostafavi S.A., Investigating and comparing the thermal performance of thermosyphon with different working fluids and filling ratios. Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal 3(1) (2023) 95 – 110. <https://10.52547/masm.3.1.95>.

¹ Аспірант 2 курсу Новосад Ю.І.

¹ Доц., к.т.н. Воробйов М.В., ¹ асист. Піцина І.Г.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПРОГНОЗУВАННЯ СКЛАДУ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ

Постановка проблеми та її актуальність. На сучасному етапі розвитку енергетики актуальним є використання біомаси як перспективного відновлюваного палива для газифікаційних процесів при заміщенні природного газу. Однак, особливістю є те, що, склад та властивості генераторного газу значно варіюються залежно від типу біомаси, умов газифікації та технологічних параметрів процесу. Це створює труднощі при прогнозуванні характеристик отриманого паливного газу та адаптації його для використання в існуючих енергетичних установках. Розробка точних методів прогнозування складу та властивостей генераторного газу на етапі планування є стратегічно важливою для забезпечення ефективності та безпечності експлуатації обладнання. Урахування хімічної структури початкової біомаси, термодинамічних факторів та механізму протікання реакцій газифікації дозволить створити надійну модель для оптимізації процесів та підвищення енергетичної ефективності. Дану проблему можна вирішити за допомогою моделювання на основі рівноважних хімічних процесів..

Аналіз останніх досліджень. Аналіз останніх досліджень у галузі газифікації біомаси показує, що науковці активно вивчають технологічні аспекти отримання генераторного газу та його якісні характеристики. У дослідженні [1], було встановлено, що хімічний склад біомаси (клітинна структура, вміст води, шматочна розмірність) суттєво впливає на енергетичні параметри генераторного газу. Зокрема, в роботі [2] було продемонстровано значну роль термічних процесів при перетворенні біомаси. Також у статті [3] були розроблені технологічні стратегії для оптимізації температурного режиму, співвідношення повітря та пару, що забезпечують максимальну ефективність процесу. Проте, навіть за умов чинних досліджень, такі питання як прогнозування точного складу генераторного газу для різноманітних видів біомаси залишаються відкритими. На цьому фоні актуальність пошуку нових методів моделювання, зокрема застосування рівноважних термодинамічних моделей, лише зростає [4].

Формулювання мети. Проблема ефективного використання альтернативних палив, зокрема біомаси, є надзвичайно актуальною у зв'язку з необхідністю зменшення залежності від викопних палив і зниження рівня викидів парникових газів. Газифікація біомаси дозволяє отримати генераторний газ, який може бути використаний як енергоносіє для промислових та побутових потреб. Однак склад і властивості отриманого газу значною мірою залежать від типу сировини та режимів процесу. Тому актуальним є науковий аналіз механізмів газифікації та розробка методів прогнозування складу й характеристик генераторного газу для підвищення ефективності його використання.

Основна частина. Процес газифікації твердої та рідкої біомаси є ключовим методом для виробництва альтернативного газового палива. У цьому процесі, як правило, як окислювальне середовище використовується повітря; однак у деяких випадках можуть застосовуватися чистий кисень (O_2), пари води (H_2O) або їх суміші. Рівноважна термодинаміка представляє собою ефективний інструмент для аналізу складу та характеристик продуктів газифікації (ПГ).

Для перевірки справедливості припущення про термодинамічну рівновагу продуктів реакції (ПР) при газифікації біомаси було проведено відповідний аналіз, який включає

аналіз різних типів хімічних реакцій, які можуть відбуватися в процесі газифікації. З одного боку, це екзотермічні реакції, такі як інтенсивне спалювання, що характеризуються висвободженням тепла. З іншого боку, до них належать ендотермічні процеси обміну, наприклад, реакції конверсії:



Реакції конверсії потребують зовнішнього джерела енергії для свого протікання. Такий підхід дозволяє врахувати комплексність хімічних перетворень, що відбуваються в зоні газифікації, та забезпечує точніший прогноз результатів процесу.

Крім того, особлива увага приділяється впливу початкових умов (температура, ставлення окислювача до біомаси, фракційний склад сировини) на кінцевий результат. Це дозволяє оптимізувати технологічні параметри для максимальної ефективності виробництва газу з біомаси, що є важливим фактором для практичного застосування цієї технології в енергетиці та інших галузях промисловості. Таким чином, комбінований аналіз термодинамічних та хімічних аспектів процесу газифікації є основою для розробки моделей, що допомагають керувати якістю отримуваних продуктів.

Результати обробки експериментальних літературних даних [2, 3] для реакцій (1) та (2) демонструють порівняння експериментальних значень констант рівноваги $K_p^{(екс)}$ теоретично розрахованими $K_p^{(роз)}$. Для визначення останніх були використані константи розпилення K_x для окремих компонентів $X_i \equiv \text{H}_2, \text{CO}, \text{CO}_2$ тощо. У конкретному випадку для зазначених реакцій константи рівноваги обчислюються за наступними формулами:

Для реакції (1):

$$K_{p1}^{(екс)} = \{p_{\text{CO}_2} \cdot p_{\text{H}_2}\} / \{p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{CO}}\} = \{D_{\text{CO}_2} \cdot D_{\text{H}_2}\} / \{D_{\text{H}_2\text{O}} \cdot D_{\text{CO}}\}. \quad (3)$$

Аналогічно, теоретичне значення константи рівноваги для реакції (1) виражається як:

$$K_{p1}^{(роз)} = \{K_{\text{H}_2\text{O}} \cdot K_{\text{CO}}\} / \{K_{\text{CO}_2} \cdot K_{\text{H}_2}\}. \quad (4)$$

За аналогічним принципом константи рівноваги обчислюються для реакції (2):

$$K_{p2}^{(екс)} = \{p_{\text{CO}_2} \cdot p_{\text{H}_2}^4\} / \{p_{\text{H}_2\text{O}}^2 \cdot p_{\text{CH}_4}\} = \{D_{\text{CO}_2} \cdot D_{\text{H}_2}^4\} / \{D_{\text{H}_2\text{O}}^2 \cdot D_{\text{CH}_4}\}; \quad (5)$$

$$K_{p2}^{(роз)} = \{K_{\text{H}_2\text{O}}^2 \cdot K_{\text{CH}_4}\} / \{K_{\text{CO}_2} \cdot K_{\text{H}_2}^4\}; \quad (6)$$

використовуючи експериментальні дані для p_{X_i} (D_{X_i}) і табличні значення для $K_{X_i}(T)$ – відповідно, шляхом визначення констант $K_p^{(екс)}$ та $K_p^{(роз)}$.

На рис.1 наведено порівняння теоретичних значень констант термодинамічної рівноваги $K_p^{(роз)}$ з експериментальними даними $K_p^{(екс)}$ для реакцій (1) та (2). З аналізу отриманих результатів можна зробити загальний висновок: представлені дані підтверджують адекватність моделі, що розглядає газоподібні продукти газифікації як суміш рівноважних компонентів газу. Ця модель демонструє хорошу узгодженість для різних видів біомаси, включаючи повітряну газифікацію вугілля, рослинних масел, соломи, обробленої та необробленої деревини, трав'яних мас, мулу, гною, а також для гранульованих зразків біомаси. Таким чином, було встановлено, що існуючі технологічні установки газифікації характеризуються задовільним рівнем ефективності та точності відтворення розрахункових параметрів, що підкреслює їх практичну цінність для застосування в реальних умовах.

Як бачимо, експериментальні дані для різних типів біомаси, таких як органічне добриво, необроблена деревина, трава/рослини, мул, також добре відповідають теоретичній кривій, що підтверджує точність моделі.

З отриманих даних та побудованих графіків на рис. 1, можна зробити висновок про високу адекватність моделі, що описує газоподібні продукти газифікації як суміш рівноважних компонентів газу. Це підтверджується порівнянням теоретичних значень

констант термодинамічної рівноваги з експериментальними даними $K_p^{(екс)}$ для реакцій (1), (2). З аналізу рис.1, який ілюструє результати для реакції (2) та (3), видно, що константа термодинамічної рівноваги K_p зменшується з підвищенням температури газифікації $T_{газ}$ у діапазоні від 800 до 1200 К. Це спостереження відповідає очікуваній поведінці для ендотермічної реакції, де збільшення температури призводить до зниження константи рівноваги. Експериментальні дані для різних типів біомаси, таких як вугілля, рослинні масла, солома, оброблена деревина, добре апроксимуються теоретичною кривою, що свідчить про адекватність моделі.

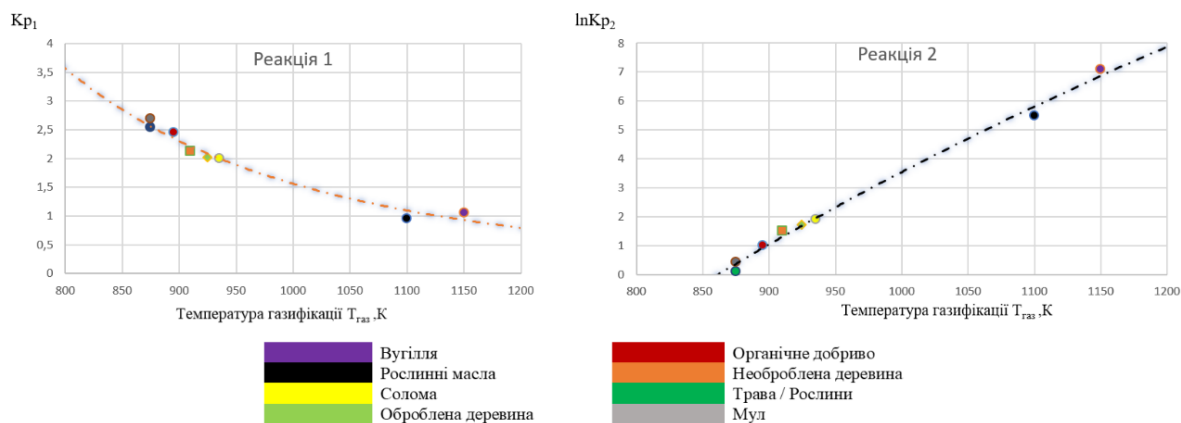


Рисунок 1 – Порівняння даних про K_{p1} та $\ln K_{p2}$, визначених як за допомогою табличних даних про константи K_x атоматизованих реакцій (1) та (2), між компонентами (криві 1 і 2 – відповідно) та значень, отриманих через виміряні концентрації D_x (точки)

Загалом, представлені графіки підтверджують хорошу апроксимацію розгляду газоподібних продуктів газифікації як суміші рівноважних компонентів газу для різних видів біомаси при повітряній газифікації. Це свідчить про задовільний рівень використовуваних установок газифікації та можливість їх застосування для отримання генераторного газу з різноманітних видів біомаси. Таким чином, можна зробити висновок, що розроблені методики прогнозування складу та властивостей генераторного газу на основі хімічної термодинаміки є надійними та ефективними для практичного застосування в реальних умовах. Вони дозволяють оптимізувати процеси газифікації та забезпечити максимальну енергетичну ефективність виробництва альтернативного газового палива з біомаси.

Висновки. Таким чином, запропонований підхід щодо визначення складу продуктів газифікації показує можливість їх швидкого та аналітично-простого способу оцінки складу продуктів газифікації на базі законів рівноважної термодинаміки, а відповідний розрахунковий аналіз може бути здійснений за допомогою відповідних програм для розрахунку рівноважних станів продуктів хімічних реакцій (наприклад програма TEPRA та ін.).

Перелік посилань:

1. Duret A., Friedli C., Maréchal F., Process design of synthetic natural gas production (SNG) using wood gasification, J. Cleaner Prod. 2015, 13, 1434-1446.
2. Brown L., Impact of Oil Price Fluctuations on SNG Projects, Energy Economics Review, 2019, vol. 32, no. 1, pp. 45-58.
3. Smith J., et al., Historical Overview of SNG Production Technologies, Journal of Energy Research, 2015 vol. 25, no. 3, pp. 123-145.
4. Johnson R., Challenges in Handling Low-Density Feedstocks for SNG Production, Chemical Engineering Journal, 2017 vol. 40, no. 2, pp. 56-68.

¹ Мол. вчений Оніщенко В.М.² Доц., к.т.н. Рогачов В.А.<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=zPzLkd4AAAAJ>¹ НТК «ІЕЗ ім. Є.О. Патона» НАН України² КПІ ім. Ігоря Сікорського

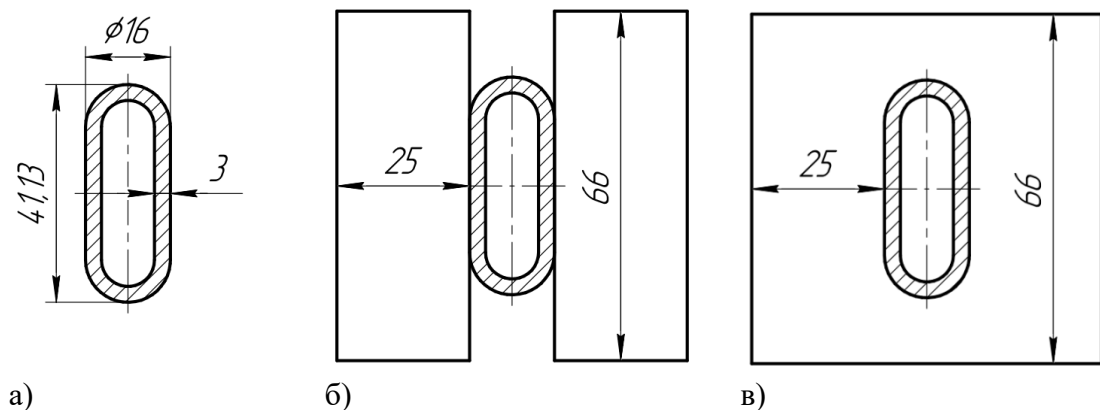
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ОРЕБРЕНИХ ТРУБ ПЛОСКОГО ПРОФІЛЮ ПІД ДІЄЮ ВНУТРІШНІХ ТИСКІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасний стан та тенденції розвитку галузі вимагають розробки нових технологій для забезпечення надійного функціонування та підвищення ефективності теплоенергетичних систем. Використання плоскоовальних труб в теплообмінних поверхнях може зменшити масо-габаритні характеристики, підвищити ефективність, зменшити ризик відмов та сприяти зниженню витрат на обслуговування. Однак, плоскоовальні труби зазнають значних деформацій під дією високих внутрішніх тисків, що зменшує їх ресурс та функціональність. Для вирішення даної проблеми пропонується використовувати оребрення. Комп'ютерне моделювання дозволяє детально вивчити вплив різної товщини та конфігурації оребрення на деформації труб.

Аналіз останніх досліджень. Теплообмінні поверхні з пучків плоскоовальних труб з неповним поперечним оребренням показали свою достатньо високу тепло-аеродинамічну ефективність і добре зарекомендували себе в експлуатації порівняно з круглими трубами [1, 2].

Формулювання мети. Основна мета роботи полягає в оптимізації конструкцій плоскоовальних труб з оребренням для створення ефективного сучасного обладнання на їх основі.

Основна частина. Моделювання проводилося на трубі з оребренням товщиною 1 мм та кроком 3 мм (рис. 1). В якості навантажень використовувалися внутрішні тиски 4,68 МПа, 5,85 МПа, 7,02 МПа, температура 20 °С. Матеріал труб – Сталь 20.

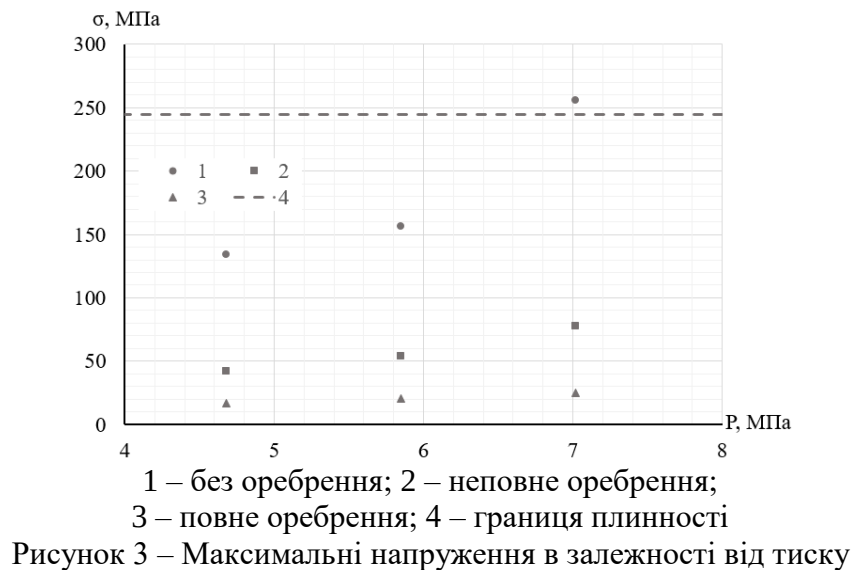
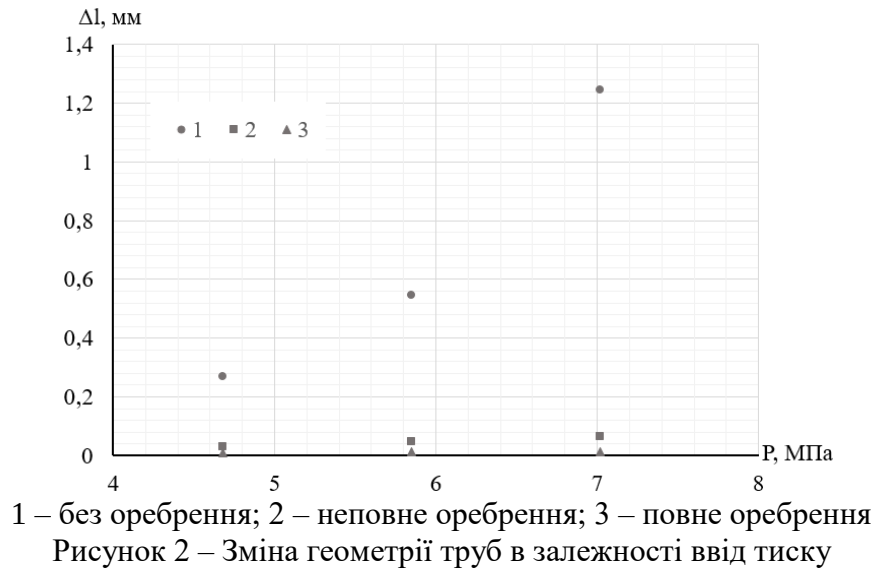


а – без оребрення; б – неповне оребрення; в – повне оребрення

Рисунок 1 – Загальний вид труб

За результатами досліджень, що подані на рис. 2, 3, повне оребрення суттєво покращує розподіл напружень у плоскоовальних трубах. Завдяки оребренню, яке виконує функцію ребер жорсткості, труби зберігають свою форму під впливом високих внутрішніх тисків. Однак, така конструкція має недолік – забивання запиленним потоком димових газів, що може призвести до зниження ефективності теплообміну.

Неповне поперечне оребрення менш ефективно виконує функцію ребер жорсткості у порівнянні з повним оребренням. На початку та в кінці зварного з'єднання виникають концентратори напружень, що може призвести до локальних деформацій і пошкоджень. Проте, така конструкція має важливу перевагу – вона більш технологічна, менш схильна до забруднення запиленним потоком.



Висновки. Підсумовуючи, слід зазначити, що виготовлення повного оребрення є суттєво складнішим процесом порівняно з виготовлення неповного. Враховуючи вищезазначене, можна зробити висновок, що неповне оребрення є більш оптимальним вибором.

Перелік посилань:

1. CFD-модельювання процесів теплообміну труб зручно-обтічної форми с неполвим поперечним оребренням / Є.М. Письменний, В.А. Рогачов, О.В. Баранюк, О.В. Семеняко, М.М. Вознюк. Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 1(20). С. 30-36.
2. Аналіз експериментальних даних з аеродинамічного опору пакетів плоскоовальних труб / Є.М. Письменний, В.А. Кондратюк, О.М. Терех, О.І. Руденко, О.В. Баранюк. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. № 6(8). С. 19-24.

¹ Аспірант 2 курсу Половинкін К.О.

¹ Проф., д.т.н. Сорокова Н.М.

https://scholar.google.com.ua/citations?hl=ru&user=6iPYO_sAAAAJ&view_op=list_works&sortby=pubdate

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НАНОСУПУТНИКІВ POLYITAN ДЛЯ НАУКОВИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ У КОСМОСІ

Наукові дослідження стовбурових клітин у космосі, зокрема на Міжнародній космічній станції, відкривають нові перспективи в біології та медицині. Умови мікрогравітації дозволяють вивчати зміни у клітинах, які неможливо відтворити на Землі, наприклад, вплив обмеженої гравітації на розвиток клітин серця та мозку [1]. Особливу роль у цих процесах відіграє модифікатор білка SUMO, який демонструє специфічні зміни в умовах мікрогравітації. Експериментальні дослідження допомагають не лише зрозуміти вплив мікрогравітації на здоров'я астронавтів, але й розробити методи мінімізації негативного впливу тривалих космічних польотів на людину.

Одним із перспективних напрямів є використання мікрофлюїдних технологій на наносупутниках типу CubeSat для автономних біологічних експериментів у космосі. Вибір енергетичного обладнання та забезпечення стабільного теплового режиму є критично важливими аспектами для успішного проведення подібних досліджень (рис. 1). Українські наносупутники серії PolyITAN вже продемонстрували надійність та ефективність своєї платформи у трьох успішних запусках, що підтверджує їхню придатність для космічних експериментів.

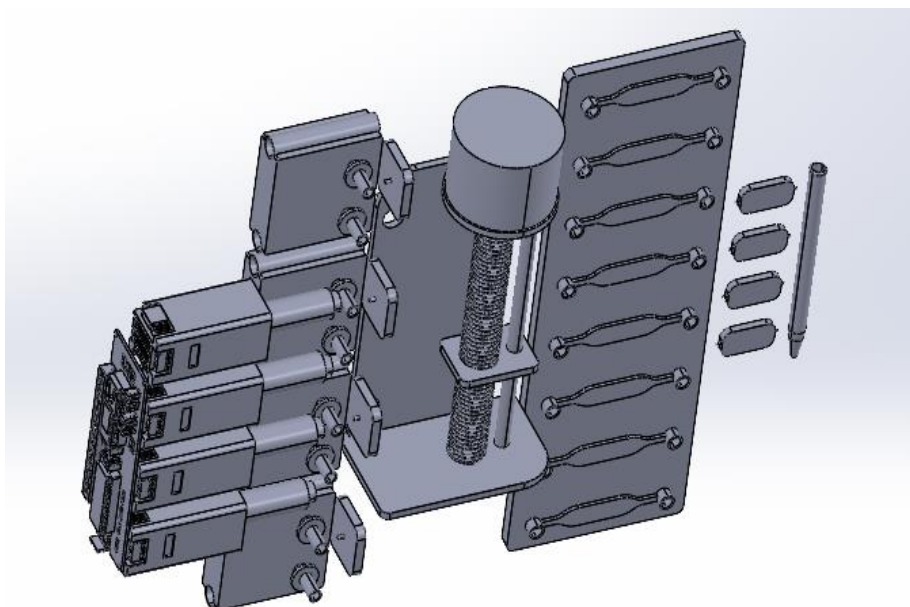


Рисунок 1 – Розроблена тривимірна модель складових біологічного корисного навантаження

Корисне навантаження наносупутників, особливо для біологічних досліджень, вимагає стабільного температурного середовища для правильної роботи. Наприклад, для експериментів зі стовбуровими клітинами необхідний контрольований температурний режим у діапазоні 37 °С для збереження цілісності біологічних зразків. Відхилення температури можуть призвести до спотворення результатів або навіть втрати наукових даних. Для забезпечення оптимального теплового середовища наносупутники PolyITAN оснащуються такими засобами терморегуляції, як плівкові нагрівачі, теплопровідні матеріали та елементи Пельтьє.

Плівкові нагрівачі використовуються для локального обігріву критичних компонентів, забезпечуючи необхідний температурний режим у визначених зонах супутника. Системи транспортування тепла, такі як теплові трубки, сприяють рівномірному розподілу теплоти по всьому об'єму супутника, що особливо важливо в умовах орбітальних перепадів температури. Елементи Пельтьє, які можуть як нагрівати, так і охолоджувати, дозволяють зберігати стабільність температурного режиму та швидко адаптуватися до змін навколишніх умов.

Для проектування та оптимізації теплового стану наносупутників застосовується тривимірне комп'ютерне моделювання у середовищі Siemens NX. Завдяки цьому можна не тільки планувати фізичне розміщення компонентів, але й аналізувати їхню теплову взаємодію [2]. Оптимізація теплових процесів шляхом чисельного моделювання дозволяє визначити найбільш ефективну комбінацію методів терморегуляції, що підвищує стабільність роботи супутника в умовах космосу.

Аналіз температурного стану корисного навантаження актуальний не лише для біологічних експериментів, але й для дистанційного зондування Землі. Наприклад, наносупутник PolyITAN-PUT, призначений для дослідження земної поверхні за допомогою оптичної камери, потребує особливого підходу до теплового керування. Оптична система має працювати в чітко визначеному діапазоні температур, щоб забезпечити високу якість зображень та уникнути оптичних спотворень (рис. 2).

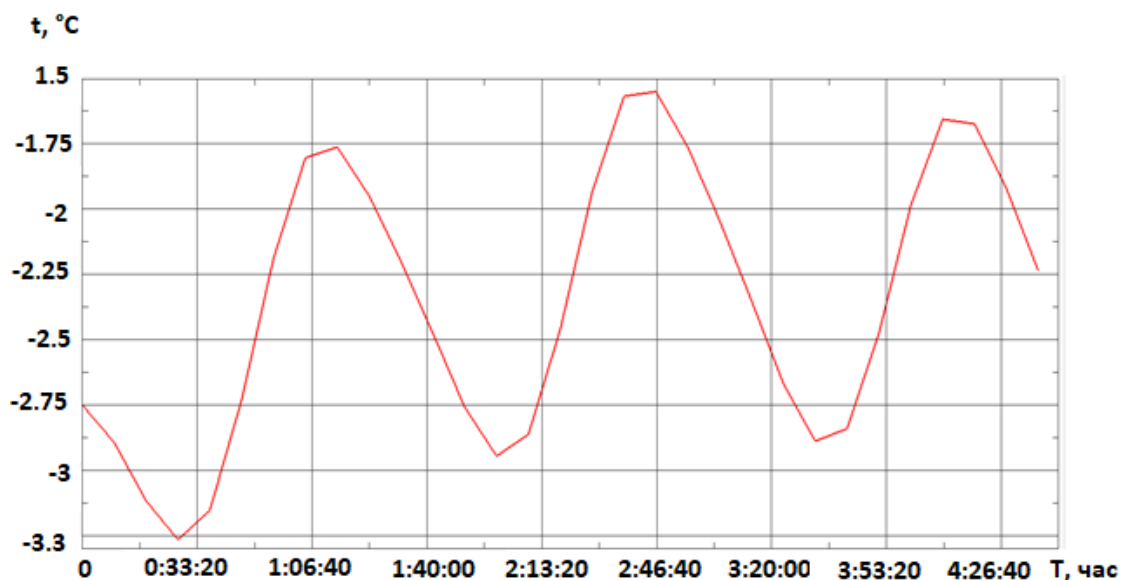


Рисунок 2 – Результат комп'ютерного моделювання, графік розподілу температур

Результати комп'ютерного моделювання демонструють циклічні коливання температури після виходу системи на стаціонарний режим, що свідчить про досягнення рівноважного теплообміну [3]. Графіки моделювання та термовакуумних випробувань показують узгодженість температурних коливань, підтверджуючи правильність розрахунків та адекватність прийнятих граничних умов. Результати отримані шляхом

проведення термовакuumних випробувань у Лабораторії алюмінієвих теплових труб і наносупутникових технологій під керівництвом Рассамкіна Б. М. (рис. 3). Таким чином, використання методів чисельного аналізу дозволяє створювати надійні теплові системи для супутників різного призначення.

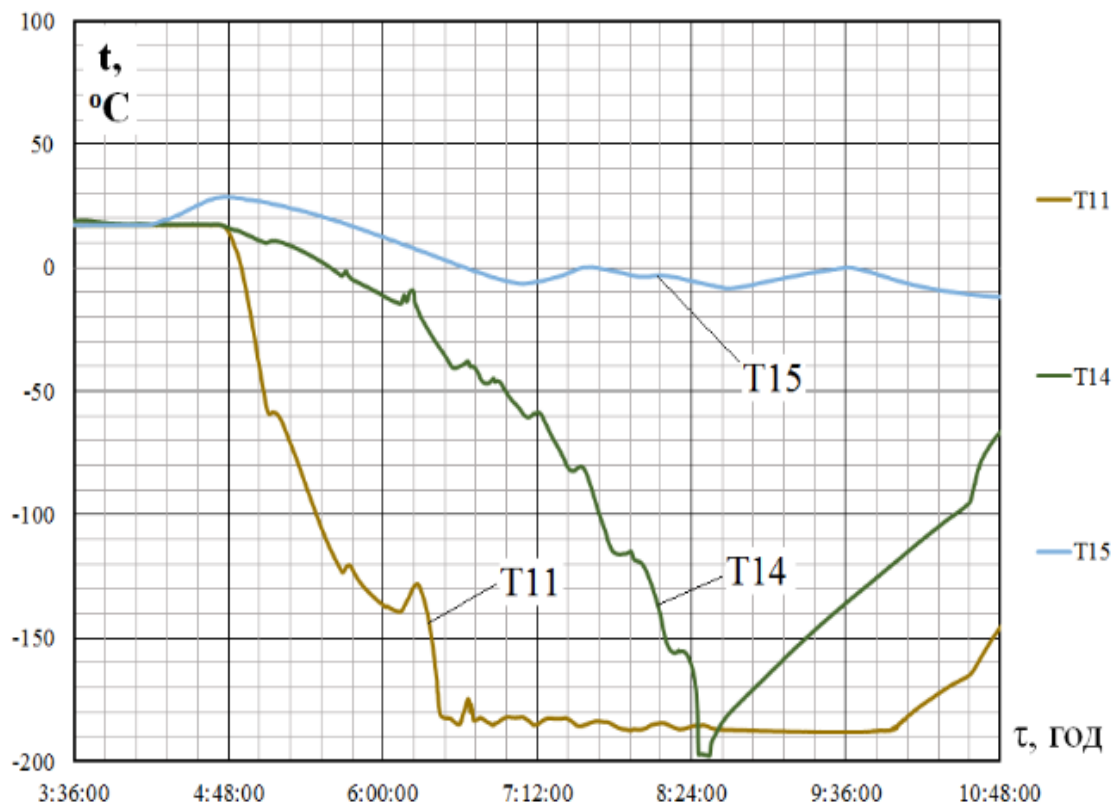


Рисунок 3 – Результат термовакuumних випробувань, графік розподілу температур

Висновки. Впровадження передових методів теплового регулювання та використання тривимірного комп'ютерного моделювання забезпечує стабільну роботу наносупутників PolyITAN у космосі, що є ключовим фактором для успішного проведення як біологічних, так і дистанційних досліджень. Оптимізація теплового режиму сприяє підвищенню ефективності місій, збільшуючи тривалість роботи супутників на орбіті та точність отриманих даних. Це відкриває нові можливості для досліджень у космосі, роблячи внесок у розвиток науки та технологій.

Перелік посилань:

1. Поштаренко Ю.А., Рассамкін Б.М., Рогачов В.А., Хомініч В.І. & Шевченко М.Д. Засоби вимірювання теплових потоків при термовакuumних дослідженнях та випробуваннях виробів космічної техніки. Космічна наука і технологія. 2022. Т. 28, № 1. С. 51–60. <http://dx.doi.org/10.15407/knit2022.01.051>.
2. Завадська Є.С., Рассамкін Б.М., Рогачов В.А., Хайрмасов С.М. & Хомініч В.І. Експериментальне моделювання теплових режимів наносупутника. Технологія та конструювання в електронній апаратурі. 2013. № 4. С. 27–30.
3. Рассамкін Б.М., Рогачов В.А., Хайрмасов С.М., Хомініч В.І. & Гренюк І.Є. Термовакuumні випробування оптико-електронних приладів космічного апарата МС-2-8. Космічна наука і технологія. 2008. Т. 14, № 4. С. 42–46.

¹ Магістрант 1 курсу Сурду М.В.

¹ Доц., к.т.н. Воробйов М.В., ¹ асист. Піцина І.Г.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ СТАРОЇ ГРОШОВОЇ МАСИ ДЛЯ ОПАЛЕННЯ ТА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Застаріла грошова маса, що виводиться з обігу, представляє собою серйозну екологічну проблему через труднощі її утилізації. Традиційні методи знищення, такі як спалювання без генерації енергії або захоронення, супроводжуються негативним впливом на довкілля та значними витратами на транспортування та обробку. Розробка технології, яка дозволить ефективно утилізувати старі грошові знаки та водночас отримувати теплову енергію, сприятиме вирішенню низки актуальних задач сучасності.

Наукова новизна цієї роботи полягає у впровадженні інноваційного підходу до утилізації грошової маси з використанням термокаталітичних технологій комплексу ЕСО-300. Важливість цієї теми також обумовлена глобальними викликами, такими як зростання вартості викопних палив, потреба у диверсифікації джерел енергії та скорочення викидів парникових газів. Реалізація проекту утилізації грошової маси дозволить знизити екологічне навантаження та сприятиме розвитку екологічно орієнтованої економіки.

Розроблена технологія може знайти застосування не лише в Україні, але й в інших країнах, де існує потреба утилізації великих обсягів застарілих банкнот та інших полімерних чи паперових носіїв з високою енергетичною цінністю.

Аналіз останніх досліджень. Утилізація та термічне знешкодження відходів являє комплексну багатофакторну екологічну промислову задачу. Питання утилізації відходів займалися чимало визначних українських вчених, зокрема І.М. Карп, В.А. Жовтянський, А.Б. Сезоненко та ін. Для термічної утилізації використовують термічні печі та топки різних конструкцій, причому окремим питанням є забезпечення екологічних норм роботи утилізаційного обладнання у відповідності з європейськими стандартами у сфері поводження з відходами [1].

Основним компонентом застарілих грошей, як паперових відходів є целюлоза, яка за хімічним складом є природним полімером – D-глюкопіранозою і має хімічну формулу $[C_6H_{10}O_5]_n$ [2]. Середній вміст целюлози у відходах становить 90 %. Крім того, такі відходи містять до 2 % токсичних мелаїноформальдегідних смол, в складі яких термореактивні олігомерні продукти поліконденсації мелаїну з формальдегідом у присутності лужних і кислотних каталізаторів. Саме наявність у складі старої грошової маси таких токсичних компонентів вимагає розроблення відповідних екологічно-безпечних технологій їх утилізації.

Формулювання мети. Мета роботи полягає у розробці ефективної технології утилізації старої грошової маси з отриманням теплової енергії для опалення промислових приміщень. Це передбачає оптимізацію термокаталітичних процесів, зменшення екологічного впливу та впровадження енергозберігаючих рішень. Результати роботи мають забезпечити економічну доцільність та екологічну безпеку використання вторинних ресурсів.

Основна частина. Технологічний комплекс ЕСО-300 призначений для утилізації відходів II–IV класу безпеки: рідкі відходи змивного розчину Ph12; мікс брикети подрібненої паперової маси (шредінга) із сухим залишком до 40 % вологості змивного

розчину; відходи подрібнені брикетовані; тверді побутові відходи; відпрацьовані ПММ тощо, та з нейтралізацією і очищенням продуктів розкладання, а також утилізацією теплової енергії.

Зовнішній вигляд та розташування основних елементів комплексу термічної утилізації старих грошей приведено на рис. 1. Основним елементом комплексу є термокаталітичний модуль (рис. 2).

До складу представленої конфігурації технологічного комплексу (рис. 1) входять: 1) термокаталітичний модуль переробки відходів; модуль утилізації теплової енергії; 2) модуль подачі повітря; модуль видалення і обробки негорючого залишку (золи); 3) системи безпеки, контролю і управління комплексом; система видалення, нейтралізації та очищення димових газів; (у складі: плоскорувний фільтр; димосос; адсорбційний фільтр; система контролю викидів); 4) допоміжні інструменти і прилади (зола і пило збірники); 5) система автоматичного завантаження сміття; 6) система транспортування сировини; 7) Система подачі палива з пальником; 8) система подачі лужного розчину; 9) модуль приймання сировини; 10) система постачання стислого повітря; 11) модуль подачі рідкого сміття.

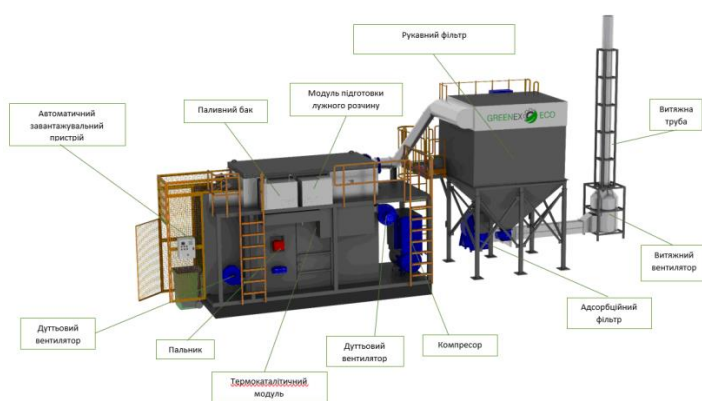


Рисунок 1 – Комплекс термічної переробки старої грошової маси

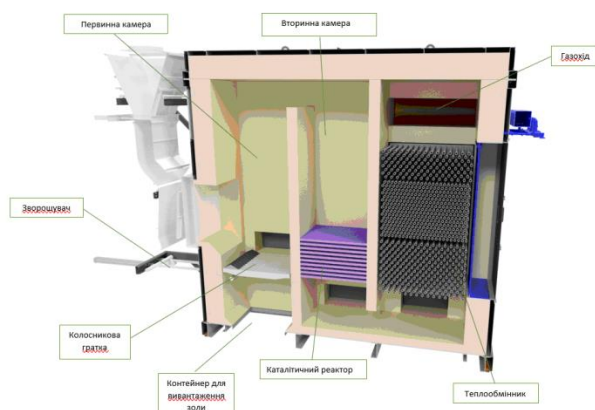


Рисунок 2 – Будова термокаталітичного модуля переробки відходів

В склад матеріалу, який переробляється, входить подрібнена грошова маса в вигляді пресованих брикетів (відходи). Відходи доставляються до накопичувального складу, після чого робочий склад завантажує в бункер накопичувач за допомогою електричного тельфуру. За допомогою системи транспортувальних конвеєрів, відходи перевантажується в допоміжний бункер, після чого дозовано потрапляє в термокаталітичний блок комплексу, де здійснюється їх термічна утилізація. Завантаження відходів з контейнерів в термокаталітичний блок комплексу здійснюється спеціалізованим бездимним завантажувальним пристроєм, що виключає вирив газів із печі на зовні при завантаженні відходів.

Розігрів і підтримка необхідної температури в печі здійснюється за допомогою рідкопаливного пальника, з використанням дизельного палива. Як правило, пальник

використовується тільки для початкового розігріву печі. В стандартному режимі роботи тепла, що виділяється при горінні відходів достатньо для підтримки необхідного температурного режиму без спалювання додаткового палива. Для інтенсифікації процесу термічного розкладання відходів колосникові ґрати обладнані спеціальним розпушувачем, який в автоматичному режимі здійснює розпушування палаючої маси і чистку колосникових ґрат від шлакових відкладень. По мірі вигорання відходів на палаючий залишок (20 – 30%) за допомогою бездимного завантажувального пристрою (виключає вибивання димових газів), завалюється нова порція відходів. Робота завантажувального пристрою термокаталітичного блоку повністю автоматизована і здійснюється за спеціальним алгоритмом.

Гази, що утворюються в процесі термічного розкладання відходів надходять в камеру допалювання з температурою 850 – 1150 °С, в яку, для забезпечення окисного процесу, додатково вдувається повітря горіння з розрахунку забезпечення надлишку окислювача (O₂) не менше 6 %. Час знаходження газів, що йдуть, в камері допалювання складає 2 – 2,5 с., що забезпечує розкладання хлор і фторорганічних з'єднань і окислення неграничних вуглеводнів не менше, ніж на 98 %.

Для забезпечення максимально повної деструкції і окислення продуктів газифікації відходів після камери допалювання димові газы проходять через каталітичний реактор, який інтенсифікує даний процес. Недогорілі в камері допалювання органічні сполуки, які важко окислюються, включаючи бенз(а)пірен, діоксини, фурани та ін., знешкоджуються на шарі каталізатора на 99,9 %. Далі димові газы проходять хімічну нейтралізацію від кислих неорганічних сполук хлору, фтору і сірки шляхом обробки їх лужних розчином з утворенням нешкідливих солей.

Після деструкції, окислення і хімічної нейтралізації димові газы направляються в модуль (камеру) охолодження та утилізації тепла, де за допомогою теплообмінних апаратів (двоступеневого економайзера і рекуператора) здійснюється їх різке охолодження (загартування). Модуль забезпечує охолодження газів, що йдуть, з 850 – 1150 °С до 160 – 190 °С шляхом передачі тепла для нагріву води в економайзері, яка буде використовуватися в теплових мережах та мережах гарячого водопостачання та для нагріву повітря горіння в рекуператорі, що подається в камеру спалювання для оптимізації процесу горіння.

Хімічна нейтралізація і швидке охолодження (загартування) димових газів дозволяє уникнути так званого ефекту вторинного утворення токсичних хлор і фторорганічних з'єднань.

Охолоджені до 160 – 190 °С газы надходять на блок газоочистки у складі рукавного фільтра і адсорбційного фільтра, в яких здійснюється їх остаточне очищення від дрібнодисперсних зважених часток (пилу), поліароматичних сполук, парів важких металів та ін.

Коефіцієнт корисної дії рукавного фільтра становить 99,99 %, що дозволяє забезпечити очищення димових газів до залишкового вмісту (концентрації) зважених частинок не більше 10 мг/м³.

Висновки. Підсумовуючи, використання такого підходу дозволяє не лише зменшити кількість відходів, але й отримати вторинну енергію, яка може бути використана для опалення промислових приміщень. Це відкриває нові можливості для створення економічно вигідної та екологічно безпечної системи управління відходами.

Перелік посилань:

1. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Official Journal of the European Union [UA]. 2008, L312/3-312/30.

2. Sezonenko O.B., Vasechko O.O., Alekseenko V.V., Snihur A.V. Investigation of the processes of thermal destruction of cellulose-containing (paper) waste. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2021. № 3. – С. 58-62.

¹ Аспірант 1 курсу Чикало В.Б.

¹ Проф., д.т.н. Кравець В.Ю.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ КИПІННІ РІДИН НА ПОВЕРХНЯХ МАЛОГО РОЗМІРУ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасні тенденції зменшення масогабаритних характеристик електронного обладнання при збільшенні їх функціональних можливостей призводять до підвищення енергоспоживання її елементів, що може значно перевищити їх безпечний температурний режим роботи.

Основною проблемою при використанні малогабаритної радіоелектронної апаратури є забезпечення її заданого температурного режиму роботи.

Пошук шляхів і методів відводу великих питомих теплових навантажень призвело до розвитку нового напрямку, пов'язаного з рідинним охолодженням радіоелектронної апаратури.

Аналіз останніх досліджень. В даний час проводяться експериментальні дослідження для вивчення механізмів кипіння на малих поверхнях та визначення характеристик теплообміну. Використовуються сучасні методи візуалізації, такі як мікроскопія та інфрачервона термографія, для аналізу процесів кипіння. Розробляються нові експериментальні установки для вимірювання теплових потоків та температур в мікро- та нанорозмірних системах. Ці напрямки досліджень показують, що інтенсифікація теплообміну при кипінні рідин на поверхнях малого розміру є галуззю, що активно розвивається, з великим потенціалом для технологічних інновацій.

Формулювання мети. Метою є вивчення температурних режимів та інтенсивності тепловіддачі при кипінні рідин на поверхнях малого розміру при проектуванні нових систем охолодження для сучасних електронних компонентів. Встановлення впливу визначальних чинників і отримання нових закономірностей процесів теплообміну в малогабаритних системах. шляхом занурення кристалів її напівпровідникових приладів у рідкі діелектрики. Організація бульбашкового кипіння на такій поверхні малого розміру може суттєво термостабілізувати її стан і підвищити теплопередавальну спроможність.

Основна частина. Для дослідження процесів які виникають при кипінні рідин на малих поверхнях було розроблено робочий елемент, показаний на рис. 1. Кипіння було організовано на торцевій поверхні мідного стрижня 1. На торці стрижня було профрезеровано канавку, у якій був запаений константановий дріт. Ще один константановий дріт було впаяно у стрижень на певній відстані від торця. За показаннями утворених таким чином мідь-константанових термопар за спеціальними тарувальними кривими визначалися як значення температури поверхні, на якій відбувалося кипіння, так і тепловий потік, що до неї підводився. Мідний стрижень 1 на епоксидній смолі вклеювався врівень у скловолоконну шайбу 2. В останню на певних радіусах (рис. 1, б) у спеціально просвердлені для цього канавки були вклеєні чотири мідь-константанових термопари, за допомогою яких визначалися теплові відтоки від тепловиділяючого елемента 1. Шайба із вклеєним у неї мідним стрижнем 1 за допомогою притискної гайки 8 закріплювалася у корпусі 5. Ущільнюючі кільця 6 та 7 із вакуумної гуми забезпечували герметичність з'єднань.

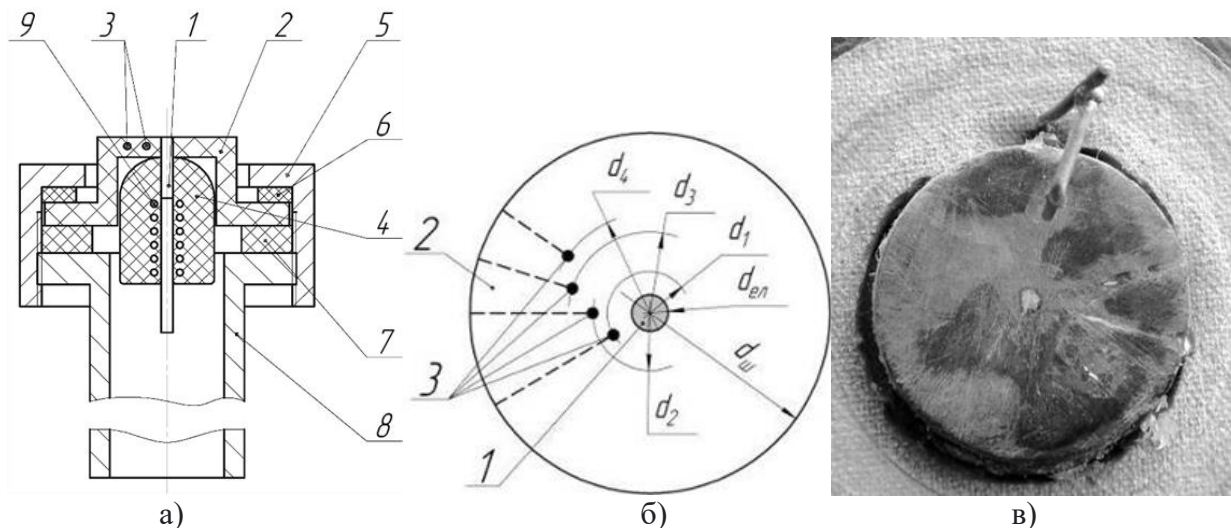


Рисунок 1 – Робочий елемент для дослідження кипіння на поверхні малого розміру
 1 – мідний стрижень; 2 – скловолоконна шайба; 3 – мідь-константанові термопари;
 4 – теплоізоляція; 5 – корпус; 6, 7 – ущільнюючі шайби; 8 – притискна гайка;
 9 – електронагрівач:

а – конструкція; б – розташування термопар у шайбі; в – зовнішній вигляд

Перші експериментальні дослідження показали, що одним із основних факторів, що впливає на інтенсивність тепловіддачі, є геометричні розміри елементів, від яких відводиться теплота. Аналізуючи вплив діаметра тепловіддаючої поверхні на процес кипіння, можна відзначити, що при незначних перегрівах відносно температури насичення тепловий потік тим вищий, чим більше діаметр поверхні. Це, ймовірно, можна пояснити впливом кількості активних центрів пароутворення (ЦПУ). Так, на поверхні діаметром $4,94 \cdot 10^{-3}$ м візуально спостерігалось два активних ЦПУ, в той час як на менших поверхнях їх було по одному. З цієї ж причини, при низьких теплових потоках коефіцієнти тепловіддачі на поверхні $4,94 \cdot 10^{-3}$ м були вище у порівнянні з поверхнями меншого розміру.

Однак при збільшенні потужності вплив кількості ЦПУ нівелюється, і характерним є збільшення критичної густини теплового потоку із зменшенням діаметра тепловіддаючої поверхні. Це можна пояснити як тим, що при малих розмірах поверхні теплообміну відбувається зменшення товщини теплового і гідродинамічного пограничних шарів, а також тим, що при менших розмірах тепловіддаючої поверхні рідина більш вільно може надходити до ЦПУ.

Висновки. Загалом можна зробити висновок, що на даний час найбільш ефективним методом відводу теплоти є організація процесу бульбашкового кипіння безпосередньо на кристалі напівпровідникового приладу. Велика інтенсивність тепловіддачі забезпечується за рахунок прихованої теплоти пароутворення при виникненні парової бульбашки. Причому, чим менше розміри поверхні нагріву, тим дія цього фактору підвищується, оскільки площа її сумірна з основою парової бульбашки, на якій інтенсивно випаровується мікрошар рідини.

Перелік посилань:

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

СЕКЦІЯ № 4

Сучасні технології в тепловій та альтернативній енергетиці

¹ Аспірант 1 курсу Беднарська І.С.

¹ Доц., к.т.н. Риндюк Д.В.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН РЕГУЛЮВАЛЬНОГО КЛАПАНА ТУРБІНИ К-1000-60/3000 З ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ СИТА

Постановка проблеми та її актуальність У сучасній енергетиці ключовим завданням є забезпечення надійності та ефективності роботи енергетичного обладнання. Наразі в Україні основну частку потреб в електроенергії покривають атомні електростанції (АЕС). Безперервну роботу та регулювання потужності станцій забезпечує паророзподільна система, що включає паропроводи та клапани. Важливими елементами цієї системи є регулювальні клапани (РК) турбін К-1000-60/3000, які входять до складу основного генеруючого обладнання АЕС. Їхня конструкція виконує кількісне регулювання потоків пари, що забезпечує функціонування всієї турбоустановки. Надійність і безпека роботи цих елементів мають критичне значення. Проте в процесі експлуатації неодноразово фіксувалися дефекти металу корпусу РК, зокрема розтріскування в окремих зонах, що негативно впливає на довговічність, надійність та безпечність роботи. Виявлення причин таких дефектів доцільно здійснювати з використанням сучасних методів математичного моделювання.

Аналіз останніх досліджень. Існують різні методи дослідження процесів у високотемпературних елементах парових турбін. Традиційно вони базуються на нормативних розрахунках теплообміну, як у РТМ [1, 2], проте цей підхід не завжди дозволяє пояснити появу дефектів, зокрема тріщин. З розвитком обчислювальних технологій стало можливим визначати напружено-деформований стан (НДС) на основі газодинамічного моделювання. Використання САПР суттєво підвищило точність розрахунків, що підтверджено в роботах [3, 4]. Виявилося, що врахування реальних умов роботи клапана є ключовим для достовірності аналізу. Але у більшості досліджень ігнорувалася наявність парового сита, яке вирівнює потоки пари, створюючи додатковий опір і змінюючи розподіл температури та напружень у металі корпусу. Це може суттєво впливати на результати моделювання, як вказано в роботі [5]. Отже, для підвищення точності досліджень необхідно враховувати конструктивні особливості обладнання.

Формулювання мети. Метою дослідження є детальне моделювання газодинамічних процесів у регулювальному клапані турбіни К-1000-60/3000 з урахуванням парового сита для уточнення його впливу на напружено-деформований стан корпусу.

Основна частина. Розглянуто тривимірну модель регулювального клапана із врахуванням парового сита, що функціонує у системі паророзподілення турбіни К-1000-60/3000. Математичну модель газодинамічних процесів, що протікають в регулювальному клапані турбіни К-1000-60/3000, було створено на базі програмного комплексу FloEFD, який забезпечує моделювання багатofазних потоків. Детальний аналіз термо-напруженого стану металу корпусу РК здійснювався з використанням програмного комплексу SolidWorks Simulation.

За початкові та граничні умови прийнято реальні умови експлуатації клапана, отримані на енергоблоці № 2 Хмельницької АЕС. Також враховувались такі параметри пари, як молярна маса, критична температура та тиск, коефіцієнт стисливості в критичній точці. Для прогнозування поведінки пари застосовувалось рівняння Редліха-Квонга [6]: двопараметричне рівняння стану реального газу, як покращення рівняння Ван дер Ваальса.

Тривимірний модель клапана включала основні елементи: корпус, сідло, регулювальний орган і парове сито. Окрему увагу приділили деталізації отворів у ситі, які суттєво впливають на паророзподіл. Розрахункова модель представлена на рис. 1.

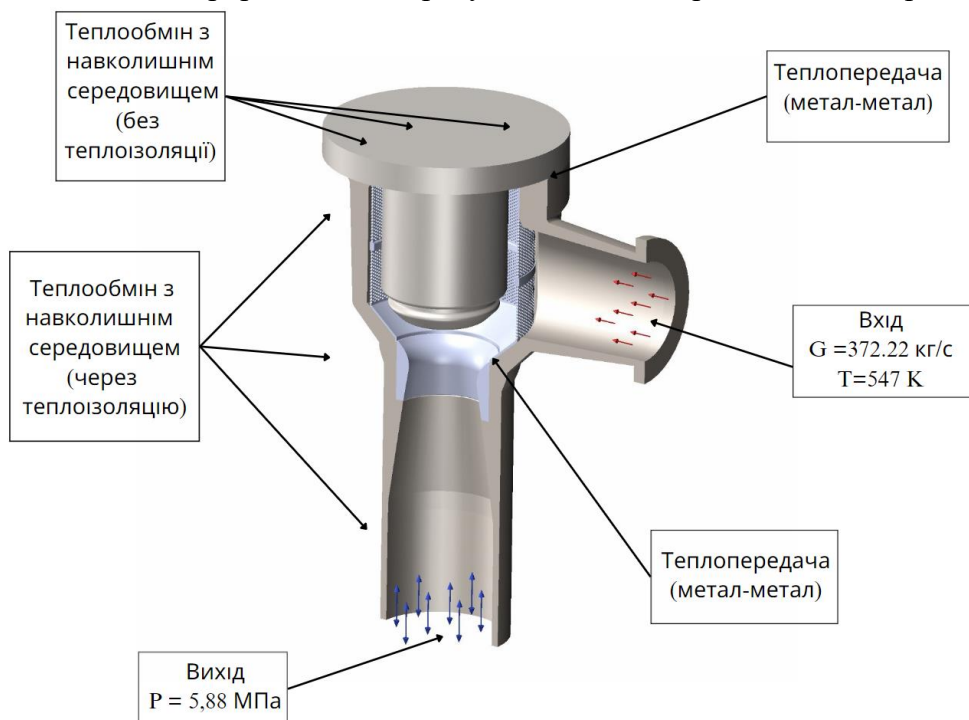


Рисунок 1 – Розрахункова модель регулювального клапана турбіни К-1000-60/3000

Результати моделювання дозволили визначити розподіл швидкостей, тисків і температур по об'єму клапана. Врахування наявності сита при моделюванні суттєво підвищило точність визначення газодинамічних, термодинамічних та механічних процесів в клапані, та дало можливість врахувати нерівномірний розподіл тиску, температури та турбулентність потоків пари, а це, в свою чергу, матиме суттєвий вплив на напружено-деформований стан металу корпусу клапана.

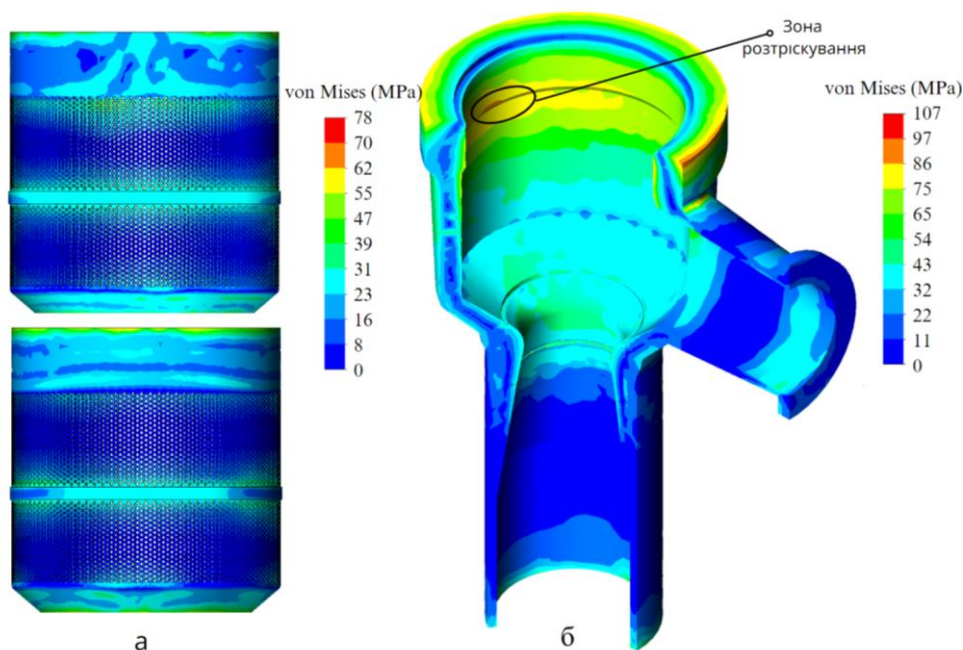


Рисунок 2 – Результати розрахунків напружено-деформованого стану клапана:
 а – напружено-деформований стан фільтруючого сита;
 б – напружено-деформований стан металу корпусу клапана

Отримані результати підтверджують гіпотезу про вплив парового сита на НДС клапана. На рис. 2 (б) наведено НДС металу корпусу клапана. Зона розтріскування знаходиться безпосередньо біля області значної дисипації енергії, що виникає внаслідок зіткнення потоків і там, як видно, спостерігаються значні напруження металу корпусу. Таким чином врахування реального розподілу потоку дозволило пояснити виникнення дефектів у металі в зоні розтріскування, що вказана на рисунку 2 (б).

Висновки. Розраховано напружено-деформований стан металу сита та корпусу клапана, а також проаналізовано його зміни під впливом парового сита. Виявлено, що локальні температурні градієнти, спричинені дисипацією енергії при зіткненні зустрічних потоків пари, підвищують рівень напружень у металі корпусу. Це пояснює утворення мікротріщин у пароприймальній камері в зонах, протилежних паровпуску. Зазначено, що ігнорування впливу парового сита у моделюванні може призводити до значних похибок у прогнозуванні довговічності конструкції клапана.

Перелік посилань:

1. РТМ 24.020.16-73. Стаціонарні парові турбіни. Розрахунок температурних полів роторів і циліндрів парових турбін методом електромоделювання. М., 1973. № VK-002/3209. – 104 с.
2. РД 34.17.440-96. Методичні вказівки щодо порядку проведення робіт з оцінки індивідуального ресурсу парових турбін і продовження терміну їх експлуатації понад парковий ресурс. М., 1996. – 98 с.
3. Лементар С.Ю Беднарська І.С., Риндюк Д.В. Моделювання газодинаміки вологої пари в головних паропроводах атомної електростанції. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки, 2021.– № 5 (32). С. 159–167. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/25>
4. Беднарська І.С., Риндюк Д.В. Аналіз підходів до оцінки теплового та напружено-деформованого стану елементів паропроводів АЕС. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки, 2019.– №30 (69) Частина № 2. С. 12–16.
5. Колядюк А. С. Термоміцність регулюючого клапана парової турбіни :дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.09 – динаміка і міцність машин. Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного. Харків, 2021. 168 с. 11. Redlich O., Kwong J.N.S. On the Thermodynamics of Solutions. V. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions . Chemical Reviews, 1949.– Т. 44. № 1. С. 233–244.
6. Redlich O., Kwong J. N. S. On the Thermodynamics of Solutions. V. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions . Chemical Reviews. 1949. – Т. 44. № 1. – С. 233–244.
7. Patankar S. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere, 1980. – 197 p.

¹ Аспірант 1 курсу Джежулей В.О.

¹ Проф., д.т.н. Абдулін М.З.

<https://scholar.google.ru/citations?user=nkLa3cgAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТОПКОВИХ ПРОЦЕСІВ ПИЛОВУГІЛЬНОГО КОТЛА ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ СИНЕРГЕТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВНОЇ СУМІШІ

Постановка проблеми та її актуальність. Зростаючий попит на раціональне використання паливних ресурсів та підвищення екологічної безпеки вимагає удосконалення технологій спалювання палив. Процес сумісного спалювання може забезпечити підвищення ефективності котлів та зменшення емісії шкідливих речовин за рахунок нелінійних змін фізико-хімічних властивостей учасників паливної суміші.

Аналіз останніх досліджень. Науковий підхід до формування складу паливних сумішей враховує нормативні обмеження до процесу спалювання. До складу сумішей можуть входити вугілля різних марок, біомаса та промислові відходи. Фізико-хімічні характеристики палива та технологічні аспекти процесу сумісного спалювання залежать від регіональної доступності біомаси.

Формулювання мети. Дослідження спрямоване на оцінку впливу складу та фізико-хімічних характеристик паливних сумішей, на якість процесу теплопереносу та загальну ефективність роботи котлів. Оптимізація співвідношення, компонентів паливних сумішей, на основі термогравіметричного аналізу та числового моделювання CFD дозволить досягти більш ефективного використання енергетичних ресурсів та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

Основна частина. Один із ключових аспектів успішного сумісного спалювання – це регулювання розміру часток палива на основі біомаси, відповідно до вимог типу котла. Загалом менший розмір пелетів палива підвищує ефективність спалювання через кращі показники тепломасообміну для дрібних частинок.

Частинки біомаси, як правило, можуть бути трохи більшими за частинки вугілля, оскільки біомаса є більш летючим паливом. Біомаса, що не відповідає цим вимогам, може спричинити проблеми з потоком у обладнанні для обробки палива або неповне згоряння в котлі.

Дослідження щодо важливості розміру частинок біомаси та співвідношення спільного спалювання для ефективності пиловугільного котла, виявило що, вплив розміру частинок є незначним: при дуже дрібних частинках (менше 2 мм) ефективність згоряння зростає, а за більших розмірів частинок – знижується. У будь-якому випадку, виміряні зміни не перевищують $\pm 0,5\%$ [1].

На відміну від цього, співвідношення спільного спалювання має більший вплив. Проте, навіть у найгіршому випадку зниження ефективності не перевищує 2 %, що досягається при 15 % спільного спалювання [3].

Оптимальним вважається додавання біомаси у кількості 8–12 % від загального теплового навантаження. У цьому діапазоні спостерігається інтенсифікація спалювання вугілля без необхідності значних модифікацій пальникового пристрою або конструкції котла. Як найбільш технологічно прийнятний та енергоефективний варіант рекомендується частка біомаси на рівні 10% за тепловим еквівалентом від загального палива [2].

Основними відмінностями паливної біомаси від вугілля є високий вихід летких речовин, а також високий вміст органічного кисню, що у поєднанні з високою вологою

визначає її низьку калорійність та високий питомий об'єм продуктів згоряння. Крім того високий вміст оксидів лужних металів у золі визначає низькі температури шлакування поверхонь нагріву котлів, що призводить до частих вимушених зупинок для їх очищення [4].

Проте термогравіметричний аналіз різних типів біомаси та вугілля, а також їх сумішей (табл. 1), показав, що вугілля і тирса мають схожі характеристики. У вугілля процес втрати маси завершується при температурі близько 700 °С, тоді як у тирси цей процес завершується при 500 °С. Рисове лушпиння та тверде відновлене паливо мали подібні значення втрати маси. Температура вигорання рисового лушпиння становила близько 700 °С, що більше схоже на вугілля, тоді як тверде відновлене паливо, схоже на тирсу, мало температуру вигорання близько 500 °С [5].

Таблиця 1 – Склад (% за масою) суміші вугілля та трьох видів біомаси

Mixed fuel	Coal (%)	Sawdust (%)	Rice husk (%)	SRF (%)
Blend A	70	10	10	10
Blend B	40	20	20	20
Blend C	25	25	25	25
Blend D	10	30	30	30

Також в результаті було підтверджено дані технічного аналізу, вказавши на три етапи втрати маси у вугіллі та тирсі: випаровування води, спалювання летючих речовин і спалювання вуглецю, водню та сірки. Водночас, рисове лушпиння та тверде відновлене паливо, що містять менше води, показали два піки втрати маси, що свідчить про менше випаровування води.

Результати симуляції для суміші А з калорійними значеннями, отриманими відповідно до тестів, порівняно з результатами базового випадку, де масова швидкість палива залишається незмінною через обмежену потужність транспортувального обладнання, показані на рис. 1. Максимальна температура та розмір полум'я для суміші А нижчі, ніж для вугілля. Цей результат узгоджується з результатами термогравіметричного тесту, де температура запалювання, пік та температура вигорання для суміші А є нижчими, ніж для вугілля.

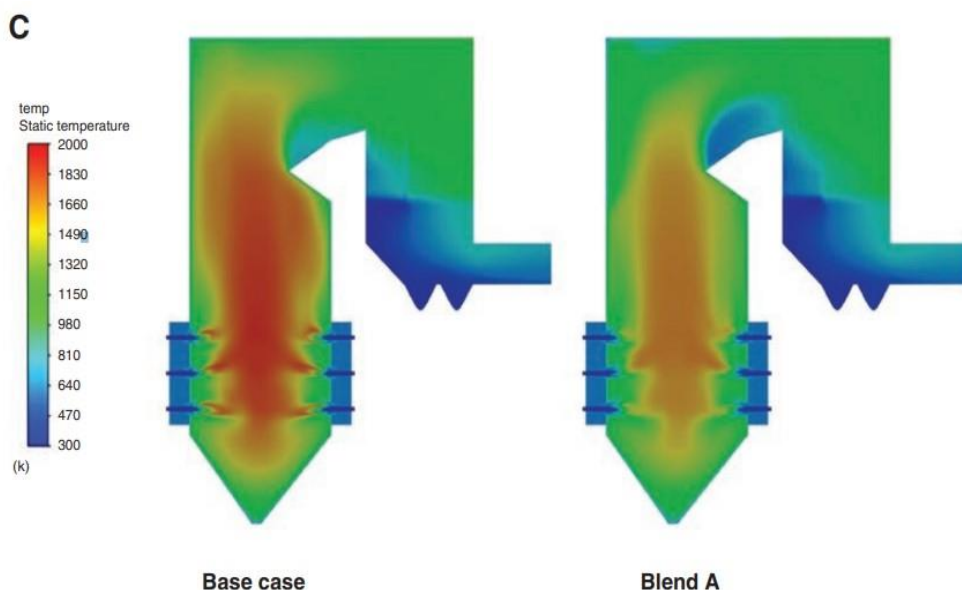


Рисунок 1 – Порівняння температурних контурів суміші А та базового випадку

Це вказує на те, що використання біомаси як заміника вугілля при збереженні загальної масової витрати палива призводить до зменшення енергії, що виробляється під час горіння палива в камері згоряння. Це, в свою чергу, викликає зниження валової потужності, що генерується турбіною, порівняно з базовим випадком.

Зрозуміло, що зниження температури продуктів горіння обумовлено не лише зменшенням енергії палива, що надходить до камери згоряння, але й збільшенням вологовмісту комбінованого палива. Це призводить до використання частини енергії на випаровування води, що знижує температуру продуктів горіння.

Зміни складу палива, як у плані енергетичної цінності, так і хімічного складу, призводять до змін у розподілі температури газів, що безпосередньо впливає на процес теплопереносу між газом і водою або паром у основному обладнанні парогенератора [6].

Висновки. Вибір характеристик паливної суміші може створити синергійний ефект, підвищуючи ефективність горіння. Однак порушення балансу між компонентами суміші може призвести до несприятливих температурних профілів в камері згоряння, що впливатиме на теплопередачу і виробництво пари, з можливим зниженням електричної потужності.

Перелік посилань

1. Liu Q., Li W. The synergistic effects of coal and biomass cofiring. *Energy*, 2013. – Vol. 60. P. 266–272. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.043>
2. Chen W., Li B. Dynamic modeling and control of biomass and coal co-combustion processes. *Applied Energy*. 2015. Vol. 157. P. 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.031>
3. Dunaevska N. I., Bondzyk D. L., Nehamin M. M., Miroshnichenko Y. S., Beztsenny I. V., Yevtukhov V. Y., Shudlo T. S. Technology of anthracite and solid biofuels co-firing in pulverized coal boilers of TPP and CHP. *Nauka innov.* 2020. Vol. 16. No. 5. P. 86–96. <https://doi.org/10.15407/scin16.05.086>
4. Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. Academic Press, 2013. ISBN: 978012396488
5. Mochamad Soleh, Azaria Haykal Ahmad, Firman Bagja Juangsa, Prihadi Setyo Darmanto, Ari Darmawan Pasek. Impact of different kinds of biomass mixtures on combustion performance, interaction and synergistic effects in cofiring of coal and biomass in steam power plants. *Clean Energy*. 2023. Vol. 7. No. 5. P. 1136–1147. <https://doi.org/10.1093/ce/zkad049>
6. Guan Z., Wang X., Yu G. Kinetics of thermal decomposition of coal-biomass blends. *Renewable Energy*. 2010. Vol. 35. No. 2. P. 432–437. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.005>

¹ Аспірант 2 курсу Коновалюк О.Л.¹ Доц., к.т.н. Пешко В.А.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=MLIjHJsAAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН РОТОРА ТУРБІНИ К-200-130 ЗА РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПУСКУ

Постановка проблеми та її актуальність. Обладнання теплових електростанцій України часто працює в змінних режимах роботи через суттєву нестачу маневрених потужностей в енергосистемі. Практичний досвід експлуатації показав значний вплив частих пусків та зупинок обладнання на довговічність його експлуатації через високий рівень термічних напружень під час різкого нагрівання та охолодження основного металу. Однак існують різні технології пуску енергетичного обладнання, що мають різний вплив на темпи накопичення пошкоджень. Таким чином, дослідження впливу пускових параметрів на термонапружений стан парової турбіни є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень. В роботі [1] проаналізовано прогресуюче пошкодження роторів енергоблоків 200/210 МВт. Для аналізу використано модифіковану модель кінематичного зміцнення Шабоша, модифіковану модель ізотропного зміцнення Руссельє, модель в'язко-пластичної течії типу Нортон. Запропоновано локальне перепрофілювання геометрії ротора для зменшення числа концентраторів напружень.

Автори статті [2] відмічають, що ключовою причиною накопичення пошкоджень в концентраторах напружень парових турбін є нерівномірність температурного поля при змінних режимах роботи та поява температурних градієнтів. Відмічено важливість аналізу моментів появи максимальних значень градієнтів не лише з температурної, але і механічної точок зору.

Авторами даних тез раніше проводилось дослідження закономірностей формування температурного поля ротора турбіни К-200-130 при пускових режимах роботи [3]. В даній науковій роботі пропонується розширити дану роботу та проаналізувати рівень термічних напружень при пуску турбіни за різними технологіями.

Формулювання мети. Дослідити напружено-деформований стан ротора середнього тиску турбіни К-200-130 при пуску з холодного стану за двома відмінними графіками пуску, які застосовуються на українських ТЕС з метою встановлення закономірностей формування нестационарного поля напружень.

Основна частина. Система диференціальних рівнянь рівноваги для напруженого стану ротора в циліндричній системі координат має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} + \rho X_r = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} + \rho X_z = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де ρ – густина сталі, X_r , X_z – компоненти вектору густини масової сили.

Розроблено тривимірну модель ротора середнього тиску турбіни К-200-130 з врахуванням основних конструктивних особливостей (рис. 1). Використовуючи отримані в [3] розрахункові дані щодо розподілу нерівномірності поля температур в роторі, для аналогічних графіків пуску було розраховано динаміку зміни інтенсивності напружень в контрольних областях ротора (рис. 2).

Встановлено, що найвищі значення інтенсивностей напружень наявні з моменту виходу ротора на холостий хід. Дана обставина пов'язана з тим, що відцентрові сили є

домінуючими у формуванні напружено-деформованого стану ротора середнього тиску. Область осьового отвору під 13-тим ступенем тиску знаходиться під впливом найвищих розтягуючих зусиль протягом всього циклу (рис. 7). Максимум інтенсивності напружень для блоку № 1 складає 315,5 МПа та для блоку № 2 – 311,2 МПа. Обидва максимуми представлені в момент синхронізації турбогенератора з енергосистемою.

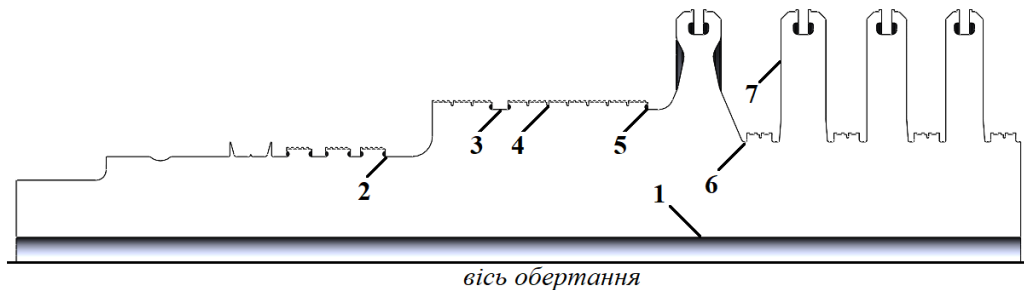


Рисунок 1 – Модель ротора середнього тиску турбіни К-200-130 з характерними областями дослідження інтенсивності напружень

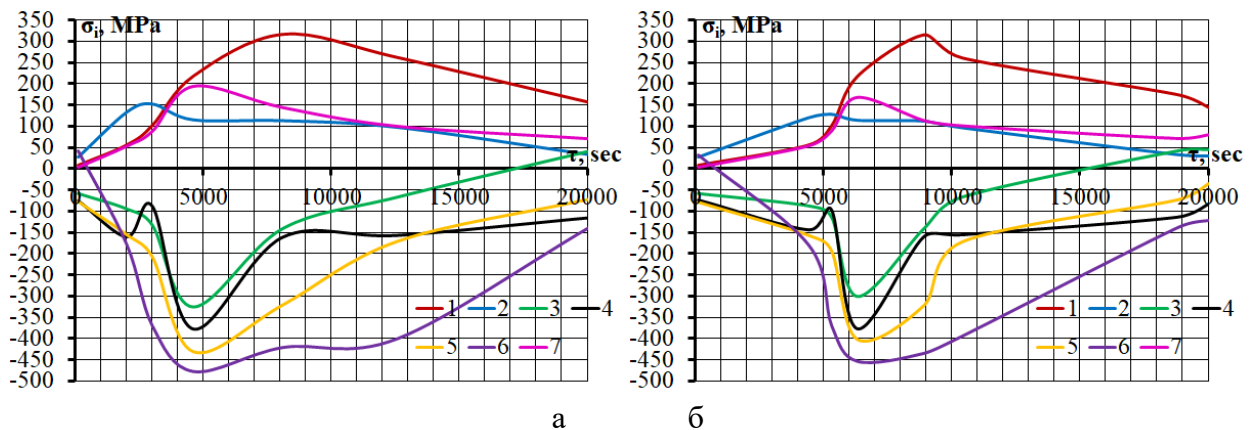


Рисунок 2 – Динаміка зміни інтенсивності напружень в досліджуваних областях ротора середнього тиску при пуску з холодного стану: а – Блок 1, б – Блок 2

Для зон ротора № 3–6 максимальні значення стискаючих зусиль спостерігаються на період часу від виходу турбогенератору на холостий хід до набору 30 МВт електричної потужності. При цьому, даний період пуску триває суттєво довше для енергоблоку № 1 ніж для блоку № 2. Таким чином окремі області ротора середнього тиску, що працює за першою пусковою схемою довше експлуатується в режимі високих напружень.

Висновки. Найбільші інтенсивності напружень в роторі турбіни К-200-130 спостерігаються на період часу від виходу турбогенератору на холостий хід до набору 30 МВт електричної потужності. Характер пускового графіку та нерівномірність температурного поля впливає не лише на абсолютне значення інтенсивності напружень в циклі, але і на тривалість їх присутності. Пусковий графік № 2 є менш пошкоджуючим.

Перелік посилань:

1. Suvadeep Sen, Badri Prasad Patel (2023). Constitutive model based study to enable flexible operation of steam turbine rotors in Indian SPPs. *Materials today-proceedings*, 87, 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.147>
2. Ming Kang, Shi-fang Wu, Ying-zheng Liu (2023). Viscoplastic model-based analysis of in-service oscillation temperature and thermal stress in a rotating component. *International Journal of Thermal Sciences*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108246>
3. Пешко В., Коновалюк О. (2024). Закономірності формування температурного поля ротора турбіни під час пускового режиму роботи. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 35(74), 4, 254-259. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/37>

¹ Магістрант 1 курсу Мельниченко І.О.; ¹ Магістрант 1 курсу Мошков О.С.

¹ Асист., к.т.н. Власенко О.В.

<https://scholar.google.com/citations?user=-Ih8IfYAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПЕРЕОБЛАДНАННЯ КОТЛА КВГ-7,56 ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ БІОМАСИ

Постановка проблеми та її актуальність

Для досягнення ефективної експлуатації теплоенергетичного обладнання необхідно проводити заходи з енергозбереження, економії використання паливно-енергетичних ресурсів, зменшення кількості шкідливих викидів у довкілля, а також максимального використання вторинних енергоресурсів та відходів після переробки біомаси тощо [1, 2].

Аналіз останніх досліджень

Великого технічного прогресу при спалюванні твердого палива (зокрема тріски деревини) було досягнуто із застосуванням колосникової ґратки [3]. Вона складається з окремих елементів – чавунних балок або брусків, що називаються балковими чи брусковими колосниками або чавунних плит, що називаються плитковими колосниками.

При цьому механічні топки дозволяють майже повністю керувати ходом та інтенсивністю процесу горіння.

В залежності від конструкції та розташування колосникової ґратки топки поділяються на такі: з горизонтальною колосниковою ґраткою; з похилою ґраткою та рухомих шаром палива.

Топка з похилою ґраткою має кут нахилу, що дорівнює куту природного укусу палива, що спалюється. Це забезпечує його повільне сповзання вниз по ґратці в міру вигорання. Рекомендований кут нахилу для кам'яного вугілля складає 40–45°; для бурого – близько 40°. У таких топках паливо подається безперервно (з підсушуванням в верхніх частинах ґратки) і потрапляє до зони інтенсивного горіння на нижній половині ґратки. Залишки палива і шлак сповзають донизу на невелику горизонтальну шлакову ґратку (колосники), де відбувається остаточне догорання палива. Для полегшення видалення шлаку ці колосники виконують рухомими або перекидними [3].

Основна перевага таких топок – безперервна подача палива без участі кочегара, відсутність проникнення до топкового простору холодного повітря при завантаженні палива, зручність очищення від шлаку, майже повне згорання і т.ін. Недоліком її конструкції є більш складна система подачі повітря в порівнянні з простою нерухомою колосниковою ґраткою. При цьому повітря подається під ґратку та зверху шару палива, нижні колосники швидше перегорають і вимагають більш частої заміни.

Формулювання мети

Метою роботи є аналіз ефективності використання топкових пристроїв із рухомими колосниковими ґратами на прикладі переобладнання котла КВГ-7,56 для спалювання деревинної тріски (біомаси).

Основна частина

Відповідна котельня є джерелом теплопостачання для виставкових корпусів, що розташовані на території Національного комплексу «Експоцентр України». В існуючій окремо розташованій будівлі котельні встановлені три водогрійні котли, відповідно: типу КВГ-7,56, потужністю $Q = 7,56$ (6,5) МВт (Гкал/год) – 1 од.; типу КСВТ-3,0, потужністю $Q=3,0$ (2,58) МВт (Гкал/год) – 2 од. Теплотехнічне обладнання котельні перебуває в

справному стані та придатне для подальшої експлуатації. Загальна теплова потужність котельні складає 13,56 (11,66) МВт (Гкал/год).

За надійністю теплопостачання котельня відноситься до II категорії. Споживачі теплоти відносяться також до II категорії. Режим роботи котельні – опалювальний період (холодний період року). Теплопостачання від котельні здійснюється по двотрубній підземній системі до будівель корпусів №№ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10. Зовнішні теплові мережі частково відновлені та знаходяться в задовільному технічному стані. Насосне обладнання, що встановлене в котельні, повністю відповідає необхідним умовам, перебуває в задовільному технічному стані та придатне до подальшої експлуатації. Наявний комплекс хімічної водопідготовки забезпечує потреби котельні в повному обсязі та придатний до подальшої експлуатації.

Після проведення технічної експертизи та оцінки доцільності відновлення опалення та гарячого водопостачання було прийнято рішення щодо реконструкції котельні з переобладнанням існуючого котла КВГ-7,56 для спалювання біомаси та резервуванням двох газових котлів КСВТ-3,0.

Переоснащення котельні передбачає облаштування топкового пристрою типу IP.FB.01 під котлом КВГ-7,56 для спалювання тріски деревини. Топковий пристрій передбачається за конструкцією на базі похилої рухомої колосникової ґратки, що надасть змогу ефективно спалювати деревинну тріску та отримувати теплоту в необхідній кількості для забезпечення будівель корпусів №№ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, що розташовані на території НК «Експоцентр України». Також за проектом мають місце розроблені технічні рішення щодо облаштування механізованих систем подачі палива, золовидалення та димовидалення. Проектом реконструкції котельні передбачається до встановлення та експлуатації обладнання, що відповідає всім вимогам з охорони праці, пожежної безпеки, санітарним нормам, що є чинним згідно законодавства України. При експлуатації котла на деревинній трісці додатковим є використання обладнання доочистки димових газів, що забезпечує не перевищення відповідних значень гранично допустимої концентрації забруднюючих речовин у викидах до атмосфери. Проектна теплова потужність котла після реконструкції знижується до 5,7 МВт. Існуюче основне та допоміжне теплотехнічне обладнання котельні залишається в експлуатації без заміни. Сумарна розрахункова потужність котельні після реконструкції складатиме 11,7 МВт, натомість приєднане теплове навантаження на котельню – 4,3 МВт.

Топка з похилою перештовхувальною механічною колосниковою ґраткою IP.FB.01 фірми ARES Engineering призначена виключно для автоматичного спалювання подрібненого деревного палива, як сухого, так і вологого. Її конструкція дозволяє здійснювати термічну утилізацію натуральної деревини у вигляді тирси, лісотехнічних відходів і відходів промислової обробки деревини, як в сухому, так і вологому виглядах. Камера згоряння має форму паралелепіпеда. Колосники встановлені каскадом таким чином, що кожен наступний колосник частково накриває попередній. При цьому ряди колосників поділяються на рухомі та нерухомі. Між колосниками, у вертикальній і горизонтальній площинах, є сопла, через які здійснюється дуття повітря до шару палива і під нього.

Рухливі ряди колосників, рухаючись вперед і назад по нерухомим колосникам, зіштовхують паливо донизу решітки і при цьому перемішують його. Це істотно покращує умови горіння палив з низькою калорійністю та (або) підвищеною зольністю. Рухливі колосники приводяться до руху за допомогою гідравлічних циліндрів, що встановлені на кожному штоці в трьох зонах спалювання. В приводному механізмі передбачена можливість регулювання частоти зворотно-поступальних рухів колосників, чим забезпечується регулювання продуктивності решітки.

Паливо гідроштовхачем подається на самий верхній колосник. Під дією тиску нової порції палива, воно рухається в сторони і донизу, заповнюючи всю площу поверхні колосників. У топках над похилою поверхнею колосників є спеціальний притискний екран з вогнетривкого матеріалу, що витримує температуру 1650 °С. Даний екран спрямовує

полум'я від низу до верху, в протитечію руху палива. Це надає дві основні переваги:

1. Полум'я має довший шлях. Цим забезпечується більш повне згоряння палива, зменшується кількість іскор.

2. Полум'я, що підіймається над вологим паливом, підсушує його, покращуючи процес його спалювання. Це обумовлює можливість спалювання палива з вологістю до 45%.

Остаточне допалювання відбувається у фінішній зоні колосникової решітки, де після останнього ряду колосника зола потрапляє в зольний канал через сітку, що уловлює сторонні матеріали, які можуть потрапити до топкового пристрою разом із паливом (каміння, металеві елементи та ін.). Із зольного каналу за межі топкового простору котла зола та неспалені залишки автоматично видаляються до окремого зольного контейнеру. Транспортер золовидалення має незалежний окремий привід із живленням від контролера котла.

Висновки

Переваги технології спалювання на рухомій похилій колосниковій решітці наступні:

- можливість експлуатації котла на паливі з низькою енергетичною цінністю, високими вологістю і зольністю, а також низькою температурою спікання золи;
- висока стабільність процесу горіння складних видів палива;
- підвищені екологічні показники процесу спалювання, що особливо важливо для утилізації складних та сильно забруднених видів палива.

Перелік посилань:

1. Степанов Д.В., Ткаченко С.Й., Боднар Л.А. Тенденції розвитку теплогенерувального обладнання на твердому паливі. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2008. № 3. – С. 46 – 49.

2. Stahl R., Henrich E., Gehrmann H.J., Koch R., Krebs L., Raffelt K., Weirich F., Zimmerlin B. Thermal Utilization of Biomass by Integration into Industrial Processes. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2004.– Vol. 113 – 116. P. 1173–1192.

3. Біопалива (технології, машини і обладнання) В.О. Дубровін, М.О. Корчемний, І.П. Масло та ін. К.: ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004. – 256 с.

¹ Магістрант 1 курсу Мошков О.С.; ¹ Магістрант 1 курсу Мельниченко І.О.

¹ Проф., д.т.н. Недбайло О.М.

<https://scholar.google.com/citations?hl=uk&user=qTHpcy0AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕЦ-6 ШЛЯХОМ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

Постановка проблеми та її актуальність

Об'єкти енергетичної галузі характеризуються значним споживанням теплової енергії в різних її видах: насичена пара, гаряча вода, а також значним використанням водних ресурсів для технологічних потреб. Досить поширене використання для технологічних процесів, стало використання баштових градирень, але у зв'язку з їх вичерпністю ресурсу роботи постає питання їх модернізації. Впровадження нових систем подачі, розпилення води та зрошувачів надає змогу покращити процес експлуатації та зменшити витрати на виробництво.

Аналіз останніх досліджень

Найбільш важливий вузол градирні – це насадка (блоки зрошувача). Тепло- і масообмінні властивості зрошувача, разом із аеродинамічними, визначають, в основному, ефективність градирні, тобто впливають на вибір необхідних розмірів нової градирні або оцінювання можливостей теплового навантаження існуючої градирні [1]. Для зрошувачів використовуються різні матеріали: деревина, бетон, пластик. Якщо на градирнях охолоджується чиста вода, найбільш економічним є застосування зрошувача плівкового типу. При наявності в охолоджувальній воді суспензій та нафтопродуктів плівкові зрошувачі не рекомендуються до застосування через можливість засмічування проміжків поміж щитами. У таких випадках доводиться використовувати краплинні зрошувачі. Проте вони допускають гідравлічне навантаження приблизно в 1,5 разів менше, ніж плівкові при тому ж охолоджувальному ефекті [2].

Останнім часом знаходять поширення ґратчасті насадки, що виконані у вигляді перфорованих поліетиленових труб. Вони вкладаються впорядковано або в навалі. Ґратчаста насадка фірми «Бальк-Дюрр» [3] складається з плоских і хвилястих ґраток із розмірами 0,45×1,2 м, що виготовлені з поліетилену. Їхні осередки мають вигляд ромба з розмірами по осях 25×19 мм. В зібраному вигляді насадка являє собою об'ємну структуру з вертикальними каналами у вигляді рівностороннього трикутника з основою 60 мм і висотою 18 мм. Необхідна висота насадки забезпечується, найчастіше, двома ярусами блоків (складає 0,9 м). Ґратчаста насадка з ПР50 подібна насадці фірми "Бальк-Дюрр", але складається з довгомірних пустотілих елементів із ґратчастими стінками, що мають вигляд рівностороннього трикутника. ПР50 виготовляються з поліетилену низького тиску на базі марки 273-79, що не піддається руйнуванню під впливом інсоляції.

Формулювання мети

Метою роботи є аналіз експлуатаційних параметрів системи охолодження технологічної води (градирні) та її технічних рішень на базі комплексу системи технічного водопостачання ТЕЦ-6.

Основна частина

Схема технічного водопостачання ТЕЦ-6 виконана однопідйомною. В якості охолоджувачів циркуляційної води використовуються дві баштові градирні з площею зрошення по 3200 м² кожна і бризкальний басейн із площею дзеркала води 28 400 м². Для подавання води до конденсаторів турбін теплообмінників допоміжного обладнання

(маслоохолоджувачі, газоохолоджувачі та т.ін.), градирні та бризкального басейну в центральній насосній станції встановлені чотири циркуляційні насоси типу ОПВ 3-110-КЗ. Насоси осьові поворотно-лопатеві вертикальні, з камерним підведенням води. Подача охолоджуючої води від ЦНС до конденсаторів турбін та на їх допоміжне обладнання здійснюється по двох напірних водогонах діаметром Ду 2400 мм, що розраховані на об'ємну витрату води 65180 м³/год при середній швидкості течії 2,0 м/с. Нагріта в конденсаторах вода по двох зливних водогонах Ду 2200 мм подається на охолодження в градирні та бризкальний басейн. Зливні водогони до градирень і бризкального басейну розраховані на об'ємну витрату води 56 000 м³/год при середній швидкості 2,05 м/с.

Нагріта в теплообмінниках допоміжного обладнання вода по водогону Ду 1800 мм скидається безпосередньо в аванкамеру ЦНС.

Охолоджена в градирнях і бризкальному басейні вода з їх водозбірних резервуарів самопливом зливається в аванкамеру ЦНС. З водозбірних басейнів кожної градирні вода зливається послідовно по двох водогонах Ду 2000 мм, одному водогону Ду 2800 мм, і далі по залізобетонному каналу з перерізом 2500×2500 мм. З водозбірного резервуару бризкального басейну вода зливається по залізобетонному каналу перерізом 2500×2500 мм. Зливні канали бризкального басейну та градирні ст. № 2 в районі розташування градирень ст. № 1 і 2 об'єднуються в один канал.

Поповнення безповоротних втрат води в СТВ (випаровування, винесення, фільтрація, потреби ХВО, сторонніх споживачів) здійснюється з річки Десна, на якій споруджена берегова насосна станція (БНС) додаткової води. На даний час в БНС встановлені чотири насоси типу 350Д-90.

На всмоктування насосів вода поступає через затоплений водоприймальний оголовок І типу із залізобетонною оболонкою. Подача додаткової води від БНС до майданчику ТЕЦ-6 здійснюється по двох сталевих водогонах Ду 800 мм. На майданчику ТЕЦ-6 ці водогони об'єднуються в спільний колектор (колодязь перемикачів), звідки вода подається роздільно на підживлення СТВ, потреби ХВО і т.ін.

Подача води стороннім споживачам здійснюється по двох водогонах Ду 300 мм.

Основними чинниками, що визначають вибір насадки є параметри теплопередачі, втрати тиску, загальна вартість технічного рішення тощо. Надійність, в тому числі доступність ремонту, є особливо важливим фактором для теплових електростанцій та в інших сферах використання, де вартість градирні становить дуже малу частину всіх витрат, а виведення градирні в ремонт – велику.

До пластмасових насадок ставиться вимога за величиною об'ємного коефіцієнту масовіддачі виходячи з того, що для розрахункового охолодження води було б досить насадки висотою близько 1 м і значення коефіцієнту аеродинамічного опору проходження повітря, що дорівнює приблизно значенню 10–15 швидкісних напорів.

З ПР50 можуть бути скомпоновані різні схеми блоків насадки. Найбільш практичною і ефективною, в охолоджувальній здатності, є схема із горизонтальним укладання ПР50 рядами по висоті. ПР50 розміщуються впритул один до одного з поворотом їх в кожному наступному ряду під 90° по відношенню до призм попереднього ряду. У зібраному вигляді блок насадки є об'ємною ґратчастою структурою з горизонтальними каналами трикутного профілю, що є передбачає проникнення повітря і води в будь-якому напрямку. Практичність такої схеми полягає в її простоті та можливості набору будь-якої розрахункової висоти з кратністю 50 мм для забезпечення необхідного охолодження води. Найчастіше буває достатньою висота 0,9–1 м блоку насадки з ПР50.

Прототипом блоку насадки ТР44 з труб з гвинтовими гофрами є насадка з труб діаметром 63 мм із горизонтальними гофрами, що призначені для дренажу ґрунтових вод. Додавання гофрам не горизонтального, а похилого розміщення у вигляді різьблення, звичайно, дещо зменшує можливість забруднення поверхні труб. У той же час прогноз щодо істотного підвищення охолоджувальної здатності насадки з труб із гвинтовим розташуванням гофр не виправдалися. Чим більше крок гвинта (крутіше нахил гофри), тим

більше ймовірність утворення в канавці (гофрі) плівки води, що швидко стікає по улоговинці гвинта донизу, тобто час контакту води з повітрям при мінімальній можливості перемішування шарів води всередині безперервної плівки зменшується [2]. Деяке закручування, пристінних до гвинтових труб, шарів повітря призводить до погіршення гідравлічного режиму стікання води в достатній мірі, що нічим не компенсується. Таким чином можна обґрунтовано стверджувати, що надавати гофрам великого нахилу недоцільно. Обґрунтованим є надання їм нахилу для змивання шару відкладень. Для цього достатньо гідравлічного ухилу порядку 0,15 (в ТР 0,36). Це, однак, не надає підстав стверджувати, що такі труби не будуть забруднюватися, особливо в оборотних циклах нафтохімічних підприємств. У розвинених країнах насадки з труб із суцільними стінками ніколи не застосовувались оскільки є неекономічними за витратою матеріалу на їх виготовлення та неможливістю досягнення інтенсивного тепломасообміну поміж водою і повітрям всередині труб, що складають 40–50 % активного об'єму градирні. При недостатньо рівномірному розподілі води деяка частина цього об'єму може взагалі не брати участі в процесі охолодження. Саме цим, а також гіршим гідравлічним режимом течії води в трубчастих насадках порівняно з ґратчастими, пояснюється різниця в величині коефіцієнту масовіддачі, відповідно: 0,83 – для трубчастого; 1,13 і 1,02 – для ґратчастих при однакових умовах. Технологічні характеристики блоків насадки з гладких смуг можуть бути істотно поліпшені шляхом перемішування і турбулізації потоків води і повітря, що контактують. Це може бути досягнуто шляхом застосування смуг з прямими або криволінійними хвилями, перфорацією, шорсткою або пористою поверхнями, а також виконанням плівкових блоків насадки з розривами поміж ярусами за висотою. Як турбулізатори потоків можуть бути використані також різної форми виступи, гофри, що змінюють напрямок руху потоків і сприяють їх перемішуванню. Всі ці прийоми, в тій чи іншій мірі, підвищують охолоджувальну здатність блоку насадки, але, як правило, збільшують також їхній аеродинамічний опір [3].

Таким чином, охолоджувальну здатність блоку насадки можна підвищити шляхом нанесення штучної шорсткості на 10–20 %, виконанням розривів по висоті на 25–30 %, утворенням хвиль в залежності від їх розмірів, напрямку і форми в 1,5–2 рази, підбором оптимальної кількості гофрів – приблизно в два рази. Крім того, раціональне розташування ярусів насадки за висотою з розривами може знизити витрату матеріалу на 25–30 % і зменшити аеродинамічний опір на 20–30 %. В світовій практиці встановлено, що за економічними, тепловими і аеродинамічними показниками найбільш ефективними є полімерні насадки з тонких гофрованих смуг і ґратчастих елементів різної конструкції – з великою насиченістю об'єму матеріалу для їхньої експлуатації у воді зі звичайними концентраціями забруднень і з меншою – для суттєво забрудненої води.

Висновки

Наведені вище результати технологічного аналізу складають основу для впровадження інженерно-технічної розробки для існуючої системи технічного водопостачання ТЕЦ-6. Це має підвищити надійність теплопостачання значної частини житлово-комунального господарства міста Києва, а також сприяти зменшенню негативного впливу на довкілля.

Перелік посилань:

1. Мисак Й.С., Івасик Я.Ф., Гут П.О., Лашковська Н.М. Об'єкти теплових електричних станцій. Режим роботи та експлуатації., Львів: НУ «Львівська політехніка», 2007. – 256 с.
2. Webb R.L. Advances in Air-Cooled Heat Exchanger Technology. Proceedings of the ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Orlando, Florida, USA. November 5 – 10, 2000. pp. 49 - 57. ASME. <https://doi.org/10.1115/IMECE2000-1278>
3. Kröger D.G. Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers. New York. 2018.

¹ Аспірант 1 курсу Сепік А.В.

¹ Доц., к.т.н. Пешко В.А.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

СИНТЕЗ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ЦИЛІНДРА СЕРЕДНЬОГО ТИСКУ ТУРБІНИ К-200-130

Постановка проблеми та її актуальність. У сучасній енергетиці важливим завданням є забезпечення надійної та ефективної роботи парових турбін. Ключовим аспектом є розуміння розподілу температур у деталях турбіни для прогнозування термічних напружень та пошкоджень. Для розв'язання задачі теплопровідності необхідне точне задання граничних умов теплообміну, що залежать від кінематичних і термодинамічних параметрів робочої пари в турбіні. Синтез проточної частини турбіни дозволяє визначити ці параметри, що є основою для подальших розрахунків.

Аналіз останніх досліджень. Підвищення ефективності та надійності парових турбін є основним напрямком досліджень у енергетиці. Особлива увага приділяється розрахункам теплообміну та оптимізації проточних частин турбін, що впливає на їхню продуктивність і довговічність.

Монографія [1] пропонує комплексний підхід до оптимізації проточних частин турбін, враховуючи різні режими їх експлуатації. Розроблена методика дозволяє підвищити ефективність турбін через багатокритеріальну оптимізацію, інтегруючи сучасні інформаційні технології для точних і швидких розрахунків.

Стаття [2] аналізує розробку конструкцій високонапірних ступенів парових турбін. Чисельне моделювання визначило оптимальні параметри ступенів, що підвищують ефективність і надійність турбін. Результати можуть бути використані для модернізації та розробки нових турбінних установок.

У роботі [3] розглядається застосування методів планування експерименту (DOE) для створення макромоделей характеристик елементів проточної частини парових турбін. Це дозволяє скоротити експерименти і підвищити точність моделювання теплообмінних процесів, що сприяє оптимізації енергетичних установок.

Ці дослідження роблять вагомий внесок у розвиток методів розрахунку та оптимізації теплообміну в парових турбінах, що є актуальним для підвищення ефективності та надійності енергетичних установок.

Формулювання мети. Основною задачею дослідження є встановлення розподілу термодинамічних та кінематичних параметрів пари в проточній частині циліндра середнього тиску турбіни К-200-130 у відповідності до експлуатаційних параметрів пари у відборах за даними однієї з українських ТЕС. Це дозволить визначити граничні умови для розв'язання нестационарної задачі теплопровідності та оцінити тепловий стан елементів турбіни під час різних режимів роботи.

Основна частина. Об'єктом дослідження є проточна частина (ПЧ) циліндра середнього тиску (ЦСТ) тому що у турбіни К-200-130 самий навантажений елемент це ротор середнього тиску. ЦСТ складається з 11 ступенів тиску (нумерація з 13 по 23), має 4 нерегульовані відбори пари – 3 з проточної частини та 1 з вихлопу. Ескіз ПЧ ЦСТ представлено на рис. 1.

Вхідні дані до розрахунку отримані від однієї з генеруючих компаній України, а саме промислове креслення проточної частини, реальні експлуатаційні параметри пари на вході та виході з циліндра середнього тиску, а також у камерах відбору пари.

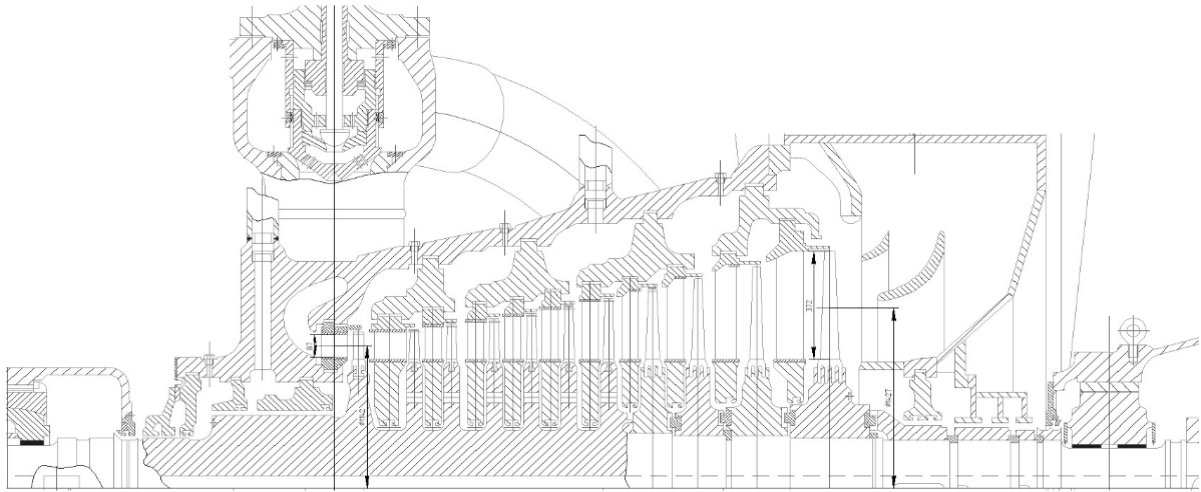


Рисунок 1 – Ескіз проточної частини циліндра середнього тиску турбіни К-200-130

Математична модель синтезу течії пари в проточній частині формується на базі фундаментальних рівнянь термо- та гідродинаміки, а саме: рівнянь збереження енергії, нерозривності течії, рівнянь процесу і стану, кінематичних співвідношень, що пов'язують кути і швидкості потоку. Зокрема, для простору проточної частини за сопловим апаратом рівняння нерозривності з врахуванням рівнянь енергії, процесу і стану:

$$G_1 = \frac{C_{1z} F_1}{v_1} = \frac{C_1 \sin \alpha_1 F_1}{v_1 \left(p_1 \left(h_0 - \frac{C_1^2}{2\phi^2}; S_0(p_0; h_0) \right); h_0 - \frac{C_1^2}{2} \right)}$$

Аналогічне рівняння нерозривності для простору за робочою решіткою турбіни:

$$G_2 = \frac{W_{2z} F_2}{v_2} = \frac{W_2 \sin \beta_2 F_2}{v_2 \left(p_2 \left(H + \frac{u^2 - W_2^2}{2\psi^2}; S_1(p_1; h_1) \right); H + \frac{u^2 - W_2^2}{2\psi^2} \right)}$$

Подібні рівняння вирішуються для кожного зі ступенів проточної частини. Додатково застосовуються граничні умови розподілу тиску на вході та виході з циліндра, а також у відборах пари в якості замикаючих співвідношень.

Основні кінематичні та термодинамічні результати розрахунку параметрів пари представлено у графічному вигляді на рис. 2 і 3.

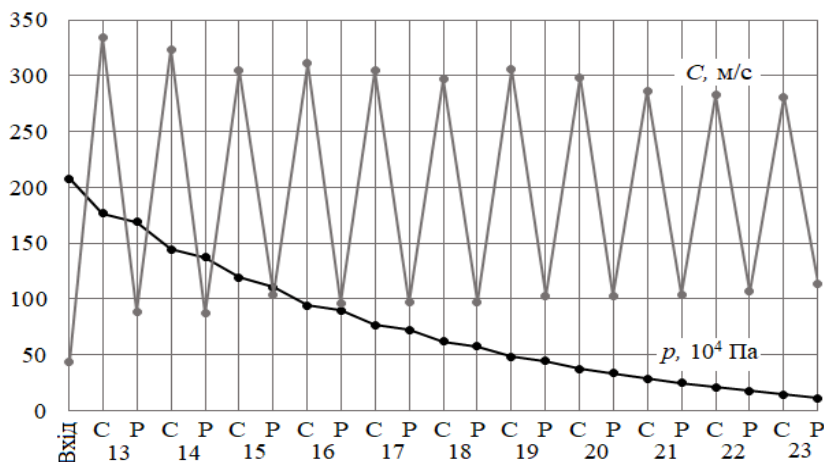


Рисунок 2 – Діаграма зміни тиску та абсолютної швидкості пари на ступенях турбіни (С – соплова група, Р – робоча решітка ступеня)

Як показано на рис. 2, що відображає результати чисельного моделювання, у кожному наступному сопловому сегменті турбіни відбувається поступове зниження тиску, тоді як абсолютна швидкість робочого тіла зростає. Подальше її зменшення відбувається внаслідок енергетичного перетворення під час взаємодії з робочою лопаткою.

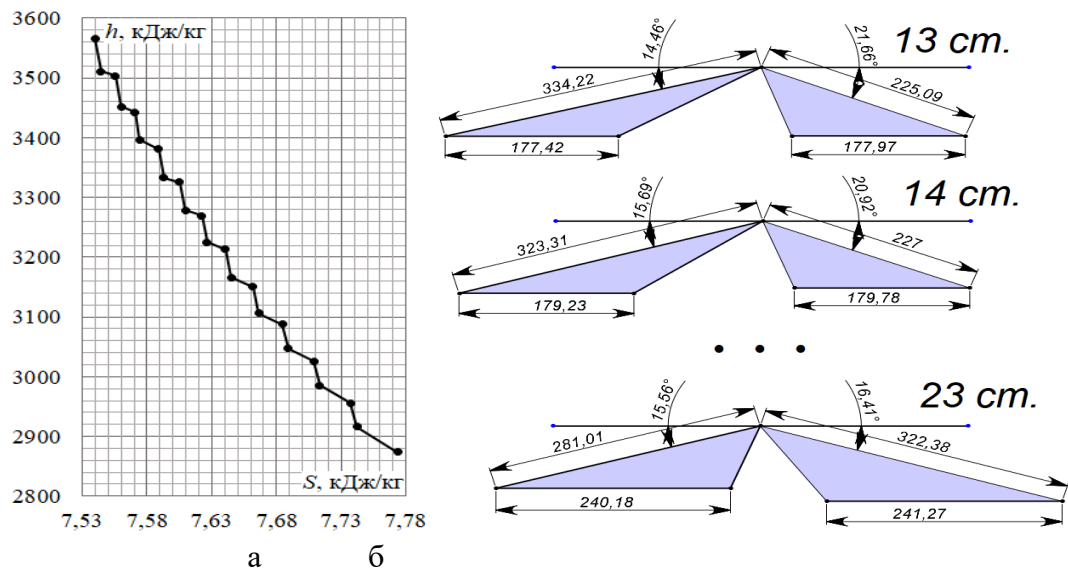


Рисунок 3 – Процес розширення пари в h,S діаграмі (а) та трикутники швидкостей для деяких ступенів (б) ПЧ ЦСТ

На рис. 3а, відповідно до h,S -діаграми, спостерігається поступове зростання реактивності ступенів, що виражається у скороченні довжини вертикальних відрізків, які характеризують соплові апарати, та подовженні горизонтальних сегментів, що відповідають робочим лопаткам. На рис. 3б наведено трикутники швидкостей для перших двох і останнього ступеня. Кути входу пари в соплові апарати залишаються близькими до оптимального значення 15° на всіх ступенях, однак суттєве відхилення α_2 від 90° на кожному ступені спричиняє значні аеродинамічні втрати, пов'язані з вихідною швидкістю потоку.

Отримані результати описують розподіл термодинамічних та кінематичних параметрів пари в проточній частині ЦСТ турбіни К-200-130, що знаходиться в експлуатації на одній з ТЕС України та представляють інтерес для встановлення закономірностей теплообміну пари з основним металом турбіни за допомогою рівнянь подібності.

Висновки. У ході дослідження було здійснено синтез проточної частини циліндра середнього тиску турбіни К-200-130, що дозволило визначити розподіл термодинамічних і кінематичних параметрів пари на різних ступенях. Отримані результати показали закономірності зміни тиску, швидкості та реактивності ступенів, що є основою для подальшого аналізу теплового стану елементів турбіни. Виявлено, що значні втрати енергії пов'язані з вихідною швидкістю через відхилення α_2 від 90° , що вказує на необхідність подальшої оптимізації геометричних параметрів проточної частини. Отримані дані можуть бути використані для уточнення граничних умов при розв'язанні нестационарної задачі теплопровідності та прогнозування термічних напружень у роторі середнього тиску.

Перелік посилань:

1. Усатий О.П. Всережимна багатопараметрична багатокритеріальна оптимізація проточної частини турбін в інтегрованому інформаційному просторі: дис. док. техн. наук: 05.05.16 – Турбомашини та турбоустановки / Усатий Олександр Павлович; М-во освіти і науки України, Нац.техн.ун-т України «Харк. політехн. ін-т».– Харків, 2013.
2. Avdieieva O., Usatyi O., Vodka O. (2020). Development of the Typical Design of the High-Pressure Stage of a Steam Turbine. In: Ivanov V., Pavlenko I., Liaposhchenko O., Machado J., Edl M. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham.
3. Oleksandr Usatyi, Olena Avdieieva, Dmytro Maksiuta, Pham Tuan; Experience in applying DOE methods to create formal macromodels of characteristics of elements of the flowing part of steam turbines. AIP Conf. Proc. 28 November 2018; 2047 (1): 020025.

¹ Магістрант 1 курсу Степанченко А.А.¹ Доц., к.т.н. Риндюк Д.В.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=SAMbKroAAAAJ&hl=uk>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПРОЄКТУВАННЯ ФІЛЬТРА ТОНКОЇ ОЧИСТКИ ДЛЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

Постановка проблеми та її актуальність. Перед використанням генераторного газу в двигунах внутрішнього згорання потрібна його якісна очистка. Попередні дослідження показали, що ступінь очистки газу фільтр-циклоном є недостатнім для використання генераторного газу в ДВЗ [1]. Тому було прийнято рішення про створення додаткового фільтра тонкої очистки.

Аналіз останніх досліджень. Проблема очищення газів є дуже важливою в усіх сферах виробництва та навіть в повсякденному житті.

Наприклад у статті [2] наводиться метод удосконалення конструкції скомбінованих фільтрів. Доводиться актуальність та ефективність покращення фільтрувальних елементів.

У роботі [3] доводиться актуальність та важливість захисту довкілля від шкідливих викидів промисловості. Також в наведеному матеріалі описуються різні типи фільтрації та наводяться їхні переваги та недоліки.

В матеріалі [4] наведені основні сучасні методи розрахунку для різних систем фільтрації. Також наводяться норми концентрацій шкідливих речовин для безпечної діяльності людини та для мінімізації забруднень навколишнього світу.

Формулювання мети. Метою даної роботи є створення фільтра тонкої очистки генераторного газу на основі моделювання процесу фільтрації двофазного середовища через анізотропний пористий матеріал.

Основна частина. Математична модель базується на наступних закономірностях. Для опису руху газового потоку в середовищі фільтруючого елемента використовується рівняння Нав'є-Стокса (1):

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + F, \quad (1)$$

де ρ – густина газу (кг/м³);

v – вектор швидкості потоку (м/с);

p – тиск у потоці (Па);

μ – динамічна в'язкість газу (Па·с);

F – сила взаємодії частинок із потоком.

Режим потоку визначається за числом Рейнольдса (2):

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}, \quad (2)$$

де d – характеристичний розмір потоку або частинки;

v – швидкість потоку.

Якщо $Re < 2000$ – потік ламінарний, якщо $Re > 4000$ – турбулентний.

Ефективність осадження частинок розраховується за формулою (3):

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{v_{\text{седиментації}} L}{v_{\text{газу}}}\right), \quad (3)$$

де $v_{\text{седиментації}}$ – швидкість осадження частинок;

L – довжина шляху який пройшли частинки в фільтрі.

На основі розробленої математичної моделі було проведено комплекс числових експериментів по визначенню ступеня очистки генераторного газу від твердих домішок (рис. 1).

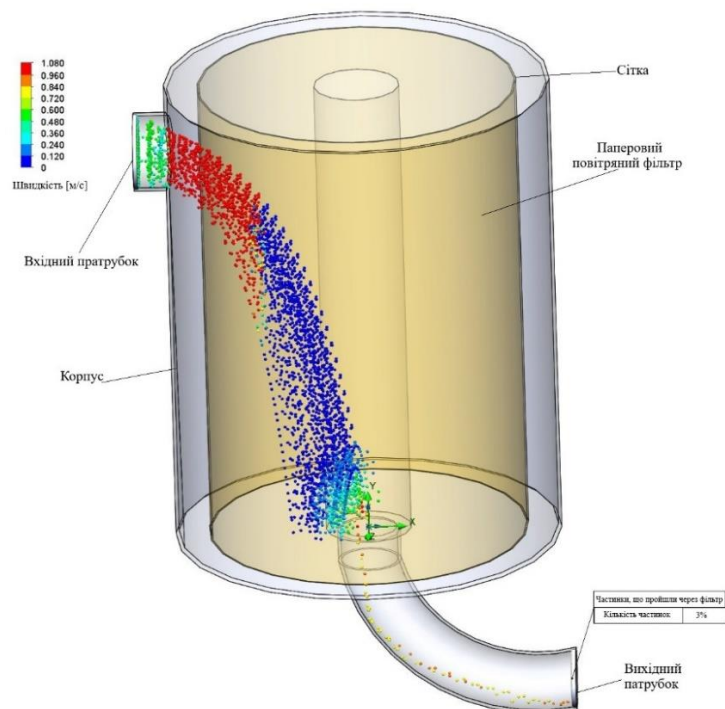


Рисунок 1 – Фільтр тонкої очистки

Розрахункові дослідження показали що ступінь очищення газу становить 97 %. В результаті аналізу числових експериментів було запропоновано конструкцію фільтра тонкої очистки.

Висновки. Проведені дослідження показали, що при використанні фільтра тонкої очистки генераторний газ достатньо очищений для його використання в ДВЗ. В подальшому можливе удосконалення системи фільтрації для уловлення 100 % частинок для використання газу в більш складних механізмах.

Перелік посилань:

1. Риндюк Д.В., Степанченко А.А. Визначення оптимальних конструктивних параметрів повітряного циклона для газогенератора малої потужності. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 35 (74) № 2 2024 с. 205 – 213. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/28>
2. Радчук Д.І., Чеберячко С.І., Чеберячко Ю.І., Наумов М.М. Розробка скомбінованого фільтру з індикацією закінчення строку служби для протигазу. Електротехнічні та інформаційні системи, № 106, 2024, с. 100 – 109. URL: <https://journals.politehnica.dp.ua/index.php/eis/article/view/691>
3. Гордієнко Д., Проект системи очистки газів виробництва шарикопідшипникових сталей в електросталеплавильних печах з утилізацією вловленого пилу. Кваліфікаційна робота/проект. Запорізький національний університет. URL: <https://dspace.znu.edu.ua/jspui/bitstream/12345/5041/3/%D0%93%D0%BE%D1%80%D0%B4%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE.pdf>
4. Ратушняк Г., Теоретичні основи технології очищення газових викидів. Навчальний посібник. ВДТУ, 2002, 96 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2023/Ratushnyak_2002_96.pdf
5. Глушенко О., Пиловлівлювання та очищення промислових викидів. Конспект лекцій. Дніпровський державний технічний університет. URL: https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-z_kl30.pdf

¹ Аспірант 1 курсу Ткаченко М.В.

¹ Доц., к.т.н. Риндюк Д.В.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

Постановка проблеми та її актуальність. З огляду на ситуацію в енергетичному секторі України та необхідність зменшення споживання природного газу як джерела енергії, важливо звернути увагу на альтернативні системи опалення, які потребують мінімальної кількості електроенергії для функціонування. В економіці України ці проблеми набувають особливої гостроти, оскільки на виробництво теплової енергії для комунального сектору, який займає близько 55 % у загальному енергетичному балансі країни, витрачається понад 27 % споживаного палива. Крім того, ця галузь залишається однією з найбільш технічно відсталих, стикаючись із численними викликами технічного, економічного та екологічного характеру. Одним із найефективніших рішень для обігріву та охолодження приватних будинків, офісних приміщень тощо є теплові насоси. В умовах значного дефіциту генеруючих потужностей актуальним завданням стає максимально ефективне використання електроенергії під час їх експлуатації.

Теплові насоси стають дедалі популярнішими, оскільки їх ефективність набагато вища за традиційні системи опалення, а також вони здатні покривати потреби в кондиціонуванні об'єктів.

Аналіз останніх досліджень. Тепловий насос є енергоефективним, екологічним, легким в автоматизації та зручним в експлуатації теплогенеруючим обладнанням, яке з точки зору вибору джерела теплоти є досить гнучким рішенням, що має високий рівень надійності в експлуатації [1]. Такі переваги теплонасосних технологій дали потужний поштовх для їх популярності та впровадження в багатьох країнах світу. На сьогодні в світі встановлено та експлуатується сотні мільйонів ТН, що говорить про їх популярність, надійність, енергетичну та економічну ефективність [2].

Формулювання мети. В умовах військової агресії і, як наслідок, браку енергоресурсів доцільно розглядати найбільш ефективні варіанти для систем опалення та кондиціонування будівель.

Метою даної роботи є розгляд типів теплових насосів та особливостей їх використання для підвищення ефективності роботи.

Основна частина. Принцип роботи теплового насоса базується на перенесенні теплоти з холоднішої зони до теплішої за допомогою зворотного циклу [3]. Для цього використовується невелика кількість електроенергії, яка забезпечує циркуляцію холодоагенту та передачу теплової енергії. Завдяки такому механізму теплові насоси можуть ефективно виконувати функції опалення, охолодження, вентиляції та підігріву води.

Згідно з Національним планом дій щодо розвитку відновлюваної енергетики до 2030 року, поставлено завдання забезпечити 35 % відновлюваної енергії у кінцевому споживанні енергії для сектору опалення та охолодження. Для досягнення цієї мети необхідно збудувати 35,6 ГВт нових енергетичних потужностей, з яких 5,1 ГВт припадає на теплові насоси.

Основний виклик у швидкому впровадженні теплонасосних технологій в Україні полягає у відносно високих початкових інвестиціях порівняно з традиційними методами

отримання теплової енергії з викопного та альтернативного палива. Проте ці витрати виправдовуються у довгостроковій перспективі завдяки суттєвій економії коштів, особливо з урахуванням можливого зростання податків на викиди CO₂ та обмеженої доступності інших видів палива [10].

На рис. 1. показано принцип роботи теплового насоса, який полягає у перенесенні теплової енергії з однієї зони в іншу за допомогою фізичних процесів випаровування та конденсації холодоагенту.

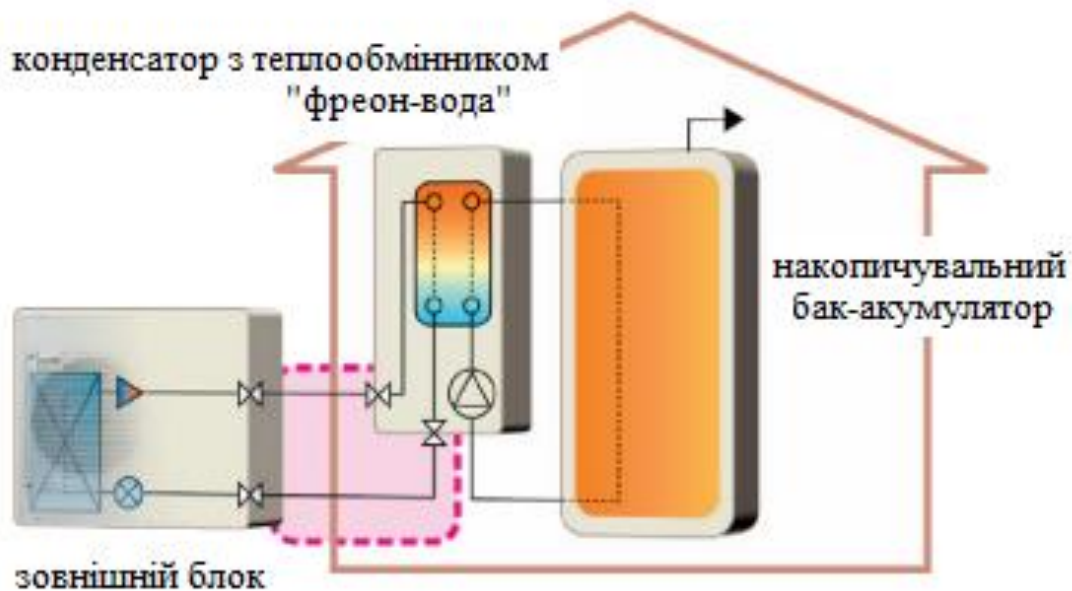


Рисунок 1 – Принципова схема роботи теплового насоса

Різні типи теплових насосів включають системи «повітря-вода», «вода-вода», «розсіл-вода», «відпрацьоване повітря-вода» та «повітря-повітря». Також поширені гібридні конфігурації, що поєднують теплові насоси з традиційними опалювальними системами або іншими відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячні панелі [4].

Теплові насоси типу «повітря-вода» використовують енергію з навколишнього повітря та передають її через водяну систему опалення, зокрема через радіатори або теплу підлогу. Системи «повітря-повітря» розподіляють нагріте або охолоджене повітря по приміщеннях за допомогою повітроводів. Повітряні теплові насоси (ASHP) особливо ефективні для міських і щільно забудованих районів, де встановлення ґрунтових систем може бути неможливим [5]. Проте їхня ефективність знижується в умовах сильного холоду або підвищеної вологості [6].

Ґрунтові теплові насоси (GSHP), відомі також як геотермальні, забезпечують стабільнішу роботу завдяки відносно постійній температурі ґрунту. Вони можуть використовувати вертикальні або горизонтальні контури трубопроводів для теплообміну [7]. Однак їх встановлення потребує значних земельних площ, що ускладнює використання в густонаселених містах.

Теплові насоси, що працюють на основі підземних або поверхневих вод, використовують їх як джерело тепла взимку і холоду влітку. Завдяки стабільній температурі води ці системи мають вищий коефіцієнт ефективності (COP) порівняно з повітряними ТН. Проте для їхнього впровадження необхідно враховувати доступність водних ресурсів, потенційні екологічні наслідки та технічні аспекти буріння свердловин.

Оскільки, за рахунок меншої вартості обладнання та його встановлення, більшої популярності в Україні набули теплові насоси типу «повітря-вода», за основу візьмемо саме цей тип теплових насосів.

Основними факторами, що впливають на ефективність роботи теплового насосу (COP) є температура повітря навколишнього середовища, та температура на подачі в систему опалення. Це детально розглянуто в роботах [8] та [9], з яких випливає, що при зниженні температури повітря навколишнього середовища ефективність роботи теплового насоса падає. Також виявлено, що при підвищенні температури подачі теплоносія знижується COP теплового насоса. Тому для забезпечення ефективної роботи системи опалення при низьких температурах використовуються додаткові джерела тепла: електричний, газовий чи твердопаливний котел. На сьогоднішній день більшість моделей ТН мають вбудовані ТЕНи, що дозволяє обійтися без встановлення додаткового обладнання і керуються штатною автоматикою ТН. Для ефективного опалення будівель при відносно невеликих температурах подачі теплоносія (35–45 °C) використовують наступні системи опалення:

- тепла підлога (має високу ефективність, за рахунок використання явища стратифікації повітря);
- фанкойли різних типів: настінні, підлогові, касетні (мають високу ефективність за рахунок використання теплообмінника та вентилятора;
- можуть використовуватись як на обігрів так і на охолодження приміщення).

Висновки. Теплові насоси є ефективним рішенням для опалення та кондиціонування будівель, та мають велику перспективу використання в умовах дефіциту енергоносіїв. Проте дані системи мають свої особливості, що передбачає їх врахування при експлуатації. В подальшому, автор планує проведення комплексу експериментів на основі діючого обладнання (ТН «повітря-вода») з метою визначення оптимальних параметрів для підвищення ефективності його роботи.

Перелік посилань:

1. «Review of the Market of Thermal Pumps». Electronic Magazine of Power Service Company «Cities and Buildings», no. 7, July 2013.
2. Alberini A., Gans W., Towe C. Free riding, upsizing, and energy efficiency incentives in Maryland homes. *Energy J*, vol. 3 (1), 2016. <http://dx.doi.org/10.5547/01956574.37.1.aalb>.
3. Dossat R., Horan T. Principles of Refrigeration. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 2002.
4. Staffell I., Brett D., Brandon N., et al. A review of domestic heat pumps. *Energy Environ Sci*, vol. 5 (11), 2012. <http://dx.doi.org/10.1039/c2ee22653g>.
5. Kelly N., Cockroft J. Analysis of retrofit air source heat pump performance: Results from detailed simulations and comparison to field trial data. *Energy Build*, vol. 43 (1), 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.018>.
6. Zhang Y., Zhang G., Zhang A., et al. Frosting phenomenon and frost-free technology of outdoor air heat exchanger for an air-source heat pump system in China: An analysis and review. *Energies*, vol. 11 (10), 2018. <http://dx.doi.org/10.3390/en11102642>.
7. Deng J., Wei Q., Liang M., et al. Test on energy performance of medium-depth geothermal heat pump systems (MD-GHPs). *Energy Build*, vol. 184, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.006>.
8. P. Kudelya, A. Solomakha, M. Ocheretyanko «Evaluation of the efficiency of heat pumps for heating using cycle's method». [No. 4 \(47\) \(2016\): Scientific and Applied Journal Vidnovluvana energetika](#)
9. Босий М.В., Кузик О.В. «Ефективність циклу теплового насоса для теплопостачання». [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).136-142](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).136-142)
10. Теплові насоси – потужна технологія енергетичної трансформації. <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/03/8/697791/>.

¹ Магістрант 1 курсу Тихонюк С.Л.

¹ Доц., к.т.н. Баранюк О.В.

https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=uk&user=JQnIBoEAAAAAJ

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОВОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВЕНТИЛЯЦІЙНОГО ПОВІТРЯ ТА СТІЧНИХ ВОД ПІДЗЕМНИХ СПОРУД МЕТРОПОЛІТЕНІВ

Постановка проблеми та її актуальність. За рахунок роботи вентиляції підземних споруд метрополітенів в холодний період року в атмосферу викидається значна кількість теплоти, яка має достатній потенціал для утилізації за допомогою теплових насосів на потреби опалення та гарячого водопостачання об'єктів, що цього потребують. Також водонасосними установками в каналізацію перекачуються значні об'єми підземних вод, які проникають в підземні споруди метрополітенів. Ця вода також має надлишковий тепловий потенціал. Кількість енергії, яку потрібно затратити на роботу теплових насосів з додатковим обладнанням схеми теплопостачання, значно менша, ніж від традиційних джерел теплозабезпечення. Зменшення кількості використання викопного палива на потреби теплозабезпечення також напряму впливає на зменшення забруднення навколишнього середовища і зниження викидів парникових газів.

Аналіз останніх досліджень. Однією з основних складових розвитку людського суспільства є достатність енергоресурсів, в першу чергу тих, енергію яких можливо перетворити в технічну роботу. В умовах дефіциту і високих цін первинних енергоресурсів постає необхідність більш ефективного та раціонального енергоспоживання без погіршення якісних і кількісних показників кінцевої продукції. Енергетика України в сучасних реаліях потребує сучасних енергоефективних рішень, які б забезпечили додаткове резервування, автономність та зниження енергоспоживання.

Формулювання мети. Метою роботи є розробка обґрунтованих рекомендацій щодо використання надлишкової теплоти від вентиляції підземних споруд метрополітенів в холодний період року, яка має достатній потенціал для утилізації за допомогою теплових насосів на потреби опалення та гарячого водопостачання об'єктів.

Основна частина. Тематика використання теплових насосів в поєднанні з системами метрополітенів не нова. Впровадження дослідної теплонасосної установки для однієї з станцій Київського метрополітену описано в роботі співробітників інституту технічної теплофізики НАН України під керівництвом доктора технічних наук Зіміна Л.Б. [1]. Проведені ними дослідження в 2000 році на ст. Майдан Незалежності показали, що температура повітряних потоків тунельної вентиляції в холодний період року знаходиться в межах 12 °С–16 °С. При цьому теоретичний максимальний тепловий потенціал перевищує 600 кВт.

Глазгоський Каледонійський університет (Glasgow Caledonian University) у співпраці з іншими європейськими університетами у квітні 2014 року розпочали дослідження у метрополітені м. Глазго (Шотландія) [2], метою якого було визначення можливості використання в якості джерела тепла стічних підземних вод, які зазвичай просто скидаються в каналізацію. На основі вимірювань протягом 15 місяців потоків і температури стічних вод науковцями було розроблено техніко-економічне обґрунтування, яке показало ймовірність використання цієї води в якості низькопотенційного джерела теплонасосних систем для заміни старої електричної системи опалення. Інформація стосовно роботи водяної теплонасосної установки, встановленої в метро Глазго, була вперше представлена в 2018 році на конференції у Канаді [3]. В 2019 році опубліковано дані щодо енергетичного

потенціалу стічних підземних вод метрополітенів інших європейських міст (табл. 1) [4].

Таблиця 1 – Енергетичний потенціал стічних вод в метрополітенах Європи

Міста з метрополітенами	Населення (тис.)	Масова витрата стічних вод (м³ /день)	Енергетичний потенціал (МВт)	Довжина ліній, км	Кількість станцій
Афіни	3750	281604	68	84,5	94
Берлін	3388	1 198585	290	151,7	173
Брюссель	1000	353774	86	39,9	59
Будапешт	1696	600000	145	38,6	52
Глазго	600	1730	0,75	10,5	15
Лісабон	529	187146	45	26,8	55
Лондон	8540	2 628184	635	400	270
Мадрид	3100	1 096698	265	293	301
Париж	2181	77158	187	197	303
Прага	1171	414269	100	65,2	61
Рим	2554	903538	218	60	37
Софія	1246	44802	107	40	35
Стокгольм	762	269576	65	108	100
Відень	1599	565684	137	78,5	104
Варшава	1693	598939	145	29	58

На основі граничних норм температури та швидкості руху повітря в шахтах метрополітену [5], а також за технічними і режимними характеристиками роботи вентустановки [6], мною проведені розрахунки і визначено, що за найменш сприятливих розрахункових умов при використанні теплового насосу теоретичний тепловий потенціал вентиляційної шахти ст. Політехнічна складає 250 кВт. В якості теплового споживача розглянуто адміністративну будівлю Київського метрополітену, що знаходиться над станцією Політехнічна. Розрахунки по даному об'єкту показали максимальне розрахункове теплове навантаження на опалення, вентиляцію та гаряче водоспоживання 406 кВт. Для розрахунку обрана схема з проміжним теплоносієм (45 % водний розчин пропіленгліколю з температурою кристалізації мінус –30 °С). В якості холодоагенту обрано фреон R32. Проведено тепловий розрахунок не стандартного кожухотрубного теплообмінника з боку вентшахти, розраховано і підібрано випарники на базі розбірного пластинчастого теплообмінника фірми THERMAKS PTA (GC)-60, спіральні компресори та конденсатори виробництва BITZER. При температурі кипіння фреону у випарнику близько 0 °С та температурі конденсації в конденсаторі 60 °С обрана схема з 4-х паралельно працюючих компресорів має коефіцієнт перетворення електричної енергії в теплову COP = 1,92, що забезпечить теплову потужність у конденсаторі близько 485 кВт. При наявній схемі електроопалення потужністю 410 кВт розрахована теплонасосна схема здатна забезпечити роботу в бівалентному альтернативному режимі (повне покриття теплового споживання як за рахунок теплового насосу, так і за рахунок електроопалення).

Висновки. На основі викладеної інформації встановлено, що надлишкова теплота вентиляційного повітря та стічних вод підземних споруд метрополітенів, яка піддається дисипації в навколишнє середовище, може бути ефективно використана і за допомогою теплових насосів «перекачана» на забезпечення потреб в опаленні та гарячому водопостачанні поруч розташованих об'єктів. Для споживачів, які отримують теплову енергію за рахунок електродвигунів, перехід на використання теплових насосів є одним з найбільш ефективних методів зниження енерговитрат.

Перелік посилань:

1. Дослідна установка для утилізації низькопотенційного тепла вентиляційних викидів метрополітенів / Зимін Л. Б. // Промислова теплотехніка. – 2001. – Т. 23, № 1-2. – С. 92–95.
2. Hytiris N, Ninikas K, Aaen B, Emmanuel R. Review of Sustainable Heat in the Glasgow Subway Tunnels. Civil Eng Res J. 2020; 11(1): 555805. URL: <http://dx.doi.org/10.19080/CERJ.2020.11.555805>
3. Nicholas Hytiris, Konstantinos Ninikas, Bjorn Aaen. Енергоефективність системи опалення через управління стічними водами. У матеріалах 2-ї міжнародної конференції останніх тенденцій у науці про навколишнє середовище та інженерії (RTESE'18), Ніагарський водоспад, Онтаріо, Канада, 10–12 червня 2018 р. URL: <http://dx.doi.org/10.11159/rtese18.112>
4. Ninikas K, Hytiris N, Emmanuel R, Aaen B (2019) Recovery and valorisation of energy from wastewater using a water source heat pump at the Glasgow Subway. Potentials for similar Underground environments. Resources Journal (MDPI).URL: <https://doi.org/10.3390/resources8040169>
5. ДБН В.2.3-7:2018 Метрополітени
6. URL: <https://zitron.com/ua/projects/київський-метрополітен/>.

¹ Аспірант 2 курсу Шахбазов І.О.¹ Доц., к.т.н. Сірий О.А.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=FmKF8DsAAAAJ&hl=uk>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОФАКЕЛЬНОГО СПАЛЮВАННЯ ВОДНЕВМІСНИХ ГАЗІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Поступовий перехід до нових і більш стійких джерел енергії для спалювання здійснюється шляхом досягнення двох основних цілей: 1) раціональне та ефективніше використання доступних ресурсів таким чином, щоб зменшити енергетичні витрати та викиди CO_2 , і 2) систематичний контроль викидів забруднюючих речовин, які утворюються як побічні продукти процесів згоряння. У цьому контексті значно зріс науковий інтерес до аміаку (NH_3) в останні роки. Відносно висока щільність енергії, легкість транспортування та безвуглецевий характер аміаку роблять його привабливим джерелом енергії. Враховуючи те, що виробництво аміаку залежить від усталених технологій виробництва, а також від ряду нових методів синтезу [1], NH_3 було запропоновано як «базову молекулу» для накопичення енергії з мінливих відновлюваних джерел (вітрова чи сонячна електростанція) і для послідовного вивільнення енергії через безпосереднє пряме спалювання або з попереднім перетворенням на водень [2].

Аналіз останніх досліджень. Конкурентоспроможність аміаку як носія енергії для її накопичення та вивільнення у разі потреби було оцінено в кількох роботах [3, 4]. Крім того, його актуальність у сценарії розвитку енергії наступного покоління також пов'язана з його присутністю (у залишкових кількостях) у біопаливі: справді, аміак міститься в біогазі як побічний продукт анаеробного зброджування [5]. Крім того, багаті білком шлами, які використовуються як сировина для біомасел, також містять NH_3 , а також інші азотовмісні речовини [6].

За останні роки було розроблено декілька механізмів $\text{NH}_3\text{--NO}_x$, кожен з яких має різні умови. Mathieu та Petersen [7] розширили роботу Dagaut et al. [8] щодо хімії HCN, щоб змоделювати час затримки високотемпературного займання NH_3 , зібраного в розбавлених умовах при різних тисках і співвідношеннях паливо-окисник. Xiao та Valera-Medina [9] провели порівняльне дослідження ефективності 12 різних кінетичних механізмів $\text{NH}_3\text{--NO}_x$, щоб визначити найкращу модель. Вони використовували дані про швидкість ламінарного полум'я NH_3/H_2 з [10] і дані про час затримки займання NH_3 з Mathieu і Petersen [7], щоб оцінити прогнози моделей. Більшість кінетичних моделей не можуть відтворити експериментальні дані для досліджуваного діапазону еквівалентних співвідношень. Nan та ін. [11] провели експериментальне та кінетичне моделювання швидкості ламінарного полум'я для NH_3 /повітря та різних сумішей $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{CO}/\text{CH}_4$ з повітрям. Три досліджувані механізми з літератури не можуть точно передбачити швидкість ламінарного горіння.

Загалом, розбіжності між прогнозами кінетичних моделей цілком очевидні, оскільки експериментальна база даних для окислення аміаку ще недостатньо широка.

Формулювання мети. У представленій роботі досліджується процес горіння газоподібного аміаку в прямооточному пальнику за допомогою математичного моделювання з метою передбачення можливості використання аміаку як безвуглецевого водневмісного палива.

Основна частина. Процес сумішоутворення і гідродинаміки газоподібного аміаку і повітря досліджувалися в пальниковому пристрої циліндричної форми, в центрі якого розташовано круглий колектор подачі палива з отворами на бічній стінці. Загальна довжина каналу складає 0,75 м. Для подачі палива передбачено 8 отворів діаметром 2 мм.

Для апроксимації розрахункової області застосовувалася неструктурована скінченно-елементна сітка (тип скінченного елемента – тетраедр, див. рис. 1). Передбачається сталість профілю швидкості повітря на вході в канал і газоподібного аміаку в газоподавальних отворах. Сталість інтенсивності турбулентності на вхідній ділянці каналу. В загальному постановка задачі виконана у тривимірному просторі за стаціонарних умов проходження процесу.

Задача розв'язувалася чисельно за допомогою CFD моделювання. Модель горіння описано переносом речовин з підключенням об'ємних реакцій. Припускається, що швидкість реакції обмежується турбулентним змішуванням. Моделювання виконано на основі рівнянь Нав'є-Стокса усереднених за Рейнольдсом з моделлю турбулентності k-ε realizable, яка модифікована покращеною обробкою стінкових границь розрахункової області для врахування теплового ефекту. Розв'язувач на основі тиску використовувався зі схемою інтерполяції Coupled для зв'язаного алгоритму швидкість–тиск і просторовою дискретизацією другого порядку.

На вході в розрахункову область задаються масова витрата (Massflow inlet) і температура палива і окисника, на виході – статичний тиск (Pressure outlet). Значення параметрів реагуючих потоків представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Граничні умови моделювання спалювання аміаку і метану

Параметр	Позначення	Розмірність	Аміак (NH ₃)	Метан (CH ₄)
Теплова потужність	Q	кВт	29,8	30
Витрата газу	G _г	м ³ /год	8,35	3,27
Температура газу	t _г	°C	20	20
Коефіцієнт надлишку повітря	α	-	1,5	1,5
Витрата повітря	G _{пов}	м ³ /год	44,09	46,84
Температура повітря	t _{пов}	°C	20	20

Для прогнозування утворення оксидів азоту (NO_x) використовувалася стандартна методика програми Ansys-Fluent. А саме, у випадку спалювання метану розраховувалася генерація теплових і швидких NO_x, тоді як у випадку спалювання аміаку на додаток до перелічених розраховувалася генерація паливних NO_x. Прогнозування концентрації радикалів O і OH виконується за рахунок часткової рівноваги.

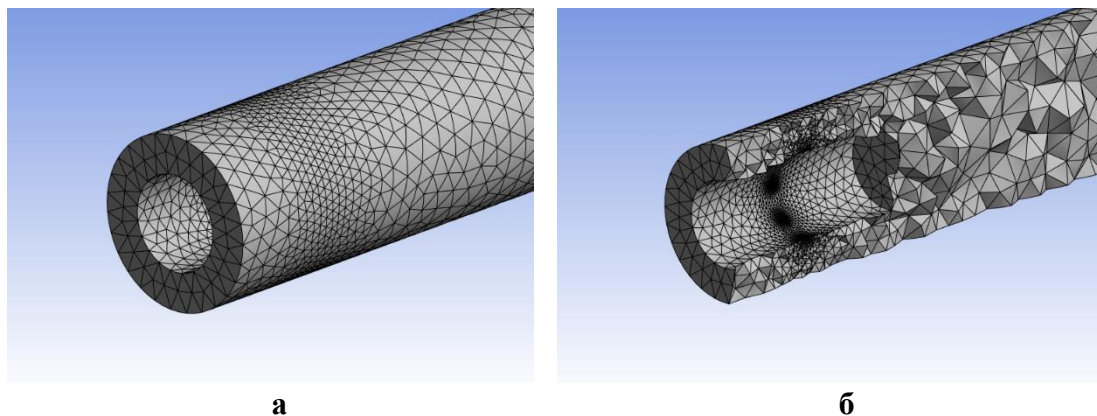


Рисунок 1 – Прямоточний пальник: скінченно-елементна сітка в загальному (а) та у розрізі (б)

Трубка подачі палива діаметром 20 мм, яка розташована всередині труби діаметром 36 мм, відіграє роль циліндричного стабілізатора полум'я. Введення газоподібного палива перпендикулярно у потік окисника з подальшим сумішоутворенням реалізується аналогічно принципу струменево-нішевої технології [12].

Як відомо, інтегральною характеристикою розподілу температури у поперечних перерізах каналу слугує коефіцієнт відносної нерівномірності поля температур, що розраховується за формулою:

$$\gamma = \frac{T_{\text{макс}} - T_{\text{сер}}}{T_{\text{сер}} - T_{\text{вх}}}, \quad (1)$$

де $T_{\text{макс}}$ – максимальна температура газу;

$T_{\text{сер}}$ – середня температура газу;

$T_{\text{вх}}$ – температура газу на вході.

Керуючись рівнянням (1), одержано величини відносної нерівномірності поля температур в поперечних перерізах каналу по довжині факелу для двох досліджуваних випадків (рис. 2).

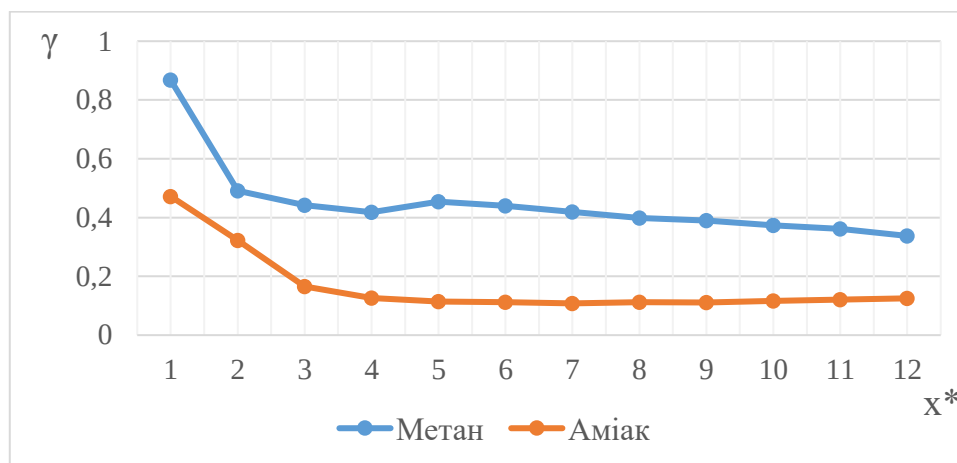


Рисунок 2 – Відносна нерівномірність поля температур в поперечних перерізах каналу по довжині факелу
(x^* – відносна координата вздовж осі каналу; $1 x^* = 20$ мм)

Згідно з одержаними даними, нерівномірність розподілу температури різко знижується за зривною кромкою стабілізатора в обох випадках. Однак далі має місце відмінність між метаном та аміаком: у першому випадку нерівномірність розподілу температури на рівні 0,4 і продовжує знижуватись; у другому випадку – на рівні 0,11 і залишається практично незмінним.

Методика прогнозування NOx, що надається програмою Ansys-Fluent, дозволяє оцінити рівень емісій оксидів азоту для обох випадків. Зокрема у випадку спалювання аміаку концентрація NOx практично на два порядки більша ніж у метану. Це пояснюється вмістом азоту у складі аміаку, що вступає в хімічну реакцію і за тепловим та паливним механізмом утворює оксиди азоту.

Висновки. Відродження інтересу до спалювання NH_3 в останні роки дозволяє поповнити кількість експериментальних даних, що характеризують його реакційну здатність у широкому діапазоні робочих умов. Тим не менш, всебічне розуміння його кінетичної поведінки все ще є відкритим викликом, особливо при низьких температурах ($T < 1200$ K) і в розбавлених умовах, на які наукова спільнота приділяє значні зусилля через потенційно менші викиди NOx.

Горіння газоподібного аміаку та метану було досліджено шляхом чисельного моделювання, зосередженого на зоні реакції, полях потоку та викидів. Основні висновки наступні: стаціонарні підходи моделювання придатні лише для характеристики глобального хімічного перетворення; витрата аміаку більша за витрату метану для досягнення тієї ж теплоти; показник емісії NO_x значний у випадку горіння NH₃ на противагу CH₄.

Таким чином, для дослідження процесів запалювання або перехідних режимів горіння потрібно застосовувати нестационарну постановку. Внаслідок меншої теплотворності аміаку, його витрата більша у 2,67 разів для досягнення теплової потужності 30 кВт порівняно з метаном. Високий рівень NO_x пропонується придушувати тим же аміаком, що використовується в якості палива.

Перелік посилань:

1. Science and technology of ammonia combustion / H. Kobayashi та ін. Proceedings of the Combustion Institute. 2019. Т. 37, № 1. С. 109–133. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>.
2. Jiao F., Xu B. Electrochemical Ammonia Synthesis and Ammonia Fuel Cells. Advanced Materials. 2018. Т. 31, № 31. С. 1805173. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.201805173>.
3. Miura D., Tezuka T. A comparative study of ammonia energy systems as a future energy carrier, with particular reference to vehicle use in Japan. Energy. 2014. Т. 68. С. 428–436. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.108>.
4. Power-to-ammonia in future North European 100 % renewable power and heat system / J. Ikäheimo та ін. International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Т. 43, № 36. С. 17295–17308. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.121>.
5. Strik D.P.B.T.B., Domnanovich A.M., Holubar P.A pH-based control of ammonia in biogas during anaerobic digestion of artificial pig manure and maize silage. Process Biochemistry. 2006. Т. 41, № 6. С. 1235–1238. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.12.008>.
6. Bio-oil production from dry sewage sludge by fast pyrolysis in an electrically-heated fluidized bed reactor / Arazo R.O. та ін. Sustainable Environment Research. 2017. Т. 27, № 1. С. 7–14. URL: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.11.010>.
7. Mathieu O., Petersen E.L. Experimental and modeling study on the high-temperature oxidation of Ammonia and related NO_x chemistry. Combustion and Flame. 2015. Т. 162, № 3. С. 554–570. URL: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.08.022>.
8. DAGAUT P., GLARBORG P., ALZUETA M. The oxidation of hydrogen cyanide and related chemistry. Progress in Energy and Combustion Science. 2008. Т. 34, № 1. С. 1–46. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.004>.
9. Xiao H., Valera-Medina A. Chemical Kinetic Mechanism Study on Premixed Combustion of Ammonia/Hydrogen Fuels for Gas Turbine Use. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2017. Т. 139, № 8. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4035911>.
10. Study on using hydrogen and ammonia as fuels: Combustion characteristics and NO_x formation / J. Li та ін. International Journal of Energy Research. 2014. Т. 38, № 9. С. 1214–1223. URL: <https://doi.org/10.1002/er.3141>.
11. Experimental and kinetic modeling study of laminar burning velocities of NH₃/air, NH₃/H₂/air, NH₃/CO/air and NH₃/CH₄/air premixed flames / X. Han та ін. Combustion and Flame. 2019. Т. 206. С. 214–226. URL: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.05.003>.
12. Abdulin M.Z., Siryi O.A., Kobylianska O.O. Energy-ecological assessment of the boiler equipment modernized with the jet-niche technology. Journal of Mechanical Engineering. 2022. Т. 25, № 3. С. 46–55. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.046>.

¹ Аспірант 3 курсу Дульський А.І.

¹ Доц., к.т.н. Сірий О.А.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МІКРОДИFUЗІЙНОГО ГОРІННЯ ГАЗОПОДІБНИХ ПАЛИВ У СТРУМЕНЕВО-НІШЕВОМУ СТАБІЛІЗАТОРІ ПОЛУМ'Я

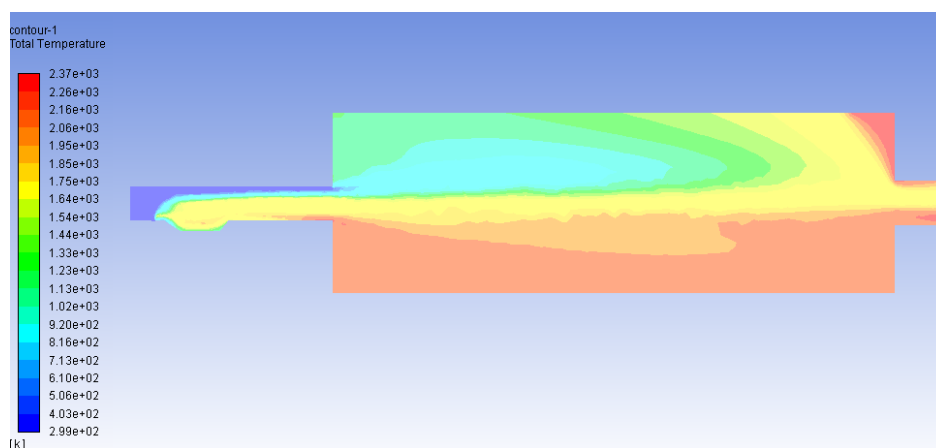
Постановка проблеми. Надмірне використання традиційних палив та зростання викидів парникових газів стимулюють пошук альтернативних джерел енергії. Біогаз, який виробляється з органічних відходів, є перспективним рішенням, оскільки поєднує виробництво енергії з ефективним управлінням відходами. Він складається переважно з метану (CH_4) та діоксиду вуглецю (CO_2) і може використовуватися для виробництва електроенергії, тепла або як паливо. Україна має значний потенціал для розвитку біогазових технологій завдяки великій кількості сільськогосподарських відходів.

Аналіз досліджень. У Європі біогаз активно інтегрується в енергетичні системи, демонструючи високий потенціал. Наприклад, Німеччина щорічно виробляє близько 42 ТВт-год енергії з біогазу, а Швеція використовує його як екологічне паливо для транспорту. Склад біогазу залежить від методу бродіння, тривалості перебування в бродильнику та типу використовуваної біомаси. Вміст метану (CH_4) у біогазі може коливатися від 45 % (приблизно 55 % CO_2) до 80 % (приблизно 20 % CO_2), а решта – це незначна кількість інших газів, таких як сірководень (H_2S), аміак (NH_3) та водень (H_2), які разом складають до 3 %. Проте типовий склад біогазу включає до 70 % метану та близько 40 % діоксиду вуглецю (CO_2) за об'ємом. Високий вміст CO_2 впливає на теплотворну здатність та швидкість горіння, а також знижує температуру згоряння, що сприяє зменшенню викидів NO_x . Порівняно з іншими альтернативними паливами, біогаз має відносно високу теплоту згорання, яка може досягати 25 МДж/м³.

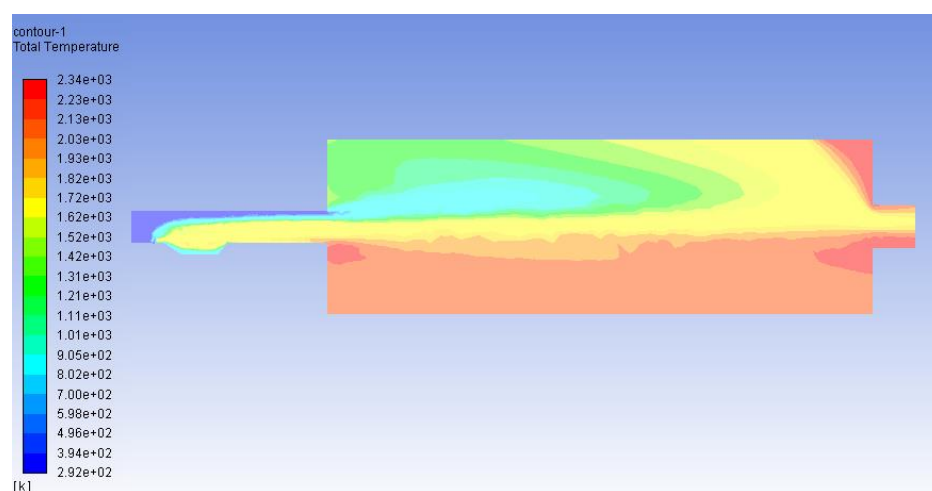
Мета роботи. Дослідження спрямоване на імітацію процесів горіння сумішей метану та біогазу в струменево-нішевій системі (СНС) за допомогою CFD-моделювання. Мета – визначити оптимальні геометричні та режимні параметри для ефективного горіння та зниження емісій. Результати допоможуть підготувати експериментальні дослідження на лабораторному стенді.

Основна частина У дослідженні [1] проаналізовано вплив складу паливної суміші на процес горіння в струменево-нішевій системі (СНС). Спочатку проведено чисельне моделювання для чистого метану (CH_4), а потім для сумішей, де до метану додавався діоксид вуглецю (CO_2) у різних пропорціях: 10 %, 20 % та 30 %. При цьому вміст метану залишався незмінним. Суміш із 30 % CO_2 можна вважати аналогом біогазу. На рис. 1 показано розподіл температур в СНС для різного вмісту діоксиду вуглецю в суміші з метаном і для чистого метану. Коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,1$.

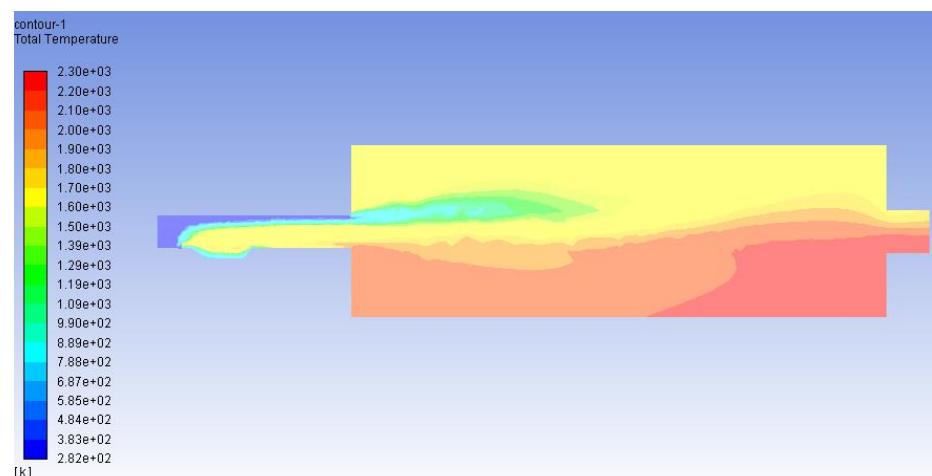
CO_2 розбавляє паливно-повітряну суміш, знижуючи максимальну температуру в гарячих зонах, але підвищує її в холодніших ділянках. Це також збільшує щільність палива та зменшує довжину факелу. Горіння завжди починається в нішевій порожнині, що забезпечує стабільність факелу. Струменевий «екран» палива додатково стабілізує процес. Однак додавання CO_2 зміщує зону горіння над нішу. При вмісті CO_2 30% сумішоутворення погіршується, горіння стає нестабільним, і можливе затухання. Без зміни геометрії пальника стабільне спалювання неможливе. Подальше збільшення вмісту CO_2 посилює ці проблеми.



а



б



в

Рисунок 1 – Порівняння температурного поля продуктів згоряння у вертикальному осьовому перетині, для співвідношення компонентів за об'ємом метан/CO₂:
а) 100 / 0 %, б) 90 %/ 10 %, в) 80 %/ 20 %

Згідно [2], додавання CO₂ до метану знижує пікові концентрації атомів О та радикалів ОН через зменшення максимальної температури горіння, що сприяє зниженню викидів NO_x що підтверджується результатами розрахунків. При 10 % CO₂ викиди NO_x знизилися на 26 %, а при 20 % – на 34 %. Подальше збільшення вмісту CO₂ продовжує знижувати NO_x, але менш інтенсивно.

Для спалювання чистого біогазу з тепловою потужністю, близькою до природного газу, необхідно збільшити масову витрату біогазу. Це вимагає зміни геометрії газового колектору пальника, щоб уникнути порушення співвідношення газ-повітря та зриву факела. Оптимальне відношення кроку до діаметру отворів (S/d) для стабільного горіння становить 3,0–4,0. Найкращий результат показав варіант $S/d = 3,2$ при $d = 4,0$, який забезпечує стабільне горіння та потужність. Навіть при однаковій витраті CH_4 , пікова температура горіння біогазу нижча на ~ 120 °C порівняно з природним газом, але середній розподіл температур залишається близьким. Викиди NO_x знижуються на ~ 40 % (до 74 ppm).

Висновок. Біогаз є перспективним паливом, здатним замінити природний газ, але вимагає модифікації пальникового пристрою через нижчу теплотворну здатність та схильність до зриву полум'я. Використання струменево-нішевої системи (CHS) розглядається перспективним з точки зору вирішення проблеми стабілізації факелу, яка виникає внаслідок того що у біогазу нижча максимальна нормальна швидкість поширення полум'я – 15–25 см/с – у порівнянні з 38 см/с при горінні природного газу.

Перелік посилань:

1. Дульський А.І.; Сірий О.А. CFD-моделювання процесу спалювання суміші метан-біогаз в струменево-нішевому стабілізаторі полум'я. *Вчені записки*, 2024, 6. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/02>
2. Jahangirian S., Engeda A., Wichman I.S. Thermal and Chemical Structure of Biogas Counterflow Diffusion Flames // *Energy and Fuels*. – 2009. – Vol. 23. – P. 5312–5321.

¹ Бакалаврант 3 курсу Ментій М.О.

¹ Проф., д.т.н. Черноусенко О.Ю.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=m7CSuP0AAAAAJ&hl=ru>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВАЛА РОТОРА ЦИЛІНДРА НИЗЬКОГО ТИСКУ ТУРБІНИ К-800-240

Постановка проблеми та її актуальність

Побудова геометричної моделі вала ротора циліндра низького тиску (ЦНТ) турбіни К-800-240 є важливим етапом у процесі аналізу та оптимізації конструкції паротурбінного обладнання. Враховуючи довготривалу експлуатацію турбін великої потужності та необхідність продовження їхнього ресурсу, точне відтворення геометрії є ключовим для подальших досліджень [1].

Аналіз останніх досліджень

Для моделювання використовується програмне забезпечення для тривимірного проектування, таке як SOLIDWORKS. Процес починається з аналізу конструкторської документації та експлуатаційних даних, що дозволяє створити 3D-модель, яка максимально відповідає реальній конструкції. Особлива увага приділяється точності відтворення геометрії критичних зон, зокрема посадкових поверхонь.

Формулювання мети

При створенні геометричної моделі (рис. 1) необхідно враховувати як первинні конструктивні параметри, так і можливі деформації, що виникають у процесі тривалої експлуатації. Для цього використовується методика побудови параметричних моделей, що дозволяє змінювати окремі геометричні характеристики без необхідності повного перероблення моделі. Крім того, застосовується метод спрощення складних елементів (рис. 2) без втрати їхніх ключових механічних властивостей, що дозволяє зменшити обчислювальні витрати у подальших дослідженнях.

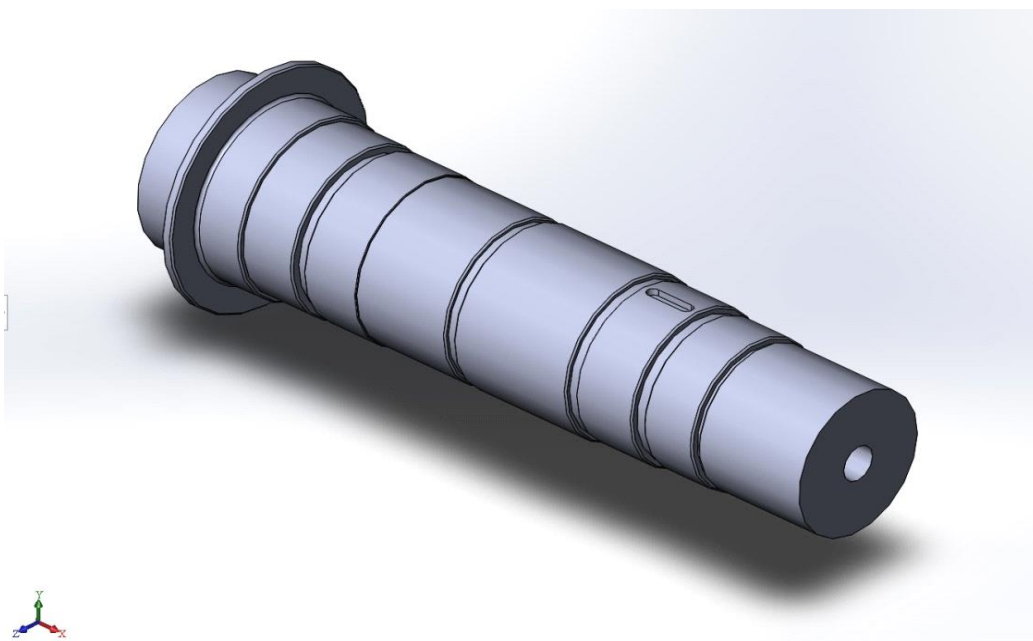


Рисунок 1 – Геометрична модель вала ротора ЦНТ турбіни К-800-240

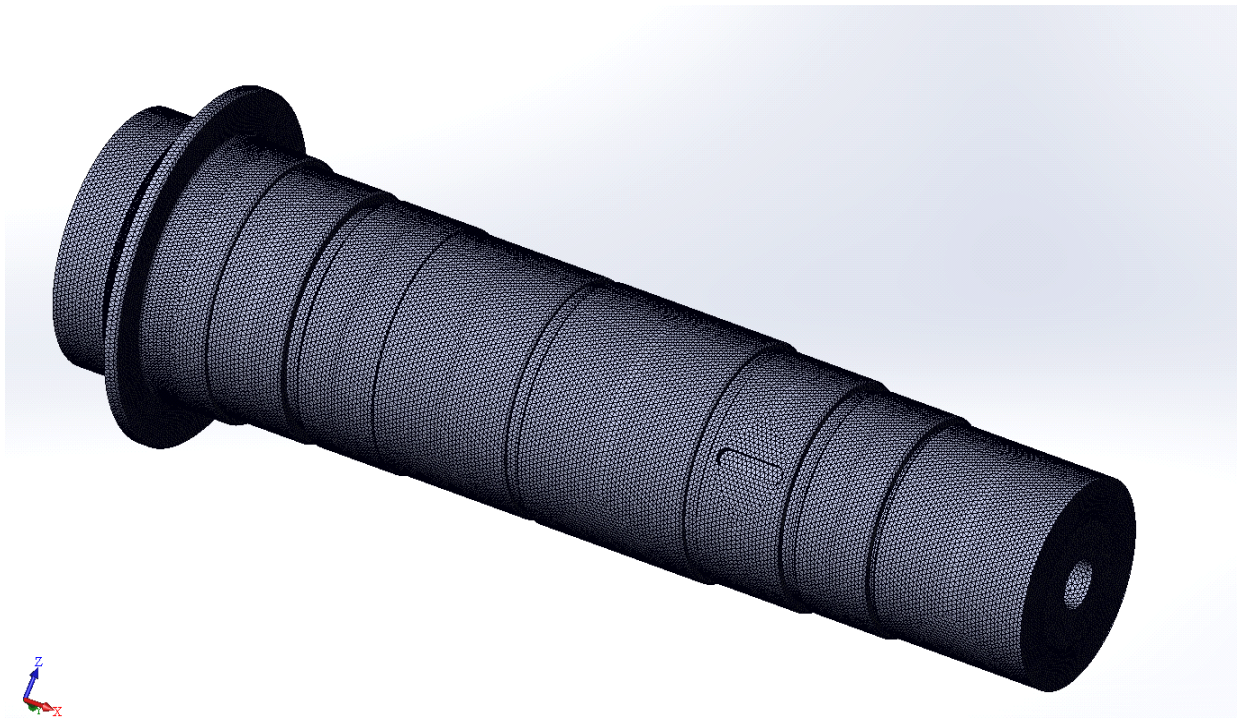


Рисунок 2 – Скінченно-елементна модель вала ротора ЦНТ турбіни К-800-240

Основна частина

У процесі побудови геометричної моделі особлива увага приділялася правильному відтворенню валової частини ротора з урахуванням її реальних конструктивних особливостей. Було змодельовано ділянки з переходами діаметрів, фасками, шпоночними та різьбовими з'єднаннями, які мають важливе значення при подальшому проведенні міцнісних та динамічних розрахунків. Застосування параметричного підходу дозволило адаптувати модель до різних варіантів конфігурації, що є особливо корисним при аналізі впливу ремонтних втручань або зміни експлуатаційних умов.

Додатково було виконано попередню дискретизацію моделі з метою підготовки її до скінченно-елементного аналізу. Для цього проведено сіткову оптимізацію з урахуванням особливо навантажених зон, що дозволяє у подальшому отримати коректні результати при розрахунках напружено-деформованого стану. Врахування реальних геометричних особливостей ротора підвищує точність моделювання та дозволяє ефективно поєднувати геометричний і силовий аналіз у рамках єдиної цифрової платформи.

Висновки

Таким чином, геометричне моделювання вала ротора ЦНТ турбіни К-800-240 є важливим інструментом для аналізу та оптимізації конструкції. Отримана цифрова модель може використовуватися для подальших розрахунків і досліджень, спрямованих на підвищення надійності та ефективності роботи турбіни. Точне відтворення геометрії дозволяє зменшити похибки у прогнозуванні поведінки конструктивних елементів і є основою для прийняття рішень щодо їх модернізації або ремонту.

Перелік посилань:

1. Черноусенко О.Ю., Риндюк Д.В., Пешко В.А. Оцінка залишкового ресурсу та продовження експлуатації парових турбін великої потужності (ЧАСТИНА 3). – 247–259 с.

¹ Бакалаврант 3 курсу Мягкий Р.А.

¹ Проф., д.т.н. Черноусенко О.Ю.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=m7CSuP0AAAAJ&hl=ru>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПОБУДОВА ЧИСЛОВОЇ МОДЕЛІ РОТОРА СЕРЕДНЬОГО ТИСКУ ТУРБІНИ К-800-240

Постановка проблеми та її актуальність. Ротори відчують цілий ряд значних статичних і динамічних навантажень, які можуть викликати не тільки полом окремих вузлів машини, а навіть до аварії. Вихід із ладу, може негативно позначитися як на чистоті навколишнього середовища, так і на безпеці життєдіяльності людей [1]. Тому важливим є дослідження установок, що відпрацювали свій ресурс, для прогнозування залишкового ресурсу та продовження їх строку експлуатації.

Аналіз останніх досліджень. Для побудови моделі ротора середнього тиску використовуємо один із найвідоміших програмних комплексів Ansys, беручи до уваги технологічні вибірки матеріалу частин обладнання, котрі виникли в процесі механічної обробки тріщин, тріщиноутворень та заглиблень на поверхні ротора [2]. На вибір саме цього програмного комплексу повпливали його переваги, що дозволяють вирішувати широкий спектр інженерних задач механіки твердого тіла, яке деформується, механіки конструкцій, механіки рідини і газу, теплообміну і теплопередачі, динаміки, механіки зв'язаних полів. Також використовується для проведення математичного моделювання і обчислювального експерименту на основі принципово нових математичних моделей та містить ефективні чисельні методи реалізації таких моделей [1].

Виробничі зразки матеріалу складових частин обладнання одержані на основі тестових результатів візуального контролю і магнітопорошкової діагностики. Йдеться про відомості компаній і лабораторій металів електростанцій. За термін функціонування здійснювалися реконструктивні дії для адаптації проектної структури основних високотемпературних компонентів турбіни. Наслідок цих дій не є щоразу спрямований для зниження довговічності обладнання. Адже в цілях продовження запасу ресурсу, проводять проточку кановок задля ліквідації тріщин, мікротріщин і дефектів, що разом із їх розширенням приводить до зниження навантажень та деформацій техніки.

Формулювання мети. Метою є дослідження теплового і напружено-деформованого стану ротора середнього тиску турбіни К-800-240, реалізувати в 3D конфігурації з врахуванням проектних характеристик.

Основна частина. Під час моделювання реалізовано створення кованих площин ротора. Воно містить радіусні сполучення дисків ступенів, з'єднання робочих лопаток та контури кінцевих діафрагмових ущільнених елементів. Змодельований ротор середнього тиску представлений на рис. 1 та рис. 2 [2].

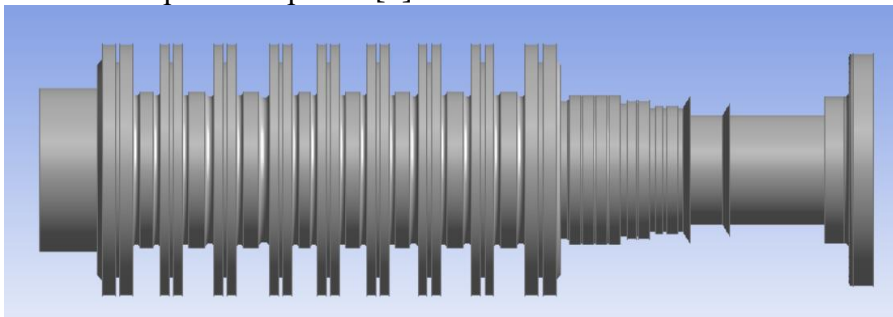


Рисунок 1 – Модель ротора середнього тиску турбіни К-800-240

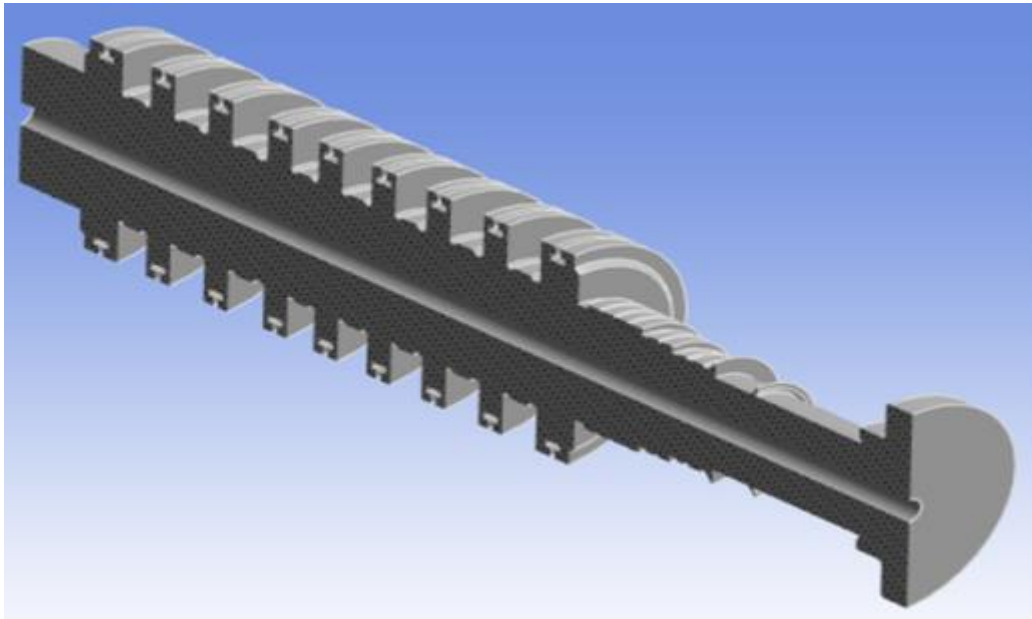


Рисунок 2 – Модель ротора середнього тиску турбіни K-800-240

Висновки. Розрахункове дослідження проводиться для найбільш навантажених ділянок ротора у відповідних зонах проточних частин турбоустановки. Модель ротора і програма розрахунків в тривимірній постановці (рис. 3) дозволили виконати розбивку сітки на 5,5 мільйонів скінченних елементів зі згущенням сітки в зонах, що є концентраторами напружень. До цих зон належать прилеглі до дисків кільцеві канавки та теплові канавки ущільнень.

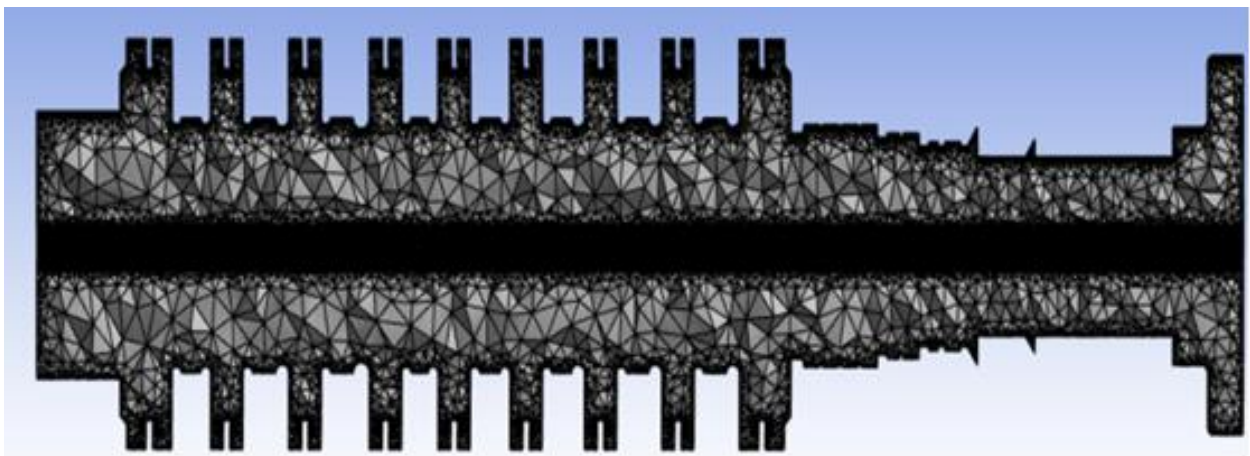


Рисунок 3 – Скінченно-елементна модель ротора середнього тиску турбіни K-800-240

Перілік посилань:

1. Загорулько А.В Програмний комплекс ANSYS в інженерних задачах. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 201 с.
2. Оцінка залишкового ресурсу в подовження експлуатації парових турбін великої потужності (частина 3) Монографія для науковців та докторів філософії за спеціальністю 144 Теплоенергетика / О.Ю.Черноусенко, Д.В. Риндюк, В.А. Пешко. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2020. – 308 с.

¹ Бакалаврант 3 курсу Ракута І.О.

¹ Асист., к.т.н. Власенко О.В.

<https://scholar.google.com/citations?user=-Ih8IfYAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АНАЛІЗ ВАЛОВИХ ВИКИДІВ В АТМОСФЕРУ ПРИ РОБОТІ ПАРОВОГО КОТЛА НА БІОГАЗІ

Постановка проблеми та її актуальність

У зв'язку з глобальними змінами клімату та необхідністю переходу на відновлювані джерела енергії, використання біогазу як альтернативного палива набуває все більшого значення. Біогаз, будучи відновлювальним джерелом енергії, може допомогти скоротити викиди парникових газів, зменшити залежність від викопних джерел енергії та знизити техногенний вплив на навколишнє середовище. Однак, при спалюванні біогазу, зокрема в парових котлах, виникають значні викиди забруднюючих речовин, таких як оксиди азоту (NO_x), оксид вуглецю (CO), діоксид вуглецю (CO_2), метан (CH_4) та оксид азоту (N_2O). Тому актуальним є дослідження впливу біогазу на атмосферні викиди при його використанні в енергетичних установках, зокрема в парових котлах, а також пошук способів зменшення цих викидів для покращення екологічної ситуації.

Аналіз останніх досліджень

У останні роки спостерігається значний прогрес у дослідженні використання біогазу як джерела енергії та його впливу на навколишнє середовище. Основні напрямки наукових досліджень зосереджуються на таких аспектах, як зменшення викидів парникових газів, поліпшення ефективності використання біогазу та очищення цього палива для зменшення негативного впливу на атмосферу.

Формулювання мети

Метою роботи є визначення валових викидів основних забруднюючих речовин (оксиди азоту, оксид вуглецю, діоксид вуглецю, метан, оксид азоту) при спалюванні біогазу.

Основна частина

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 виробленої 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 % [1].

Сучасні енергетичні потреби забезпечуються в основному за рахунок трьох видів енергоресурсів: органічного палива, води та атомного ядра. Енергія води та атомна енергія використовуються людиною після перетворення її на електричну енергію. В той же час значна кількість енергії, поміщеної в органічне паливо, використовується у вигляді теплової і тільки частина її перетворюється на електричну. Проте і в тому, і в іншому випадку вивільнення енергії з органічного палива пов'язане з його спалюванням, а отже, і з потраплянням продуктів горіння в довкілля [2].

Біогаз відіграватиме ключову роль у досягненні довгострокових цілей Європи щодо енергетичної безпеки та пом'якшення наслідків зміни клімату в рамках перспективного та

збалансованого комплексу відновлюваних джерел енергії. Крім того, їх користь виходить далеко за рамки скорочення викидів парникових газів

Біогаз є найдешевшим і найбільш масштабним видом відновлюваного газу, доступним сьогодні. Вони є носіями енергії, які можна диспетчеризувати, і як такі можуть використовуватися для балансування періодичного виробництва відновлюваної енергії. Крім того, біометан (покрашений біогаз) може безпосередньо замінити природний газ і його можна зберігати та розгортати у всій енергетичній системі, використовуючи існуючу газову інфраструктуру та технології кінцевого використання.

Крім того, біогаз має високі можливості для забезпечення значних довгострокових соціально-економічних переваг, таким чином підтримуючи перехід до більш стійкої економіки замкнутого циклу [3–4].

До основних компонентів біогазу відносяться CH_4 та CO_2 , співвідношення яких залежить від вихідного субстрату і характеристик процесу бродіння (температури, часу перебування місив реакторі, загрузки робочого середовища). Поряд з цими важливими компонентами біогаз вміщує в собі незначні кількості H_2 та H_2S , а також N_2 [5].

Використання біогазу має переваги не тільки в економії шляхом заміщення природного газу, але і як метод покращення екологічної обстановки, що зменшить техногенне навантаження на навколишнє середовище і зменшує залежність від імпортного газу [5].

Традиційно біогаз використовувався як паливо для котлів під час виробництва теплоти або для когенерації теплоти та електроенергії на комбінованій теплоелектростанції (ТЕС) [6].

Згідно з такими ініціативами, як Паризька кліматична угода, енергія з біомаси як для промисловості, так і для постачальників електроенергії є надійним і стійким джерелом базового навантаження. Це також допомагає досягти екологічних цілей, поглинаючи більше CO_2 , ніж викидає, а ефективне обладнання, що використовується для виробництва електроенергії, призводить до менших викидів на заводі [6].

В роботі досліджено особливості валових викидів в атмосферу при роботі парового котла Invest на біогазі. Розрахунок проведено для природного газу і біогазу. Використано для дослідження біогаз зі складом: CH_4 – 60 %; H_2 – 0,02 %; H_2S – 0,96 %; CO – 0,02 %; N_2 – 2 %; CO_2 – 37 %. Густина біогазу – $\rho = 1,196 \text{ кг/м}^3$; нижча робоча теплота згорання палива приведена до нормальних умов – $Q_p^H = 21,53 \text{ МДж/кг}$. Показники емісії забруднюючих речовин: $k_{\text{NO}_x} = 67,41 \text{ г/ГДж}$; $k_{\text{CO}} = 20,94 \text{ г/ГДж}$; $k_{\text{CO}_2} = 73767,9 \text{ г/ГДж}$; $k_{\text{N}_2\text{O}} = 0,1 \text{ г/ГДж}$; $k_{\text{CH}_4} = 1,0 \text{ г/ГДж}$.

В еквіваленті 1000 м^3 природного газу дорівнює 1500 м^3 біогазу [7].

Для роботи парового котла Invest підприємству потрібно $13\,306\,809 \text{ м}^3$ біогазу, то його масова витрата становитиме $15\,916,9 \text{ т/рік}$. Тоді:

- валовий викид оксиду азоту (у перерахунку на діоксид азоту) $E_{\text{NO}_x} = 23,1 \text{ т}$;
- валовий викид оксиду вуглецю $E_{\text{CO}} = 7,176 \text{ т}$;
- валовий викид діоксиду вуглецю $E_{\text{CO}_2} = 25278,6 \text{ т}$;
- валовий викид метану $E_{\text{CH}_4} = 0,3427 \text{ т}$;
- валовий викид азоту оксиду $E_{\text{N}_2\text{O}} = 0,0343 \text{ т}$.

Висновки.

Отже, важливо розуміти, що метан (CH_4) – сильний парниковий газ, у 25 разів потужніший за CO_2 у плані впливу на зміну клімату. Також коли біогаз спалюється, метан перетворюється на CO_2 , який є менш шкідливим для атмосфери.

Перелік посилань:

1. ЕКОполітика, [Електронний ресурс]. URL:

<https://ecopolitic.com.ua/ua/news/dekarbonizaciya-ta-zamishhennya-prirodnogo-gazu-yak-biometan-mozhe-zminiti-ukrainu/>

2. Павлов О. А. «Екологічні проблеми сучасної електроенергетики»
<https://api.dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/84a0f26d-b20b-4684-ab91-11fdd6bb3cae/content>
3. European Biogas Association, <https://www.europeanbiogas.eu/eba-campaign-2023/>
4. Куріс Ю.В. Підвищення теплотехнічних і екологічних показників спалювання біогазу в теплогенеруючому обладнанні. Куріс Ю.В. Київ, 2007. – 142 с.
5. Методи підвищення енергетичної та екологічної ефективності промислового котла на біогазі [Електронний ресурс]. URL: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2018/03/1-%D0%91%D1%96%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7.pdf>
6. Черноусенко О., Власенко О. Використання біогазу в газових турбінах для виробництва теплової та електричної енергії. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, 2024 (1), 30–37. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.01.04>
7. Гелетуха Г., Кучерук П., Матвєєв Ю. Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні: Аналітична записка. № 11. Київ, Біоенергетична асоціація України, 2014. 42 с.

¹ Бакалаврант 3 курсу Ракута І.О.

¹ Асист., к.т.н. Власенко О.В.

<https://scholar.google.com/citations?user=-Ih8IfYAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОЦІНКА ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ ПАРОВОГО КОТЛА INVEST НА БІОГАЗІ

Постановка проблеми та її актуальність

Використання біогазу як палива для парових котлів є перспективним напрямом енергетичної трансформації, що сприяє зменшенню залежності від викопних енергоресурсів та зниженню викидів парникових газів. Актуальність цієї проблеми обумовлена необхідністю впровадження відновлюваних джерел енергії для зниження навантаження на екологію та економічної вигоди від використання біогазу, зокрема в умовах зростання цін на імпорتنі енергоресурси.

Аналіз останніх досліджень

Останні дослідження в галузі використання біогазу для опалення та енергетики показують значний потенціал цього відновлювального джерела енергії в контексті зменшення викидів парникових газів та зниження залежності від викопних палив. Встановлено, що біогаз має високу теплотворну здатність, однак його спалювання супроводжується низькою ефективністю через високий вміст діоксиду вуглецю (CO_2), що знижує продуктивність котлів.

Формулювання мети

Метою роботи є аналіз теплового балансу парового котла при використанні біогазу як палива, оцінка його ефективності у порівнянні з природним газом та виявлення основних факторів, що впливають на зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) котла.

Основна частина

Біогаз – це відновлюване джерело енергії на основі легких вуглеводнів, що виробляється шляхом анаеробного зброджування органічної речовини. Типовий склад біогазу змінюється залежно від складу вихідної сировини та умов в анаеробному реакторі. Окрім традиційних застосувань, таких як опалення, приготування їжі, освітлення тощо, біогаз вважається провідним газоподібним джерелом біоенергії, оскільки він легко синтезується з широкого діапазону сировини та має потенціал для зменшення викопного вуглецевого сліду в енергетичному секторі [1].

Із зростанням глобальної стурбованості щодо захисту навколишнього середовища, використання викопного палива стикається з дедалі більшими обмеженнями. У цьому контексті паливо з біомаси, як відновлюване джерело енергії, стає життєздатною альтернативою традиційному викопному паливу. Дослідження показують, що використання енергії біомаси не тільки зменшує залежність від традиційного викопного палива, але й ефективно зменшує викиди вуглецю [1].

На сьогоднішній день Україна забезпечена власним паливом лише на 50 %, а ціни на імпортне паливо постійно зростають. Одним із перспективних шляхів використання біогазу є спалювання у парових котлах з метою отримання теплової енергії. Використання парових котлів різної потужності на традиційних та альтернативних паливах дозволить досягти високої економічної та енергетичної ефективності із забезпеченням надійності під час експлуатації [2].

Біоконверсія органічних відходів є одним з прогресивних, економічно ефективних та екологічно прийнятних рішень для запобігання забруднення навколишнього середовища. При цьому є можливість раціонально використовувати органічні речовини та звільнювати

акумульовану в них енергію. Значне зростання цін на первинні енергоносії вимагає пошуку альтернативних видів палива: одним із перспективних є біогаз. Ефективність та надійність процесу біоконверсії в значній мірі залежить від організації використання біогазу при виробленні теплової енергії у парових котлах [3–4].

Хімічний склад біогазу, отриманого на біогазових заводах, представлений метаном та діоксидом вуглецю з незначним вмістом сірководню та аміаку. У біогазі також є сліди таких елементів, як водень, азот, монооксид вуглецю. Газова суміш насичена водяною парою, в ній також можуть бути частинки пилу. Об'ємна теплота згорання (Q) визначається в основному вмістом CH_4 , оскільки незначні кількості H_2 і H_2S на цей показник практично не впливають. Відповідно температура загорання і межа загорання також залежать від вмісту CH_4 [5].

Важливу роль відіграє очищення біогазу, адже від його складу залежить ефективність спалювання. Основними забруднювачами є волога, діоксид вуглецю (CO_2) та сірководень (H_2S). Основними методами очистки біогазу є: мембранний, хімічний та кріогенний. Для осушування також можна застосовувати розділення компонентів дистиляцією із конденсованої фази, при якому вихід корисного продукту (метану) складає 70%. Біогаз також можна збагачувати метаном і досягати концентрацій 90%, що усуває основні проблеми його спалення у порівнянні з природним газом [5].

В еквіваленті 1000 м³ природного газу дорівнює 1500 м³ біогазу [6].

В якості відновлюваного джерела енергії біогаз має переваги високої теплотворної здатності та меншого забруднення навколишнього середовища, і може використовуватися як котельне паливо. Котел це промислове обладнання з високим споживанням енергії. Будучи котельним паливом, біогаз певною мірою сприятиме стійкому використанню ресурсів та економії витрат на паливо. Однак все ще існують деякі технічні бар'єри для широкомасштабного застосування біогазових котлів.

Котли на біомасі не можуть швидко реагувати на зміни теплових навантажень споживачів, на відміну від газових котлів. Вони працюють набагато ефективніше, якщо стабільна безперервна робота триває якомога довший час. Постійна зміна теплового навантаження котла на біомасі може вплинути на його ефективність. Котли на біомасі працюють ефективніше як технологія забезпечення базового навантаження (опалення, гарячого водопостачання) системи опалення [7].

В роботі проведено числове дослідження роботи парового котла Invest на біогазі та природному газі з використанням розрахункового методу [8].

Розрахунок проведено для:

- природного газу складом: $\text{CH}_4 = 98,3 \%$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,28 \%$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,11 \%$; $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,14 \%$; $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,03 \%$; $\text{C}_6\text{H}_{14} = 0,02 \%$; $\text{N}_2 = 1 \%$; $\text{CO}_2 = 0,1 \%$; $\text{H}_2\text{S} = 0 \%$; $\text{CO} = 0 \%$; $\text{O}_2 = 0,02 \%$; $Q^{\text{H}}_{\text{p}} = 35716 \text{ КДж/м}^3$, при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1$;
- біогазу складом: $\text{CH}_4 = 60 \%$; $\text{H}_2 = 0,02 \%$; $\text{H}_2\text{S} = 0,96 \%$; $\text{CO} = 0,02 \%$; $\text{N}_2 = 2 \%$; $\text{CO}_2 = 37 \%$; і теплота згорання $Q^{\text{H}}_{\text{p}} = 24\,000 \text{ КДж/м}^3$, надлишок повітря $\alpha = 1,15$.

В [3] вказується, що заміна природного газу на біогаз має як очевидні переваги – дешевша ціна, так і недоліки – зменшення продуктивності котла. ККД парового котла знижується на 4–5%, також погіршуються екологічні показники котла. Більш низька адіабатна температура згорання біогазу призводить до збільшення викидів в атмосферу CO .

У чисельному дослідженні при розрахунках спалювання біогазу задано різні значення відсотку хімічного недопалу. Співставлено отримані значення ККД на біогазі і природному газі при різних значеннях недопалу. При розрахунках встановлено, що відсоток хімічного недопалу q_3 складає 5 % при різниці ККД у 5 %. Отриманий результат відповідає визначеному діапазону у використанні розрахункового методу.

Висновки.

Отже, зниження ККД котлів при переході з природного газу на біогаз пояснюється наявністю у біогазі високого вмісту вуглекислого газу CO_2 . При горінні CO_2 перешкоджає

доступу молекул кисню O_2 до молекул метану CH_4 , що впливає на продуктивність спалювання біогазу.

Перелік посилань:

1. Simulation of biogas co-combustion in CFB boiler: Combustion analysis using the CPFD method [Online]. Режим доступу:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X24006415>

2. Степанов Д., Ткаченка С., Боднар Л., Лисюк І. і Горобець К. (2010) «Розробка водогрійних котлів малої потужності на традиційних та альтернативних паливах», Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies, 1(1), pp. 13–16. Available at: <https://chiffa.org/JournalEngine/engine/index.php/msj/article/view/12> (Accessed: 27 February 2025).

3. Куріс Ю.В. Підвищення теплотехнічних і екологічних показників спалювання біогазу в теплогенеруючому обладнанні / Куріс Ю.В. //Київ. – 2007.

4. Черноусенко, О., Власенко, О. (2024). Використання біогазу в газових турбінах для виробництва теплової та електричної енергії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, (1), 30–37. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.01.04>

5. Методи підвищення енергетичної та екологічної ефективності промислового котла на біогазі [Online]. Електронний ресурс: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2018/03/1-%D0%91%D1%96%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%B7.pdf>

6. Гелету́ха Г.Г. Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні / Гелету́ха Г.Г., Кучерук П.П., Матвєєв Ю.Б. // Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України. – 2014. – № 11.с 42 с. – URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/04/position-paper-uabio-11-ua.pdf>.

7. Використання твердої біомаси як палива на котельнях [Online]. Режим доступу: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2023/11/4.-Kramar-V.-G.-Vykorystannya-tverdoyi-biomasy-yak-palyva-na-kotelnyh.pdf>

8. Розрахунок теоретичного складу продуктів згоряння і температури горіння органічних палив: Методичні вказівки до виконання розрахункових робіт з курсів «Горіння палива та обладнання для його спалювання». Уклад.: Сірий О.А., Бутовський Л.С., Грановська О.О. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 39 с.

¹ Аспірант 3 курсу Сторожук М.С.

¹ Доц., к.т.н. Сірий О.А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=FmKF8DsAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ БАЛАСТУВАННЯ ОКИСЛЮВАЧА ПРОДУКТАМИ ЗГОРЯННЯ ПРИ СПАЛЮВАННІ ПРОПАН БУТАНОВОЇ СУМІШІ

Постановка проблеми та її актуальність. У сучасних енергетичних та промислових процесах спалювання газових палив, зокрема пропан-бутанових сумішей, гостро стоїть проблема підвищення ефективності згоряння та зниження шкідливих викидів. Одним із основних забруднювачів атмосферного повітря є оксиди азоту (NO_x), утворення яких безпосередньо пов'язане з високими температурами в зоні горіння.

Ефективним способом покращення екологічних показників котельних установок шляхом зменшення емісії оксидів азоту є рециркуляція частини димових газів в топковий простір котла [1–3]. Це дозволяє знизити температуру полум'я, змінити механізм хімічних реакцій та покращити умови спалювання палива. Однак, вплив такого підходу на ефективність процесу згоряння, склад продуктів згоряння та формування термічних NO_x потребує додаткових досліджень.

Аналіз останніх досліджень. У науковій літературі питання рециркуляції продуктів згоряння для зменшення викидів NO_x досліджується в контексті роботи газотурбінних та промислових пальників. Раніше проведені дослідження підтверджують, що введення інертних газів або продуктів згоряння у зону горіння може суттєво впливати на кінетику процесу окислення.

Так, у роботах зарубіжних і вітчизняних учених доведено, що додавання продуктів згоряння змінює температурний профіль полум'я, уповільнює реакції утворення NO_x та може підвищувати стабільність горіння [1]. Однак, у більшості досліджень розглядалися системи з великим надлишком повітря, тоді як для пропан-бутанових сумішей цей параметр потребує уточнення.

Недостатньо вивчено питання оптимальних концентрацій продуктів згоряння у складі окислювача, їх впливу на швидкість реакцій та процеси теплообміну. Саме ці аспекти досліджуються в даній роботі.

Формулювання мети. Метою роботи є дослідження впливу баластування окислювача продуктами згоряння на ефективність спалювання пропан-бутанової суміші в прямоточних мікродифузійних пальниках струменево нішевого типу, визначення змін у процесах теплообміну, утворення NO_x і CO , а також забезпечення екологічної безпеки та енергоефективності..

Основна частина. Дослідження проводилося на експериментальній установці що була сконструйована в науковій лабораторії НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» (рис. 1).

В експериментах змінювалися наступні параметри:

- частка рециркуляційних газів у складі окислювача (0–30 %),
- температура повітря перед подачею у камеру згоряння,
- коефіцієнт надлишку повітря (α).

Температури факелу та продуктів згоряння вимірювались термоелектричними перетворювачами типу ХА та ПП, а аналіз складу продуктів згоряння здійснювався за допомогою газоаналізаторів ОКСИ 5м-5н

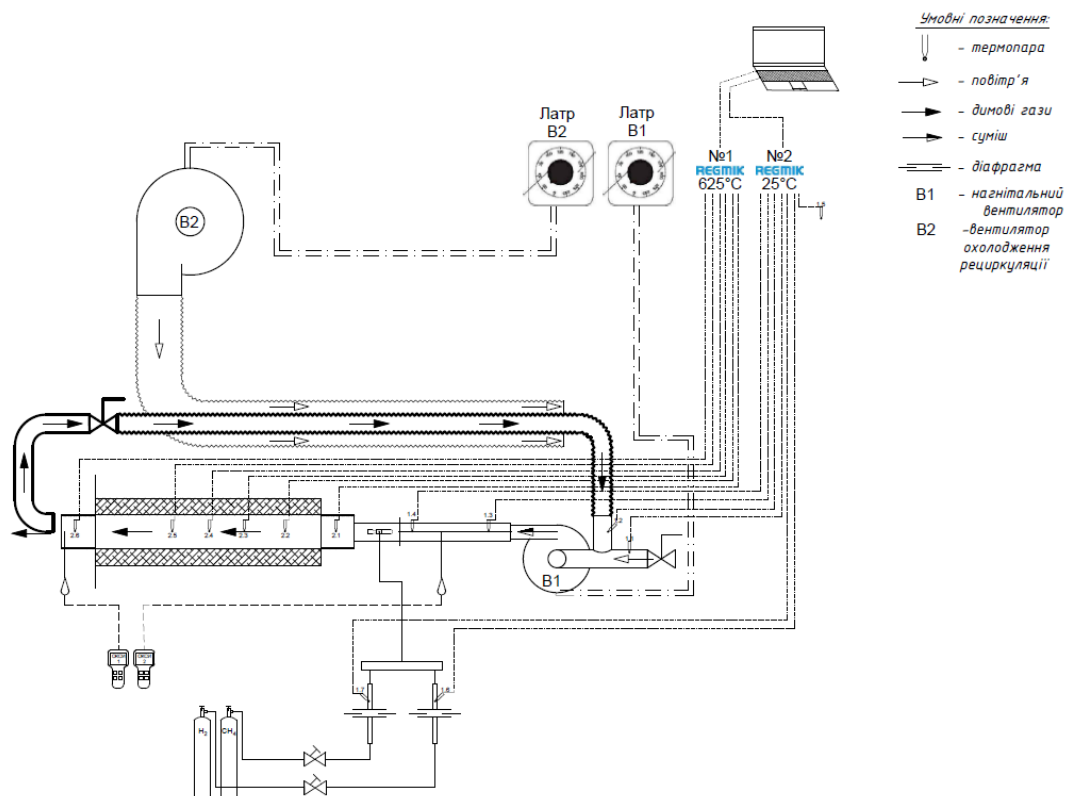


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки для спалювання сумішних палив

Частка рециркуляції обчислена за формулою (1):

$$R = \frac{21 - O_2^{\text{дуг}}}{21 - O_2^{\text{газ}}} \times 100\%, \quad (1)$$

де **R** – відсоток рециркуляції димових газів, %;

$O_2^{\text{дуг}}$ – об'ємна концентрація кисню у дуттьовому повітрі, %;

$O_2^{\text{газ}}$ – об'ємна концентрація кисню у димових газах після спалювання, %.

Результати дослідження. Результати вимірювань показали, що введення продуктів згоряння у склад окислювача суттєво впливає на температурний режим та склад утворених газів, а саме збільшення частки продуктів згоряння вище 25 % призводить до зростання концентрації CO (рис. 2), що свідчить про незначне підвищення хімічного недопалу.

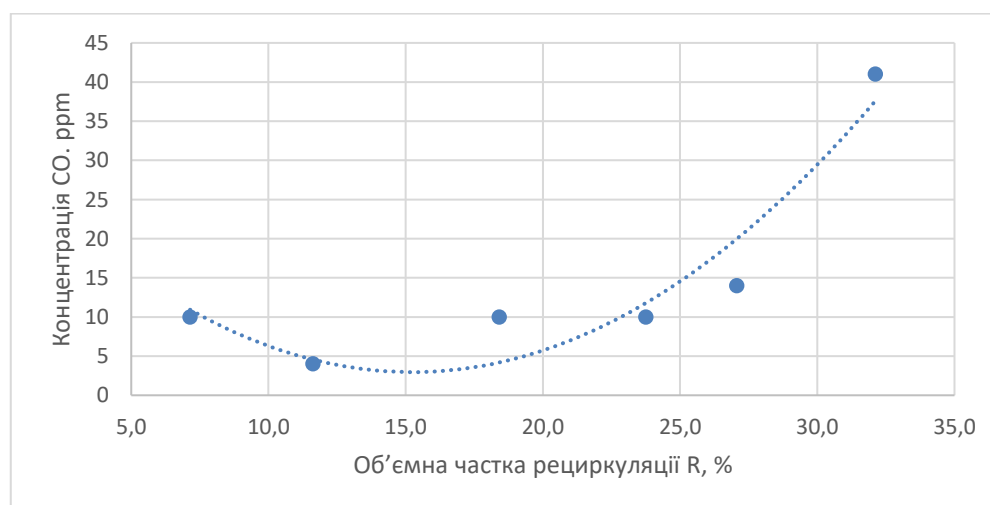


Рисунок 2 – Графік залежності концентрації CO від частки рециркуляції димових газів при умовах $\alpha = 1,2-1,6$, $N = 30$ кВт

Концентрація NO_x при введенні 30 % рециркуляційних газів зменшується на 50 % (рис. 3).

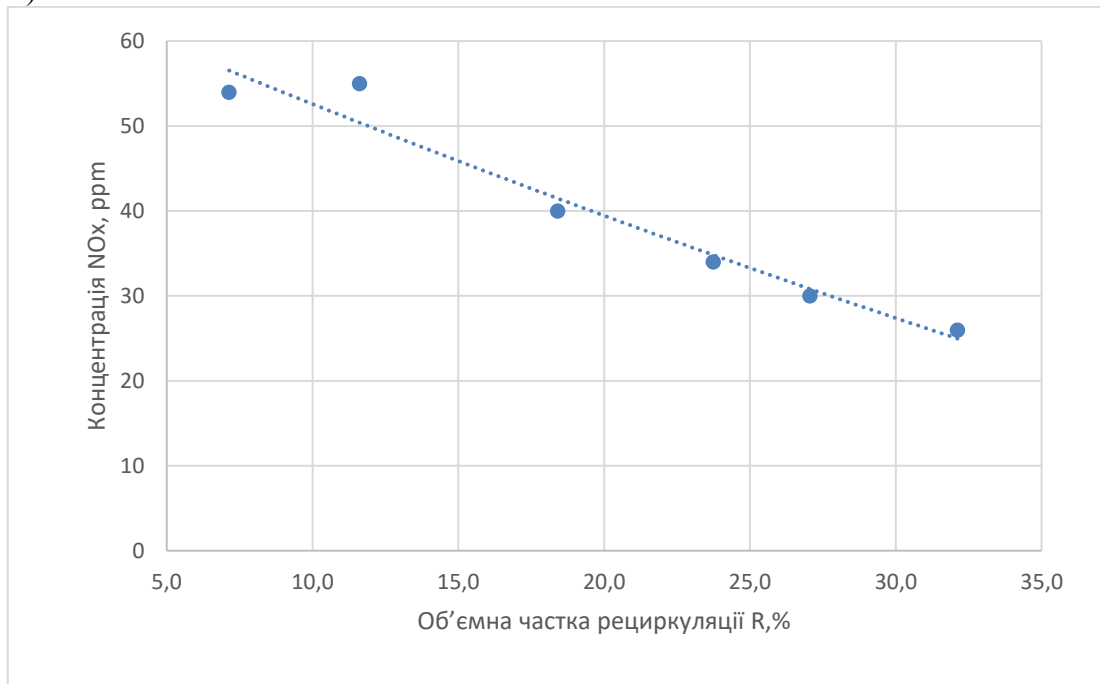


Рисунок 3 – Графік залежності концентрації NO_x від частки рециркуляції димових газів при умовах $\alpha = 1,2\text{--}1,6$, $N = 30$ кВт

Отримані результати свідчать, що баластування продуктами згоряння є ефективним методом зниження утворення NO_x , однак необхідно контролювати концентрацію щоб уникнути погіршення горіння. За результатами досліджень газопальникової системи на даному тепловому режимі можна стверджувати, що допустимий об'єм газів рециркуляції становить до 30 %, при збереженні допустимого рівня хімічного недопалу. Баластування окисника суттєво знижує температури факелу, на рис. 4 приведені результати вимірювання температур продуктів згоряння по осі жарової труби.

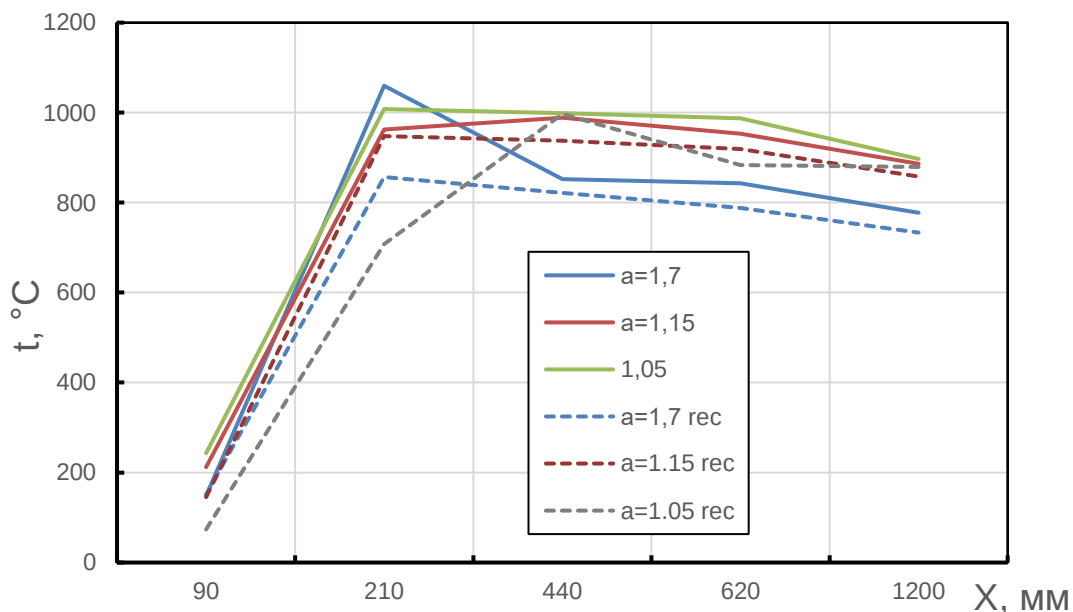


Рисунок 4 – Залежність температури на осі факелу по довжині дослідної ділянки при $\alpha = 1,05\text{--}1,7$, $N = 30$ кВт, баластування дуттьового повітря становить 25 %

Результати експериментів можуть бути використані для вдосконалення систем горіння у промислових пальниках та котельнях, зменшення викидів шкідливих речовин і підвищення екологічної безпеки процесу спалювання газових палив

Висновки. Баластування окислювача продуктами згоряння є ефективним методом для регулювання процесу спалювання пропан-бутанової суміші. Дослідження показали, що за раціональних умов можна досягти значного зниження утворення NO_x при збереженні високої ефективності згоряння. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення експериментальної бази, а також на розробку математичних моделей для прогнозування процесів горіння з урахуванням впливу рециркуляції газів.

Перелік посилань:

1. Мельник О.В., Сорока В.В., Гаталяк М.Я. Методи зниження вмісту токсичних компонентів відпрацьованих газів судових дизелів. Водний транспорт. 2021. № 1(32). С. 64–74. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.1.32.08
2. Горбань К.С., Сірий О.А., Абдулін М.З. Можливості впливу струменевонішової технології на екологічні та експлуатаційні параметри вогнетехнічного об'єкта. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2021. № 2(6). С. 10–14. doi: 10.20998/2078-774X.2021.02.02
3. Михайленко В.С., Щербінін В.А., Лещенко В.В., Харченко Р.Ю., Ложечнікова Н.В. Моделювання процесу утворення шкідливих викидів у вихідних газах судових 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.

¹ Бакалаврант 4 курсу Федоренко Р.О.

¹ Доц., к.т.н. Баранюк О.В.

https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=uk&user=JQnIBoEAAAAAJ

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІННОЇ СЕКЦІЇ АПАРАТУ ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА ОСНОВІ ШАХОВИХ ПАКЕТІВ ТРУБ РІЗНОГО ПРОФІЛЮ

Постановка проблеми та її актуальність. Обладнання теплових електростанцій України часто працює в змінних режимах роботи через суттєву нестачу маневрених потужностей в енергосистемі. Практичний досвід експлуатації показав значний вплив частих пусків та зупинок обладнання на довговічність його експлуатації через високий рівень термічних напружень під час різкого нагрівання та охолодження основного металу. Однак існують різні технології пуску енергетичного обладнання, що мають різний вплив на темпи накопичення пошкоджень. Таким чином, дослідження впливу пускових параметрів на термонапружений стан парової турбіни є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень. Для охолодження потоку природного газу, що транспортується за допомогою газоперекачувальних станцій, найбільшого поширення отримали апарати повітряного охолодження, які мають ряд переваг перед іншими типами теплообмінних апаратів, а саме не вимагають попередньої підготовки теплоносіїв, надійні в експлуатації, екологічно чисті, мають прості схеми підключення [1].

В якості теплообмінних секцій апаратів повітряного охолодження використовуються пучки оребрених труб різної довжини (від 3 до 12 м). Існують приклади застосування біметалевих труб де для несучої труби в якості матеріалу використовується сталь, а в якості матеріалу для оребрення використовуються мідь і алюміній. Необхідно відзначити, що в місці контакту двох труб виникає додатковий термічний опір і, як показують багаточисленні дослідження, теплова ефективність їх знижується на 10-15 % в порівнянні з монометалічними теплообмінними поверхнями у вигляді труб круглого поперечного перерізу з гвинтовим або шайбовим поперечним оребренням. Ці труби набули широкого розповсюдження в теплоенергетичній промисловості та котлобудуванні і велика кількість робіт присвячена дослідженню та узагальненню теплових та аеродинамічних характеристик круглоребристих труб та трубних пакетів [2–4], розроблені інженерні методики їх розрахунку тому їх слід використати в даній роботі для порівняльного аналізу.

Формулювання мети. Метою роботи є розробка обґрунтованих рекомендацій щодо вибору найбільш перспективної з теплоаеродинамічної точки зору поверхні теплообміну для теплообмінної секції апаратів повітряного охолодження. Для досягнення поставленої мети виконано аналіз результатів розрахунку за узагальнюючими залежностями для розрахунку конвективних коефіцієнтів теплообміну шахових пакетів труб з зовнішнім шайбовим і гвинтовим оребренням які до сьогоднішнього дня успішно використовуються в якості теплообмінних секцій апаратів повітряного охолодження, та пучків труб плоско-овального профілю з повним і неповним оребренням які можуть бути використані при конструюванні останніх.

Основна частина. На рис. 1 розрахункові дані представлені у вигляді графічних залежностей $\alpha_{\text{пр}} = f(S_1/S_2)$. Порівняння приведених на рис. 1 кривих свідчить, що найвищими показниками з інтенсивності тепловіддачі володіють пучки плоско-овальних труб з неповним оребренням, які в середньому в 2,5 рази перевищують інтенсивність тепловіддачі циліндричних труб з шайбовим і гвинтовим оребренням і майже в 4-ри рази плоско-овальні труби з повним оребренням. Розрахункові дані по характеристикам теплообміну слід доповнити даними по аеродинамічному опору (рис. 2). Аналіз наведених

на рис. 2 даних свідчить, що пучки циліндричних труб з гвинтоподібним і шаховим оребренням мають більший аеродинамічний опір (а середньому на 50 %) ніж труби плоско-овального профілю. Це призводить до збільшення витрат потужності вентилятора і в свою чергу може призвести до погіршення експлуатаційних характеристик АПО. Порівнюючи плоско-овальні труби з повним і неповним оребренням можна констатувати, що аеродинамічний опір останніх на 12 % нижчий. Збільшення поздовжнього кроку труб в пучку S_1 призводить до зменшення аеродинамічного опору для всіх досліджених типів поверхонь, що має логічне пояснення – примежові шари які розвиваються на оребрених поверхнях теплообміну не перетискають переріз для проходження повітряного потоку. В цьому випадку суттєвого прискорення потоку в між трубному просторі не спостерігається отже не відбувається значних затрат енергії на прокачування теплоносія.

Дані, що представлені на графічних залежностях (рис. 1-2) отримані в умовах ідентичності чисел Рейнольдса як зі сторони природного газу так і зі сторони повітряного потоку.

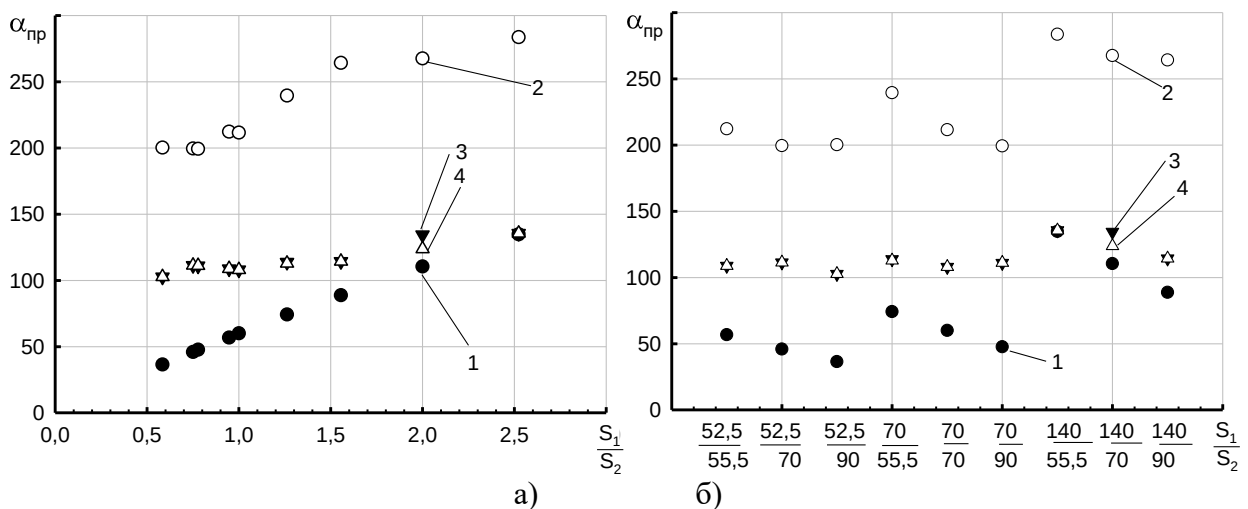


Рисунок 1 – Залежність приведенного коефіцієнта тепловіддачі для монотонного збільшення відносного кроку труб в пучку S_1/S_2 (а) і для випадку коли $S_1 = \text{const}$, а $S_2 = \text{var}$ (б)

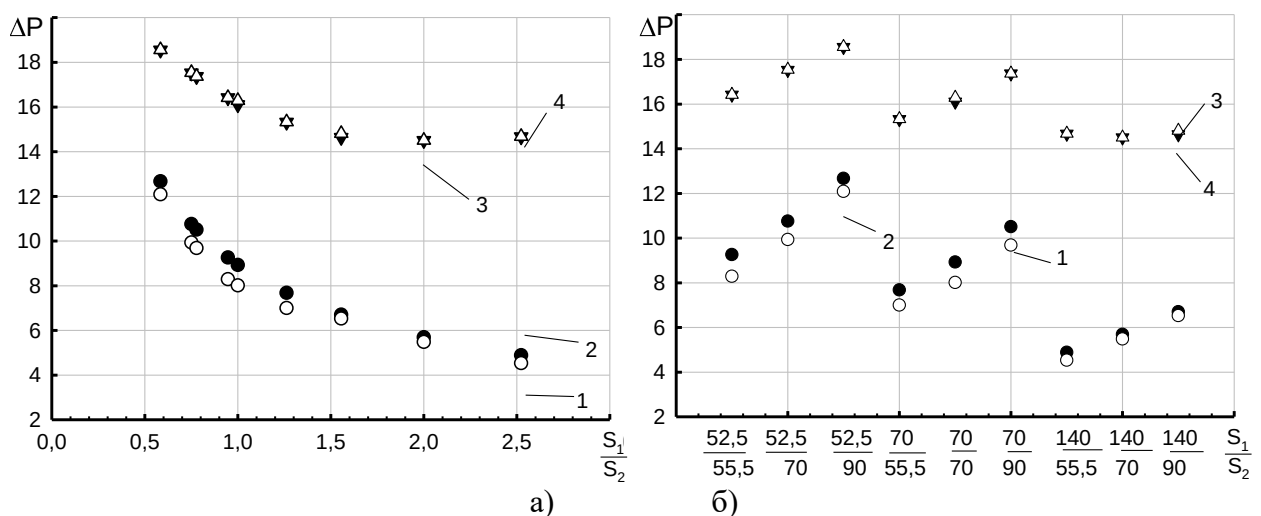


Рисунок 2 – Залежність аеродинамічного опору для випадку монотонного збільшення відносного кроку труб в пучку S_1/S_2 (а) і для випадку коли $S_1 = \text{const}$, а $S_2 = \text{var}$ (б)

Аналіз даних рис. 1-2 свідчить, що з усіх розглянутих видів труб, що пропонуються для конструювання теплообмінної секції апарату повітряного охолодження найбільш

прийнятною є плоско-овальна труба з неповним оребренням. При незмінному тепловому навантаженні кількість труб в поздовжньому напрямку руху повітря, а отже поверхня теплообміну як однієї секції так і теплообмінного апарату в цілому найменша. Інтенсифікація тепловіддачі в створення умов для руйнування потовщених пограничних шарів на поверхнях ребер шляхом штучної турбулізації потоку. Такий метод призводить до суттєвого підвищення інтенсивності теплообміну і, в свою чергу, до не менш суттєвого збільшення аеродинамічного опору теплообмінного апарату, що не завжди призводить до підвищення тепло аеродинамічної ефективності.

Висновки. Проведені розрахунки дозволяють зробити наступні висновки:

- проведено порівняльний аналіз інтенсифікації теплообміну і аеродинамічного опору шахових пакетів труб при поперечному їх омиванні в широкому діапазоні зміни геометричних характеристик труб і пакетів за допомогою узагальнюючих залежностей взятих з доступної літератури;

- визначено діапазон крокових характеристик труб пакетів (поперечного кроку S_1 і поздовжнього S_2) при якому спостерігаються найвищі значення коефіцієнтів тепловіддачі при найменшому значенні аеродинамічного опору;

- визначено найбільш оптимальну з теплоаеродинамічної точки зору теплообміну поверхню, яка може бути використана при конструюванні теплообмінної секції апаратів повітряного охолодження.

З врахуванням вище сказаного, слід зазначити, що при використанні плоско-овальних труб з неповним оребренням конструктори зможуть збільшити площу поверхні теплообміну за рахунок зміни геометричних розмірів ребер, що робить ці труби більш перспективними при конструюванні апаратів повітряного охолодження..

Перелік посилань:

1. Pysmennyy E.N. (2004) Heat transfer and aerodynamics of cross-ribbed tube packages [Теплообмен і аеродинаміка пакетів поперечнооребрених труб]. Kiev: Alterpress [in Ukraine].

2. Ilgarubis V.-AS., Ulinskas R.V., Butkus A.V. (1987) Hydraulic resistance and average heat transfer of compact bundles from flat-oval finned tubes. Proceedings of the Academy of Sciences Lit. SSR. 1987. Series 6. Vol. 1. (158). S. 49–56.

3. Pysmennyy Ye., Terekh A., Bagriy P., Polupan G. Experimental investigation of thermo-aerodynamic characteristics of fining flat-oval tube banks. 7th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics: Book of Abstracts. Krakow, Poland. 28 June – 03 July, 2009. P. 116.

4. Pis'mennyi E.N., Terekh A.M., Polupan G.P., Carvajal-Mariscal I., Sanchez-Silva F. Universal relations for calculation of the drag of transversely finned tubes bundles. Int. J. Heat Mass Transfer. 2014. Vol. 73. P. 293–302.

¹ Бакалаврант 4 курсу Чернік Д.В.

¹ Асист., к.т.н. Власенко О.В.

<https://scholar.google.com/citations?user=-Ih8IfYAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ІНДИВІДУАЛЬНА СИСТЕМА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ МІСТА ПОЛТАВИ

Постановка проблеми та її актуальність. Останнім часом особлива увага приділяється питанням енергоефективності та раціонального енергоспоживання. Особливо це посилюється різким зростанням вартості енергоносіїв. Все частіше керівників комунальних підприємств, мешканців багатоквартирних будинків та власників інших енергоспоживаючих об'єктів цікавить наступне: зниження неефективного енергоспоживання; облік та управління споживанням енергії; автоматизація процесів, пов'язаних із забезпеченням комфортних кліматичних умов у приміщеннях при мінімальних витратах [1–2].

Індивідуальний тепловий пункт (ІТП) є одним з основних елементів системи централізованого теплопостачання, який забезпечує функцію ефективного використання зовнішніх енергоресурсів для забезпечення стабільної циркуляції та розподілу теплоносія в системі теплопостачання окремого об'єкта. Перехід на систему з використанням ІТП доцільний не тільки при будівництві нових об'єктів, а й у вже експлуатованих будинках зі старою системою теплопостачання. Незважаючи на деякі незручності, індивідуальний тепловий пункт (ІТП), що включає складність транспортування та монтажу, популярність використання ІТП з кожним роком зростає. У комунальній сфері ця проблема набула надзвичайної актуальності, оскільки їй приділялося значно менше уваги порівняно з виробництвом. Саме в комунально-житловому секторі витрати на забезпечення тепла стали надзвичайно витратними для бюджету [3–4].

Індивідуальний тепловий пункт може значно скоротити споживання енергії та підвищити комфорт. Різні компанії виробляють сучасні модульні опалювальні агрегати, які забезпечують регулювання подачі теплової енергії в системи опалення, гарячого водопостачання, вентиляції та кондиціонування. Встановлення ІТН гарантує економію в частині забезпечення сприятливого клімату в житлових будинках, офісних будівлях або промислових приміщеннях. У кожній будівлі, в залежності від потреб, може бути встановлено один або кілька ІТН [5–6].

Аналіз останніх досліджень. Через дефіцит енергоресурсів в Україні питання економії теплової та електричної енергії набуває все більшого значення. Економія теплової енергії може бути досягнута за рахунок індивідуального контролю споживання тепла в точках опалення в поєднанні з централізованим контролем.

Формулювання мети. Метою роботи є вдосконалення проєктування індивідуальних систем теплопостачання для житлових теплових пунктів.

Основна частина.

Визначено теплові навантаження на опалення та гаряче водопостачання житлових будинків з певними характеристиками та кількістю мешканців для кліматичних умов міста Полтава. Схематичні креслення індивідуальних підключень теплообмінників та схеми гарячого водопостачання були розроблені та розраховані з використанням нормативних документів та каталогів виробників відповідної продукції. Наведено розрахунки для систем опалення та підігріву води для району житлової забудови.

Початкові дані до розрахунку:

- розміри будинку $a = 24$ м, $b = 42$ м;
 - кількість поверхів – 5;
 - кількість будинків – 9;
 - товщина перекриття між поверхами $\delta_{\text{пер}} = 0,350$ м;
 - підлога у всіх будинках – утеплена на лагах;
 - для зменшення втрат теплоти будинками здійснена термомодернізація їх зовнішніх стін шляхом наклеювання пінополістиролових (утеплювач – І) плит, а також дерев'яні світлопрозорі конструкції замінені на енергозберігаючі склопакети;
 - температура внутрішнього повітря в приміщеннях будинків $t_{\text{вн}} = 20$ °С.
- Результати розрахунків показано у таблиці 1 та 2.

Таблиця 1 – Розрахункові потоки теплоти споживачами, кВт

Навантаження	Позначення	Значення величини
1. Розрахунковий потік теплоти на опалення будинків	ΣQ_o	1764,36
2. Середній за добу потік теплоти на гаряче водопостачання споживачів житлових будинків	Q_T^h	775,44
Сумарний розрахунковий потік теплоти на опалення і гаряче водопостачання споживачів	ΣQ	2539,8

Таблиця 2 – Річні витрати теплоти споживачами, МДж/рік

Навантаження	Позначення	Значення величини
1. Річна витрата теплоти на опалення будинків	$Q_{\text{річ.о}}$	$0,55 \cdot 10^7$
2. Річна витрата теплоти на гаряче водопостачання споживачів житлових будинків	Q_{hwr}	$2,34 \cdot 10^7$
Сумарне річне навантаження споживачів	$\Sigma Q_{\text{річ}}$	$2,89 \cdot 10^7$

Після проміжних розрахунків технічного обслуговування було обрано допоміжне обладнання, таке як різні насоси та розширювальні баки. Визначено основні заходи та засоби організаційно-технічного забезпечення охорони праці.

Висновки. Були розраховані теплові навантаження: на опалення – 1764,36 кВт та на гаряче водопостачання – 775,44 кВт. Сумарне річне навантаження споживачів для групи будинків складає $2,89 \cdot 10^7$ МДж/рік.

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

СЕКЦІЯ № 5

**Проблеми
теоретичної
і промислової
теплотехніки**

¹ Аспірант 1 курсу Бежик О.М.

¹ Доц., к.т.н. Притула Н.О.

<https://lscholar.google.com/uacitations?user=VaBr8T0AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ ЗА РАХУНОК УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. Системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ОВіК) відіграють критичну роль у забезпеченні комфортних і безпечних умов праці у промислових та громадських будівлях. Водночас вони є одними з найбільш енергоємних систем у сучасному будівництві. За оцінками, вентиляційні системи можуть споживати від 30 % до 50 % загальної електроенергії промислових підприємств, що суттєво впливає на їхню енергетичну ефективність та експлуатаційні витрати [1, 2]. Особливо актуальним є питання утилізації теплоти технологічного обладнання у харчовій промисловості, де значні обсяги надлишкової теплоти, що утворюється в процесах пастеризації, сушіння, охолодження та заморожування, залишаються невикористаними. У традиційних вентиляційних схемах нагріте повітря просто викидається в навколишнє середовище, що призводить до суттєвих енергетичних втрат [3, 4].

Аналіз останніх досліджень. Останнім часом значна увага приділяється розробці та впровадженню енергоефективних рішень у системах ОВіК. Дослідження [3] показують, що вентиляційні системи з рекуперацією теплоти можуть скоротити загальне енергоспоживання підприємства на 20–30 %, що підтверджує доцільність їхнього впровадження.

У роботі [4] було проведено аналіз впливу адаптивних систем вентиляції на стабільність мікроклімату виробничих приміщень. Отримані результати вказують на те, що використання адаптивних схем рециркуляції повітря дозволяє зменшити коливання температури на 2–4 °С, що покращує умови зберігання продукції та знижує навантаження на системи охолодження.

У дослідженні [5] розглядається застосування методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) для оптимізації процесів змішування свіжого та рециркуляційного повітря. Зокрема, у роботі [6] було показано, що дворівневі камери змішування дозволяють підвищити ефективність теплового обміну до 85 %, що на 10–15 % перевищує показники традиційних систем.

Додатково, у звіті Міжнародного енергетичного агентства [7] відзначається, що інтеграція теплових насосів у вентиляційні системи може скоротити залежність підприємств від викопного палива та сприяти досягненню цілей сталого розвитку. У цьому контексті використання теплоти технологічного обладнання для підігріву припливного повітря виглядає особливо перспективним.

Дослідження можливостей утилізації надлишкової теплоти технологічного обладнання для підвищення енергетичної ефективності вентиляційних систем є актуальним завданням, яке спрямоване на вирішення енергетичних, економічних та екологічних проблем у промисловому секторі. Вентиляційні системи промислових підприємств відіграють ключову роль у підтриманні необхідних параметрів повітряного середовища. Проте їх високе енергоспоживання потребує пошуку нових рішень, які б дозволяли зменшити втрати енергії та покращити загальну ефективність систем ОВіК [2, 3]. Одним із таких рішень є використання теплоти технологічного обладнання, що дозволяє значно знизити потребу у зовнішніх джерелах енергії.

Формулювання мети. Аналіз застосування дворівневих камер змішування, які дозволяють адаптивно керувати співвідношенням свіжого та рециркуляційного повітря залежно від теплових надходжень у приміщенні.

Основна частина.

Найпоширеніші вентиляційні системи в промисловості – припливно-витяжні установки із повним видаленням теплого повітря, що утворюється внаслідок роботи технологічного обладнання. Такі системи передбачають подачу свіжого повітря, його підігрів у холодний та перехідний періоди року, після чого воно викидається назовні разом із надлишковим теплом. Це призводить до значних енергетичних втрат, оскільки припливне повітря потребує додаткового нагріву, особливо в холодний період року [5].

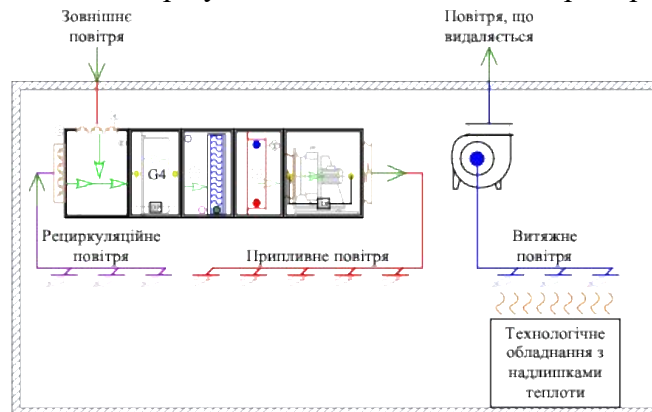


Рисунок 1 – Припливна установка з одnorівневою камерою змішування

Для зменшення енергетичних втрат застосовують системи з одnorівневою камерою змішування, в яких частина теплого повітря повертається в приміщення, зменшуючи навантаження на нагрів припливного повітря. Проте такі системи мають суттєві обмеження через відсутність гнучкого регулювання потоків повітря, що не дозволяє ефективно управляти тепловими балансами приміщень із динамічними навантаженнями [6].

Запропонована вентиляційна установка з дворівневою камерою змішування дозволяє ефективніше управляти потоками повітря, забезпечуючи адаптивний розподіл теплоти залежно від змінних умов у приміщенні. Вона складається з двох рівнів повітряного змішування, що дає можливість точніше регулювати кількість свіжого та рециркуляційного повітря залежно від поточних потреб.



Рисунок 2 – Припливна установка з дворівневою камерою змішування

Основні переваги такого рішення:

- гнучке регулювання співвідношення свіжого та рециркуляційного повітря. Це дозволяє підлаштовувати систему до змінних умов експлуатації та уникати перегріву чи недонагріву повітря;

- використання теплоти видаленого повітря від технологічного обладнання. Замість того, щоб скидати тепле повітря назовні, система використовує його для попереднього нагріву припливного потоку.

Згідно з результатами досліджень [8], система з дворівневою камерою змішування дозволяє знизити теплові втрати на 30–40 % у порівнянні з однорівневою схемою. Це пояснюється більш ефективним управлінням потоками повітря, що дозволяє уникнути надмірного нагріву або охолодження повітря у приміщенні.

Окрім енергетичної ефективності, важливим фактором є економічна доцільність впровадження системи з дворівневою камерою змішування. Економічний аналіз [7] показує, що завдяки зниженню теплових втрат система дозволяє скоротити витрати на енергоресурси на 20–25 % у порівнянні з традиційними вентиляційними рішеннями. Це забезпечує окупність інвестицій протягом 3–5 років, що робить систему фінансово вигідною для підприємств.

Використання теплоти видаленого повітря також має значний екологічний ефект. За даними [9], застосування дворівневої камери змішування дозволяє скоротити викиди парникових газів на 25–30 % у порівнянні з вентиляційними установками, що працюють без рециркуляції теплоти. Це узгоджується з міжнародними екологічними стандартами та стратегічними планами зі зменшення вуглецевого сліду промислових підприємств [10].

Висновки. Проведене дослідження підтвердило ефективність застосування дворівневої камери змішування у вентиляційних системах промислових підприємств, зокрема тих, що мають значні теплові надходження від технологічного обладнання. Використання рециркуляційного повітря дає можливість значно зменшити споживання енергії на підігрів припливного повітря, підвищити ефективність вентиляційних установок і зменшити загальні витрати на експлуатацію системи.

Перелік посилань:

1. Goodfellow H. D., & Tahti E. (2001). Industrial Ventilation Design Guidebook. Academic Press. ISBN 978-0122896767.
2. Kong D., Hong Y., Yang Y., Gu T., Fu Y., Ye Y., ... & Zhang Z. (2024). A parametric, control-integrated and machine learning-enhanced modeling method of demand-side HVAC systems in industrial buildings: A practical validation study. *Applied Energy*, 379, 124971.
3. Aljashaami B.A., et al. (2024). Recent improvements to heating, ventilation, and cooling technologies for buildings based on renewable energy to achieve zero-energy buildings: A systematic review. *Results in Engineering*, 23, 102769.
4. Gourelis G., & Kovacic I. (2016). A study on building performance analysis for energy retrofit of existing industrial facilities. *Applied Energy*, 184, 1389–1399.
5. Zhang Z., Guo W., Wu H., Ge L., Liang X., & Mao R. (2023). Thermal performance of an ice storage device for cooling compressed mine air in high-temperature mine refuge chambers. *Applied Thermal Engineering*, 233, 121101.
6. Kim J., Lee I., Jeong D., Park S., Cho J., & Kim R. (2023). Development and validation of an air recirculated ventilation system, Part 2: Evaluation of pig productivity in spring and summer seasons including examination of cooling methods. *Biosystems Engineering*, 230, 83–105.
7. Міжнародне енергетичне агентство (IEA). (2024). Energy Efficiency 2024. Доступно: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2024>
8. Herrmann A.J., & Gehringer M.M. (2021). A low-cost automatized anaerobic chamber for long-term growth experiments and sample handling. *HardwareX*, 10, e00237.
9. ASHRAE. (2019). ASHRAE Standard 62.1-2019: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
10. ДСТУ 9190:2022. Енергоефективність будівель. Визначення енергетичних характеристик вентиляційних систем

¹ Аспірант 1 курсу Вовк В.В.¹ Проф., д.т.н. Безродний М.К.<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=MXjA5VYAAAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУШАРОК ЗЕРНА ЗА РАХУНОК ВСТАНОВЛЕННЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСУ В ЛІНІЇ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ СУШИЛЬНОГО АГЕНТУ

Постановка проблеми та її актуальність. Сушіння зерна – один із найенергоємніших процесів у агропромисловому секторі, що впливає на якість та зберігання продукції [1]. Метою дослідження є підвищення енергоефективності теплонасосних сушарок шляхом оптимізації рециркуляції сушильного агенту та утилізації теплоти конденсації вологи, розроблення узагальнюючої методології для оцінки ефективності систем, яка враховує особливості роботи камерних та конвеєрних сушарок.

Сушіння зерна є критичним етапом його обробки, оскільки від нього залежить якість та тривалість зберігання продукції [2], що обумовлене необхідністю забезпечення продовольчої безпеки в умовах обмежених енергетичних ресурсів. Використання теплових насосів у сушарках дозволяє зменшити залежність від викопних джерел енергії, знизити викиди парникових газів та підвищити енергоефективність процесу сушіння [3], що є важливим кроком у розвитку сталого агропромислового виробництва.

Аналіз останніх досліджень. Промислові процеси сушіння мають значний потенціал для впровадження теплонасосних технологій [3]. Теплові насоси значно знижують енерговитрати процесів сушіння за рахунок рекуперації теплоти, рециркуляції сушильного агенту та використання теплоти конденсації вологи [4].

Формулювання мети. Оцінка рівня підвищення енергоефективності теплонасосних сушарок зерна камерного та конвеєрного типів на основі універсальної методології, яка враховує особливості роботи систем з рециркуляцією сушильного агенту та утилізацією теплоти конденсації вологи. Розроблений підхід базується на балансових рівняннях технологічного процесу з деякими спрощеннями для оптимізації розрахунків. Об'єктом дослідження виступають сушарки камерного та конвеєрного типів, де тепловий насос інтегрований у систему рециркуляції сушильного агенту.

Основна частина

Рециркуляція сушильного агенту застосовується як у камерних, так і у конвеєрних сушарках. Теплові насоси в лінії рециркуляції сушарки забезпечують зростання енергетичної ефективності процесу сушіння за рахунок контролю вологості сушильного агенту та зменшення його викидів з циклу. Теплонасосні сушарки мають ряд особливостей: залежність від стабільних температурних режимів, необхідність додаткових джерел теплоти для запуску та обмеження, пов'язані з термодинамічними основами циклу Карно.

Для оцінки ефективності використано коефіцієнт використання енергії, який відображає витрати енергії на видалення вологи по відношенню до підведеної енергії (1):

$$\eta_{cy} = \frac{Q_{\text{вип}}}{Q_k}, \quad (1)$$

де Q_k – теплове навантаження джерела теплоти, кВт; $Q_{\text{вип}}$ – тепловий потік, який витрачається безпосередньо на випаровування вологи, кВт.

Підвищення енергоефективності сушіння зерна базується на оптимізації теплових потоків та рециркуляції сушильного агенту. Проміжним завданням є визначення кількості теплоти, необхідної для випаровування вологи з зерна, що залежить від інтенсивності видалення вологи та питомої теплоти випаровування, що описано в роботі [5].

Тепловий насос забезпечує необхідний тепловий потік для сушіння, а його ефективність визначається коефіцієнтом трансформації теплоти (COP). Цей коефіцієнт враховує втрати в конденсаторі та випарнику, а також внутрішній ККД теплового насоса [5]. Теплове навантаження випарника залежить від ентальпії сушильного агента на вході та виході, що дозволяє визначити оптимальну температуру його охолодження.

Робота сушарок камерного та конвеєрного типу можлива лише при певних коефіцієнтах рециркуляції, які визначаються з теплового балансу кожної системи. Оптимальний коефіцієнт рециркуляції забезпечує максимальну оптимізацію роботи рециркуляційної сушарки та має наступний вигляд для:

- камерної сушарки
$$K = \frac{(\varepsilon_{\text{TH}}^p - 1)(h_2 - h_0)}{(h_2 - h_0) + (\varepsilon_{\text{TH}}^p - 1)(h_2 - h_0)}, \quad (2)$$

- конвеєрної сушарки
$$K = \frac{(h_2 - h_0) + \frac{\Delta d_{\text{СК}}}{\Delta \omega} C_3 (\theta_2 - \theta_1)}{(h_2 - h_0) + \frac{(h_2 - h_0)}{(\varepsilon_{\text{TH}}^p - 1)}}, \quad (3)$$

де ε_{TH} – коефіцієнт трансформації теплоти теплового насоса; $h_{0,2}$ – ентальпії сушильного агента у відповідних точках технологічного циклу, кДж/кг_{са}; $\Delta \omega$ – зменшення вологості зерна в сушильній камері; θ_1 і θ_2 – температура зерна на вході та виході з сушильної камери відповідно; $\Delta d_{\text{СК}}$ – приріст вологовмісту сушильного агента при проходженні через сушильну камеру, кг_{вл}/кг_{с.а}; C_3 – теплоємність зернової маси кДж/кг·К.

Вираз для коефіцієнта використання енергії (1) після математичних перетворень, з урахуванням особливості організації технологічного процесу сушіння для кожного типу сушарок має вигляд (4):

$$\eta_{\text{cy}} = \frac{\rho_{\text{см}} r(t_m) \Delta d_{\text{СК}}}{K(h_2 - h_0)} (\varepsilon_{\text{TH}}^p - 1). \quad (4)$$

Вираз коефіцієнта використання зовнішньої енергії для сушарок камерного та конвеєрного типу є однаковим. Відмінності, що визначені технологією процесу сушіння, враховані у відповідних виразах коефіцієнта рециркуляції сушильного агента. Це підкреслює, що основним фактором, який впливає на ефективність процесу, є технологічні особливості сушіння, зокрема температурний режим, вологість сушильного агента на вході та відповідні коефіцієнти рециркуляції. Такі параметри, як продуктивність, завантаження сушарки та витрати повітря на сушіння, не мають суттєвого впливу на результат.

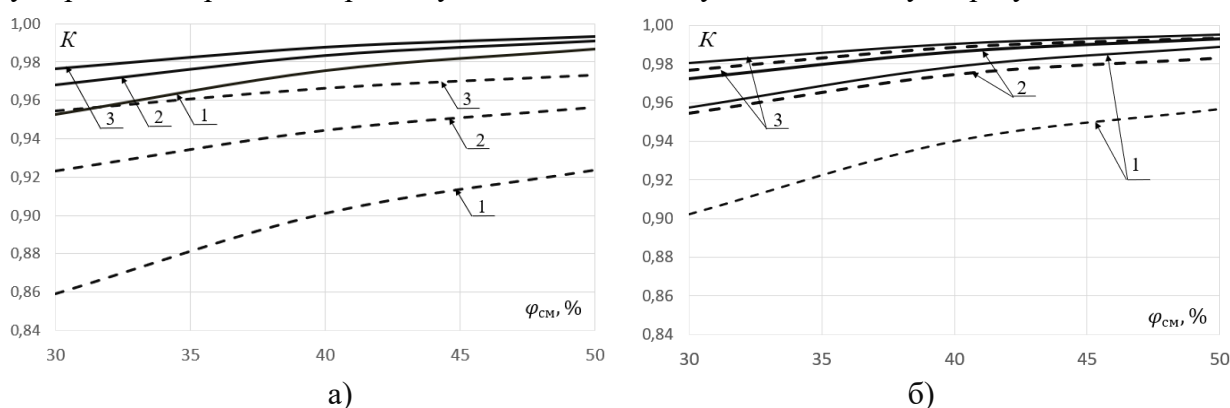


Рисунок 1 – Графік залежності коефіцієнта рециркуляції від відносної вологості сушильного агента $\varphi_{\text{см}}$ при різних температурах сушильного агента при $\Delta t_{\text{СК}} = 5^\circ \text{C}$ (суцільні лінії – теплонасосні сушарки, пунктирні лінії – традиційні сушарки): а) камерна СУ; б) конвеєрна СУ; 1 – $t_1 = 45^\circ \text{C}$; 2 – 55°C ; 3 – 65°C

Виконано числові розрахунки для камерних та конвеєрних сушарок для насіннєвого зерна високої якості з низькоінтенсивним процесом сушіння з певними вихідними даними та допущеннями. Результати розрахунків (рис. 1) показали, що коефіцієнти рециркуляції

збільшуються при підвищенні вологості агенту та зниженні його температури на вході. При цьому абсолютні значення коефіцієнтів для теплонасосних сушарок практично не залежать від типу установки. Також з рисунка 1 видно, що коефіцієнти рециркуляції для теплонасосних сушарок камерного та конвеєрного типу майже ідентичні та значно вищі порівняно з традиційними сушарками і зростають при зростанні вологості. Це пояснюється тим, що в традиційних сушарках значна частина відпрацьованого сушильного агенту видаляється для виведення випареної вологи, що вимагає підмішування свіжого повітря та додаткових витрат енергії на його нагрів. У теплонасосних сушарках відпрацьований агент залишається в межах циклу, а волога видаляється у випарнику теплового насоса у вигляді конденсату.

На рис. 2 представлені результати розрахунків коефіцієнтів використання зовнішньої енергії в процесі сушіння.

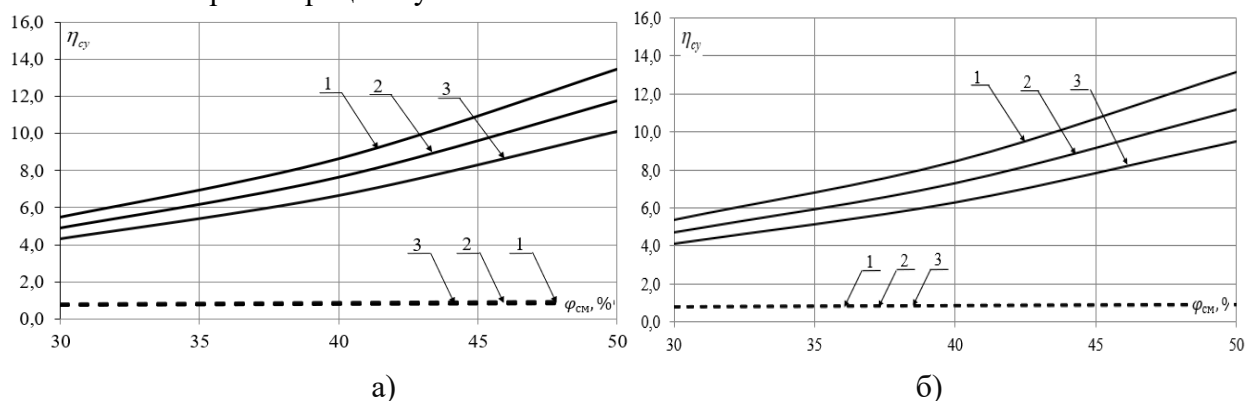


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта використання енергії сушарок зерна з рециркуляцією сушильного агенту від відносної вологості сушильного агенту $\varphi_{\text{ср}}$ при $\Delta t_{\text{ск}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ для різних температури сушильного агенту (суцільні лінії – теплонасосні сушарки, пунктирна лінія – традиційні сушарки): а) камерна СУ; б) конвеєрна СУ; 1 – $t_1 = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Висновки. Результати чисельних розрахунків показали, що коефіцієнт використання енергії для теплонасосних сушарок камерного та конвеєрного типу багаторазово перевищує відповідні його значення для традиційних сушарок, збільшується при збільшенні відносної вологості і зменшенні температури сушильного агенту в сушильній камері і практично не залежить від типу теплонасосної сушарки, що свідчить про вирішальну роль коефіцієнта рециркуляції в підвищенні енергоефективності теплонасосних сушарок.

Перелік посилань:

1. Tao Huang, Shiqing Guo, Wanting Li, Changling Wu, Yongzhu Zhang, Hao Hu, Feng hua Wu, Xingquan Liu. (2024) Temporal and spatial variation of bacterial and fungal communities in rice grains during depot storage. LWT – Food Science and Technology. Vol. 196, 15 March. Article 115842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115842>
2. Jiyu An, Huanxiong Xie, Jianchun Yan, Hai Wei, Yanghua Wu, Xuan Liao. (2024) A review of applications of energy analysis: Grain, fruit and vegetable drying technology. Energy Reports. Vol. 12, December. Pages 5482–5506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.11.037>
3. Li Jin Goh, Mohd Yusof Othman, Sohif Mat, Hafidz Ruslan. (2011) Review of heat pump systems for drying application. (2011) Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 15, Issue 9, December, Pages 4788-4796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.072>
4. Безродний М.К., Кутра Д.С. Ефективність застосування теплових насосів у установках сушіння деревини: моногр. К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 240 с.
5. Безродний М.К., Кутра Д.С., Вовк В.В. (2012) Термодинамічний аналіз теплонасосних сушильних установок для сушіння зерна. Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць. – Випуск 4. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія. с. 27–40. Доступ: https://nmetau.edu.ua/file/ttpt_2012_full.pdf.

¹ Аспірант 1 курсу Ляшенко А.М.

¹ Доц., к.т.н. Притула Н.О.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=VaBr8T0AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

КОНДЕНСАЦІЙНЕ ОСУШЕННЯ ПОВІТРЯ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Постановка проблеми та її актуальність. Зайва вологість у виробничих і складських приміщеннях може призвести до численних небажаних наслідків. Серед них – зниження точності роботи обладнання, корозія металевих елементів, псування медикаментів і продуктів харчування під час зберігання, утворення конденсату та поява плісняви на поверхнях. Це негативно впливає на якість продукції, сприяє пошкодженню трубопроводів, скорочує термін служби обладнання і загальну надійність виробничих процесів [1,2].

Системи кондиціювання повітря споживають близько 30–40 % від загального обсягу енергії, що використовується в промислових будівлях. При цьому на процес осушення в системах охолодження припадає від 30 % до 50 % енергоспоживання [3]. Вибір ефективної технології осушення дає змогу значно знизити витрати енергії та оптимізувати ресурси під час реалізації інженерних проектів.

Аналіз останніх досліджень. Найпоширенішим методом зниження рівня вологості є використання системи конденсаційного осушення, в яких зайва волога видаляється в результаті охолодження повітря в поверхневому теплообміннику до температури, нижчої за точку роси. Головною перевагою подібних систем є їхня відносно проста конструкція та можливість одночасного здійснення процесів охолодження й осушення в одній пристрої. Проте є певні обмеження: температура точки роси повітря на виході з теплообмінника не може опускатися нижче 0 °С, оскільки це призведе до утворення інею на змійовику. Крім того, температура повітря після охолоджувального змійовика часто буває нижче необхідної, що вимагає додаткового підігріву повітря перед його подачею в приміщення [4]. Вказані фактори знижують загальну енергетичну ефективність процесу підготовки повітря.

Зазвичай мінімальна досяжна температура при охолодженні повітря в поверхневих апаратах становить близько 5 °С [4], що встановлює межу продуктивності системи конденсаційного осушення: вологовміст повітря можна знизити до рівня 5 г/кг_{сух.пов} (рис. 1). Цього достатньо для більшості типових систем кондиціювання (рис.1), а для приміщень із спеціальними умовами (коли потрібне більш глибоке осушення) застосовують роторні або абсорбційні системи [1, 2].

Формулювання мети. В роботі розглядаються особливості реалізації осушення повітря в традиційних поверхневих апаратах для промислового застосування. Наведено обмеження для подібних осушувачів та окреслено шляхи підвищення їх ефективності.

Основна частина. В процесі контакту з поверхнею, температура якої нижча за точку випадання конденсату ($t < t_p$) одночасно з охолодженням відбувається також і конденсація вологи (рис. 1). Цей процес зображується на h,d -діаграмі у вигляді прямої, що з'єднує точку з початковими параметрами повітря (точка А) з відповідною температурою на лінії насичення $\phi = 100\%$, що відповідає температурі поверхні теплообмінника.

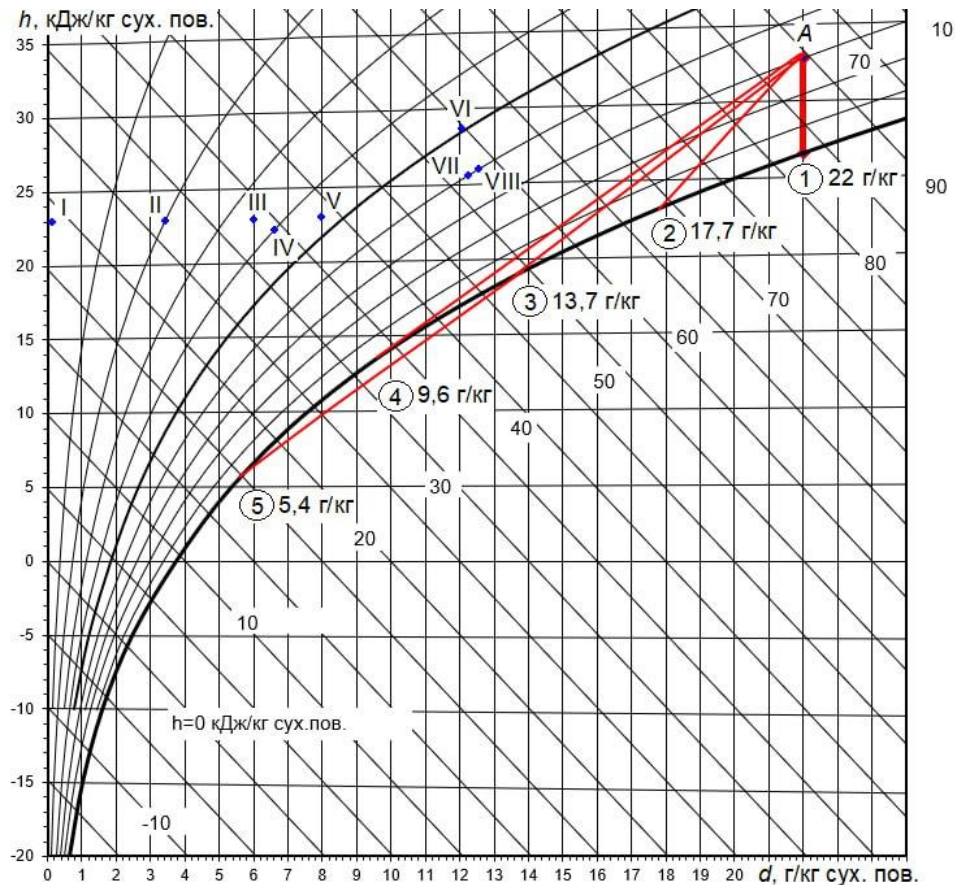


Рисунок 1 – Процеси осушення повітря в поверхневому теплообміннику в h,d -діаграмі та типові параметри повітря для різних технологічних процесів [2]: I – приміщення для наповнення електролітом літєвих батарей; II – прокатка катода літєвої батареї; III – фармацевтичне виробництво; IV – харчова промисловість; V – друкарня; VI – текстильна фабрика; VII – зварювальний цех; VIII – цех збирання автомобілів

Температурі точки роси t_p відповідає точка 1 на рис.1, а найбільша осушувальна здатність повітроохолоджувача буде для випадку А-4, коли пряма процесу торкається по дотичній до лінії насичення [4]. Якщо при зниженні температури поверхні теплообмінника пряма процесу на h,d -діаграмі перетне лінію $\phi = 100\%$ (точка 5), то в результаті реальний вологовміст зміщується праворуч (точка 3) і здатність до осушення апарата, віднесена до холодопродуктивності буде зменшуватися [4].

Величина відведеної в процесі охолодження теплоти Q та кількість сконденсованої вологи W визначаються відповідними рівняннями.

$$Q = G_{\Pi} \Delta h, \quad (1)$$

$$W = G_{\Pi} \Delta d, \quad (2)$$

де G_{Π} – масова витрата повітря, що проходить через апарат в процесі його обробки, кг/с; Δh_{Π} і Δd_{Π} – різниці кінцевих і початкових значень ентальпій, кДж/кг_{сух.пов.}, і вологовмісту повітря, кг/кг_{сух.пов.}, відповідно.

Для того, щоб уникнути повторного нагріву повітря після його осушення, потрібно намагатися, щоб промінь процесу був якомога ближче до заданих параметрів в приміщенні. Найпростішим способом зменшити енергетичні затрати на процес осушення є підмішування повітря з приміщення до свіжого повітря. Проте, на промислових підприємствах дуже часто сантехнічні вимоги забороняють рециркуляцію повітря в приміщення, а встановлення поверхневих регенераторів дозволяє утилізувати лише явну складову теплоти [4].

Додаткового споживання на повторний нагрів можна уникнути, охолоджуючи та осушуючи лише частину повітря, яке потім змішується із свіжим необробленим. Ця концепція використання байпасу на теплообміннику охолодження була проаналізована, наприклад, в роботах [5, 6]. Байпасування повітря зменшує перепад тиску в системі (частина повітря оминає охолоджувач), що зменшує затрати електроенергії на вентиляцію. З іншого боку, використання байпасу можливе лише в разі часткового теплового навантаження [5].

Основним недоліком такого способу є ускладнення механізмів керування. Класичний підхід зазвичай реалізується двома окремими контролерами, один для вологості та інший для температури повітря [5]. У випадку використання байпасу керування змінюється, оскільки один процес регулює одночасно температуру та вологість повітря. Тобто потрібно постійно точно контролювати частку потоку повітря, що проходить через байпас.

Для розробки та аналізу подібних способів керування необхідно розробити модель теплообмінника з байпасом. Процес охолодження з одночасним випаданням вологи є найскладнішою частиною системи ОВіК, оскільки процес сильно залежить від конструктивних особливостей теплообмінника: кількості рядів, кроку труб, параметрів оброблення та ін. Фактично основним способом побудови математичної моделі залишається експеримент для кожного конкретного теплообмінника, що додатково ускладнює моделювання процесів.

Висновки

Для зменшення споживання енергії в традиційних системах конденсаційного осушення повітря можна застосовувати часткове байпасування повітря, теоретично воно дозволяє зменшити споживання енергії на повторне нагрівання та створює економічно ефективнішу та екологічно чистішу технологію. Для здійснення аналізу такої системи, в першу чергу, потрібно побудувати модель поверхневого осушувача та вирішити питання одночасного керування двома змінними: температурою та вологістю. Цьому будуть присвячені наступні дослідження.

Перелік посилань:

1. Qunli Zhang, Yanxin Li, Qiuyue Zhang, Fengge Ma, Xiaoshu Lü Application of deep dehumidification technology in low-humidity industry: A review / Renewable and Sustainable Energy Reviews 193 (2024) 114278 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114278>
2. Xing Su, Yining Geng, Lei Huang, Shangao Li, Qinbao Wang, Zehan Xu, Shaochen Tian Review on dehumidification technology in low and extremely low humidity industrial environments Energy 302 (2024) 131793 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131793>
3. Galitsky C, Galitsky C, Worrell E. Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the vehicle assembly industry: an energy star guide for energy and plant managers. 2008. United States. DOI:10.2172/927881
4. Липа О. І. Кондиціонування повітря. Основи теорії. Сучасні технології обробки повітря. – Одеса: ОДАХ, вид-во ВМВ, 2010. – 607 с. – ISBN 978-966-413-146-6.
5. Kusche S. Energy optimised control of the dehumidification process in HVAC systems. 2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT'20), Prague, Czech Republic / June 29 – July 2, 2020
6. Goldschmidt N, Schulte H. Model-based Fuzzy Control of Air-Conditioning Systems using Air Bypass for Optimized Dehumidification. IFAC-PapersOnLine, Volume 50, Issue 1, July 2017, Pages 4203–4208 <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.814>

¹ Аспірант 1 курсу Теличко І.В.¹ Доц., к.т.н. Серета В.В.<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=ua&user=-a6E3eMAAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОСУШУВАЧІВ ДЛЯ ТЕРМІЧНИХ ОПРІСНЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Постановка проблеми та її актуальність. Проблема зникнення запасів прісної води стає все більш актуальною через виснаження природних джерел та забруднення води. Це особливо критично для посушливих регіонів, де доступ до прісної води обмежений. Одним із рішень є технологія зволоження осушення повітря (HDH), яка дозволяє отримувати прісну воду з морської. Ця система є енергоефективною та перспективною для регіонів з доступом до морської води, допомагаючи зменшити залежність від традиційних методів опріснення.

Аналіз останніх досліджень. Одним з напрямків дослідження ефективності систем HDH є дослідження її основних компонентів двох теплообмінників які виконують функції осушувача та зволожувача. Вплив зволожувача на ефективність установки було розглянуто в [1]. В осушувачі основними показниками є площа теплообміну та конструкція теплообмінника.

Формулювання мети. Провести аналіз існуючих конструкцій осушувачів, що застосовуються в HDH-системах, виявити їхні ключові переваги та недоліки, а також оцінити й порівняти вплив особливостей конструкції теплообмінників на продуктивність HDH-установок.

Основна частина. Показниками ефективності осушувачів є площа теплообміну (A_{cond}), швидкість випаровування (Evaporation Rate - ER), витрата повітря ($G_{\text{пов}}$) та води ($G_{\text{в}}$).

Швидкість випаровування (ER) – це відношення продуктивності установки ($G_{\text{пов}}$) до площі поверхні осушувача (A_{cond}):

$$ER = G_{\text{пов}} / A_{\text{cond}}. \quad (1)$$

У праці [2] досліджували HDH систему опріснення води де у якості осушувача був обраний компактний теплообмінник з оребреними трубками у яких протікає вода з витратою 2700 кг/год, з фронтальним перерізом 0,56×0,38 м та загальною площею теплообміну близько 13 м². Трубки виготовлені з міді, а ребра – з алюмінію.

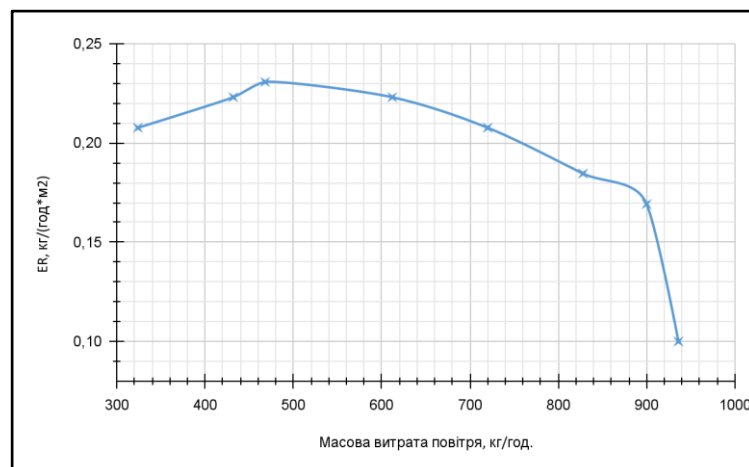


Рисунок 1 – Графік залежності ER від витрати вологого повітря

У [3] автори досліджували сонячну HDH систему опріснення води. Теплообмінник газо-рідинний, вода протікає вгору через 105 вертикальних труб, та повітрям, що проходить через 57 горизонтальних ребер. Загальна площа теплообміну осушувача становить 3,5 м².

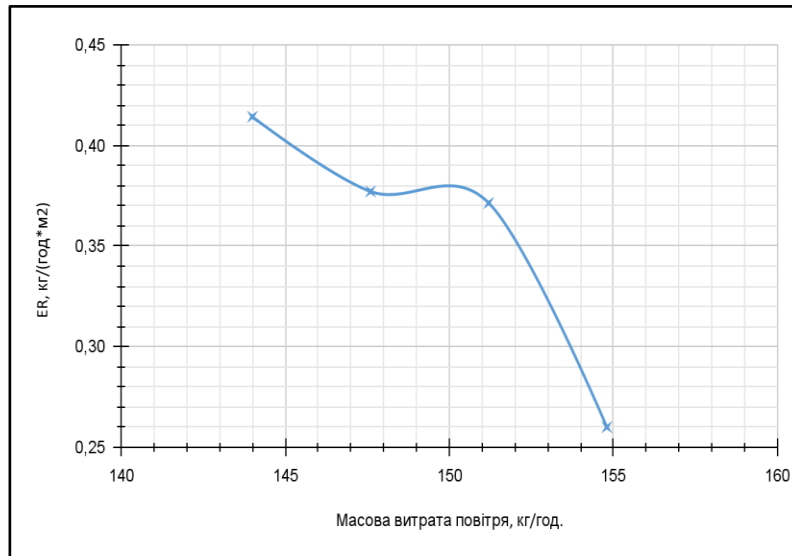
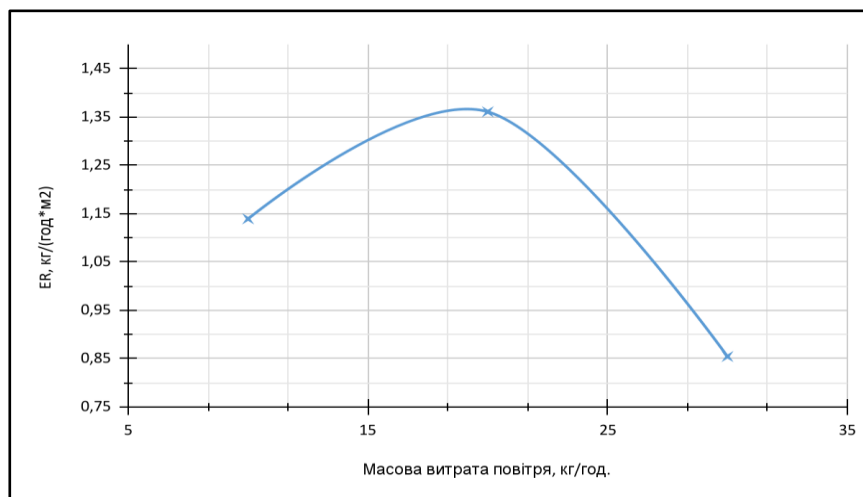


Рисунок 2 – Графік залежності ER від витрати вологого повітря

З рис. 2 видно, що максимальне значення ER становить 0,41 кг/(год·м²), а продуктивність системи при цьому становить 1,45 кг/год, максимальні показники були зафіксовані при витраті повітря 144 кг/год і масовій витраті води 43,2 кг/год.

У праці [4] автори досліджували сонячну HDH система опріснення води із субатмосферним тиском у зволожувачі. Охолодження повітря та конденсація вологи з повітря відбувається в осушувачі типу труба в трубі з загальною площею теплообміну 1,58 м². Експерименти проводили за постійних витрат повітря 10 кг/год та при змінних тиску у зволожувачі (90–50 кПа) та витраті солоної води яка відповідно складає 10, 20 та 30



кг/год.

Рисунок 3 – Графік залежності ER від витрати солоної води

З рис. 3 видно, що максимальне значення ER становить 1,36 кг/(год·м²), а продуктивність установки досягає 2,15 кг/год при тиску 50 кПа у зволожувачі та співвідношенні витрат води до повітря, наближеному до 2.

Висновки. Найбільш ефективними є осушувачі типу мідна трубка (Copper Coil) завдяки простій конструкції та високій теплопровідності матеріалу. Пластинчасті осушувачі мають найнижчий ER через неефективне використання площі теплообміну, і зазвичай використовуються в системах ОВіК з більшими витратами повітря, ніж у маломасштабних системах HDH. Показники ефективності наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Показники роботи осушувачів

Тип осушувача	Посилання	Продуктивність, кг/год	Площа, м ²	ER, кг/(год·м ²)	Витрата повітря, кг/год	Витрата води, кг/год	MR
Пластинчастий	[2]	3	13	0,23	468	1908	4,1
Мідний змійовик	[3]	0,425	0,603	0,7	14,33	-	-
Труба в трубі	[4]	2,15	1,58	1,36	10	20	2

Перелік посилань:

1. Середя В.В., та ін., «Енергетичні показники термічних опріснювальних систем із зволожувачами різних типів», Вісник Вінницького політехнічного інституту, Грудень, 2023. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-171-6-14-22>.
2. Hossam A. Ahmed et al., «Experimental investigation of humidification-dehumidification desalination system with corrugated packing in the humidifier», Desalination, vol. 410, no. 15, pp. 19–29, May, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.036>.
3. F. F. Tabrizi et al., «Experimental study of a cascade solar still coupled with a humidification–dehumidification system», Energy Conversion and Management, vol. 115, no. 1, pp. 80–88, May, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.006>.
4. Z. Rahimi-Ahar et al., «Experimental investigation of a solar vacuum humidification-dehumidification (VHDH) desalination system», Desalination, vol. 437, no. 1, pp. 73–80, July, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.03.002>.

¹ Аспірант 2 курсу Заболотний О.А.¹ Доц., к.т.н. Соломаха А.С.<https://scholar.google.com/citations?user=ZqcAQ-oAAAAJ&hl=uk>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РІДКИХ АБСОРБЕНТІВ ДЛЯ УЛОВЛЕННЯ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ У ВІДЦЕНТРОВОМУ АПАРАТІ

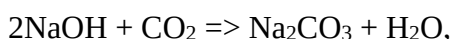
Постановка проблеми та її актуальність Боротьба із викидами діоксиду вуглецю – один із невід’ємних кроків для переходу до низьковуглецевої енергетики. Існують різні способи зменшення концентрації CO₂ в атмосфері, зокрема підвищення енергоефективності, перехід на відновлювані джерела енергії та розширення лісових масивів. Однак ці заходи не завжди можуть повністю компенсувати викиди промислових підприємств. Одним із перспективних сучасних рішень є уловлення вуглецю безпосередньо з газових потоків за допомогою рідких абсорбентів, що дозволяє значно знизити шкідливий вплив важкої промисловості на довкілля.

Аналіз останніх досліджень. У актуальних дослідженнях учені досліджували ефективність використання рідких абсорбентів для уловлення CO₂, виділяючи найбільш поширені та найбільш ефективні. Серед них найбільшу увагу приділяють водним розчинам моноетаноламіну (MEA), піперазину (PZ) та гідроксиду натрію (NaOH), які демонструють високу здатність до хімічного зв’язування CO₂. Проте їх застосування у традиційних газорідних контактерах має недоліки: висока корозія і великі габарити обладнання.

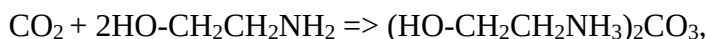
Для покращення масопереносу розглядається використання обертових насадкових апаратів, що створюють відцентрове прискорення, формуючи тонкі рідинні плівки та дрібні краплі. Це дозволяє значно збільшити ефективність масопереносу, зменшуючи об’єм обладнання і витрати.

Формулювання мети. Існує багато різних рідких абсорбентів, які відрізняються своїми фізико-хімічними властивостями, ефективністю поглинання CO₂ та способами регенерації. Метою даної роботи є порівняння рідких абсорбентів за їх властивостями та ефективністю поглинання діоксиду вуглецю, а також дослідження економічної доцільності використання кожного з них.

Основна частина. Найбільш поширеним рідким абсорбентом що використовується є NaOH. І хоча він не підлягає регенерації у звичайних умовах, його низька ціна та висока здатність поглинання CO₂ мають позитивний вплив на доцільність використання. Теоретично, для уловлення однієї тони діоксиду вуглецю необхідно 0,9 тон NaOH, тоді як для уловлення тієї ж кількості CO₂ необхідно 1,39 тон MEA [1]. Слід зазначити, що NaOH є менш ефективним у тривалих процесах, адже його обслуговування полягає у заміні абсорбента, оскільки його дуже важко регенерувати традиційним термічним способом, на відміну від моно-етанол-аміну та піперазину. Хімічна реакція уловлення має наступний вигляд:



MEA забезпечує швидку кінетику поглинання і його можна термічно регенерувати. Але моно-етанол-амін має ряд своїх недоліків у порівнянні із гідроксидом натрію, а саме: вища вартість, та висока схильність до термічної деградації, що обмежує його тривале використання у якості абсорбенту [2]. Реакція поглинання CO₂ із утворенням карбонату моно-етанол-амонію представлена нижче:



Піперазин, завдяки підвищеній стабільності, може виступати як активатор для аміних розчинів, знижуючи енергетичні витрати на регенерацію. На відміну від МЕА, піперазин стійкий до термічної деградації, а також має менший вплив на корозію обладнання при високих температурах та в умовах окислення, що зменшує матеріальні та енергетичні витрати [3]. У порівнянні із NaOH та МЕА, піперазин значно дорожчий, що може впливати на економічну доцільність використання. Реакція уловлення із утворенням карбонату піперазинію наведена нижче:



Більш детальні дані по вищезазначеним абсорбентам наведені у табл. 1.

Таблиця 1 - Техніко-економічна характеристика абсорбентів

Абсорбент	Ціна за 1л, грн	Поглинання на 1т CO ₂ [4], т	Робоча температура, К	Температура регенерації, °С
NaOH	75	0,9	273–313	800–1000
MEA	250	1,39	293–313	120
PZ	–	1,95	303–323	110

Процес регенерації абсорбентів є ключовим етапом у технології уловлення CO₂, адже він дозволяє відновити абсорбент і використовувати його повторно. Регенерація полягає в тому, щоб видалити поглинений CO₂, що утворюється у вигляді карбамату або бікарбонату, і відновити абсорбент до його первісного стану. Цього можна досягти підвищенням температури сполуки для ослаблення зв'язку між CO₂ та амінами.

NaOH і CO₂ утворює карбонат натрію Na₂CO₃. Процес розкладу на початкові складові потребує високих температур (800–1000 °С), що робить регенерацію гідрооксиду натрію економічно недоцільною[4]. MEA та PZ у свою чергу мають подібний процес регенерації, що включає підвищення температури до 100-120°С. Це дозволяє розірвати зв'язок аміну та CO₂ і розкласти сполуку на початкові складові [5].

Із процесом регенерації має місце деградація абсорбенту. Існує декілька видів деградації: термічна, окислювальна та реакційна.

Термічна деградація полягає у розкладенні абсорбенту на аміни та інші сполуки при високій температурі(+120 °С), що може негативно впливати на ефективність абсорбції у майбутньому. Окислювальна деградація відбувається через вплив кисню з повітря, що приводить до утворення органічних кислот (наприклад ацетатна кислота) та інших побічних продуктів. Ці сполуки можуть посилювати корозію обладнання і знижувати ефективність поглинання. Реакційна деградація відбувається через карбамати, що не розклались у процесі регенерації і залишились у розчині. Із часом концентрація таких з'єднань збільшується, що потребує заміни абсорбента [6].

MEA та PZ – аміни, процес регенерації та деградації у них схожий. Але на відміну від MEA піперазин більш стабільний, стійкий до деградації, та потребує менші температури для регенерації, що зменшує енерговитрати.

Таким чином, всі наведені абсорбенти використовуються у традиційних системах уловлення діоксиду вуглецю, таких як насадкові колони. Використання відцентрової насадки замість насадкової колони дозволить підвищити коефіцієнт масообміну та прискорити процес уловлення, що у свою чергу дозволить більш ефективно використовувати абсорбент, і зробити процес уловлення більш вигідним з економічної точки зору.

Висновки. Можна зазначити, що використання рідких абсорбентів у відцентровому апараті може значно підвищити ефективність процесу масообміну. Абсорбенти у свою чергу мають різні фізико-хімічні характеристики. Аналіз показав, що використання рідкого абсорбенту у відцентровому апараті залежить від необхідних об'ємів уловлення та величини капіталовкладень. Для нетривалих процесів з економічної та енергетичної точки зору буде доцільно використовувати NaOH, через високу ефективність та ціну. Для тривалих процесів рекомендується використовувати піперазин, через стійкість до деградації та невеликих затрат на регенерацію. Як аналог піперазину рекомендується використовувати MEA, не зважаючи на меншу стійкість до деградації, та більші енергетичні затрати на регенерацію, цей абсорбент доцільно використовувати з економічної точки зору.

Перелік посилань:

1. Gul A., Tezcan Un U., Carbon Dioxide Absorption Using Different Solvents (MEA, NaOH, KOH, and $Mg(OH)_2$) in Bubble Column Reactor. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol. 12, no. 2, pp. 418–427, 2023, doi: 10.17798/bitlisfen.1230356.
2. Tontiwachwuthikul P., Meisen A., Jim Lim C., CO_2 absorption by NaOH, monoethanolamine and 2-amino-2-methyl-1-propanol solutions in a packed column. Chemical Engineering Science, vol. 47, issue 2, p. 381–390, February 1992.
3. Freeman S., Rochelle G., Thermal degradation of piperazine and its structural analogs. Energy Procedia, vol. 4, p. 43–50, 2011.
4. Pashaei H., Zarandi M. N., and Ghaemi A., «Experimental study and modeling of CO_2 absorption into diethanolamine solutions using stirrer bubble column,» Chem. Eng. Res. Des., vol. 121, pp. 32–43, 2017.
5. Yuan Y. and Rochelle G. T., « CO_2 absorption rate in semi-aqueous monoethanolamine», Chem. Eng. Sci., vol. 182, pp. 56–66, 2018.
6. Rochelle G., Thermal degradation of amines for CO_2 capture. Current Opinion in Chemical Engineering, vol. 1, issue 2, p. 183–190, May, 2012.
7. Fredriksen S.B., Klaus-J. Jens, Oxidative Degradation of Aqueous Amine Solutions of MEA, AMP, MDEA, PZ: A Review. Energy Procedia, vol. 37, p 1770–1777, 2013.

¹ Магістрант 2 курсу Мельник В.О.

¹ Доц., к.т.н. Соломаха А.С.

<https://scholar.google.ru/citations?user=ZqcAQ-oAAAAJ&hl=uk&oi=sra>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

РОЗРОБКА СТЕНДУ НА ОСНОВІ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ

Постановка проблеми та її актуальність

Зростання світового використання енергії разом із постійним збільшенням викидів CO_2 в атмосферу інтенсифікує розвиток альтернативних джерел енергії, в тому числі біопалива. Пошук дешевих, відновлюваних джерел енергії є однією з найперспективніших тем останніх років. На сьогодні біодизель є доволі розвинутою технологією отримання біопалива в промислових масштабах. Але ціна на таке паливо все ще вище в порівнянні з нафтовим, а теплотворна здатність менше. Популярним способом покращити паливні характеристики є підмішування біодизеля до звичайного дизельного палива [1]. Для стабільного горіння важливим моментом є отримання однорідної емульсії, чого можна досягти, наприклад, використовуючи кавітацію.

Аналіз останніх досліджень. Кавітаційна установка є перспективним способом змішування нафтового палива з біопаливом [2–4]. Хоча, найчастіше в технологічних процесах кавітація є несприятливим явищем, але її можна ефективно використати для утворення однорідної емульсії. Кавітацію можна поділити на 4 типи: акустична, гідродинамічна, оптична та кавітація частинок [4]. Хоча в промисловості найбільш розповсюдженим є механічний спосіб емульгування, але для отримання палива саме гідродинамічна кавітація має свої переваги, а саме: відносно невеликі витрати на виготовлення та монтаж обладнання, простота конструкції, легкість використання та обслуговування [3]. Кавітаційне сопло типу трубки Вентурі найпростіше в будові та відносно легке у виготовленні. У багатьох статтях розглянуто основні методи отримання паливної емульсії з використанням сопла Вентурі для гідродинамічної кавітації [5–7].

Формулювання мети. Розробка та опис стенду для дослідження гідродинамічної кавітації, аналіз отриманих результатів.

Основна частина. Основним елементом стенду є кавітаційний пристрій у вигляді сопла Вентурі (див. рис.1). Паливо з ємності 1 насосом 2 подається на кавітатор 5, після чого утворена емульсія знову надходить до ємності 1. Частина емульсії подається до споживача. Два манометри вимірюють тиск на вході в сопло та в найвузкій його частині, що дозволяє розрахувати безрозмірне кавітаційне число.

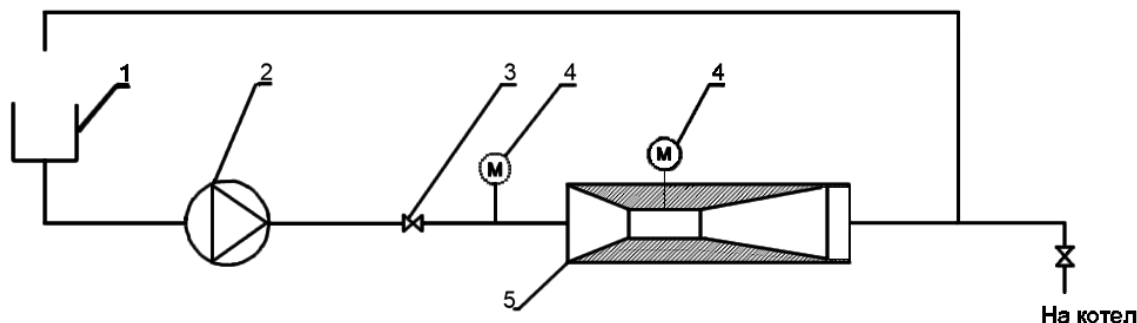


Рисунок 1 – Принципова схема установки з отримання емульсії методом гідродинамічної кавітації в трубці Вентурі: 1 – ємність з сумішшю води та дизеля; 2 – мембранний насос; 3 – регулюючий клапан; 4 – манометр; 5 – кавітатор

При надходженні в звужуючий пристрій швидкість суміші зростає, а її місцевий тиск зменшується. Кавітація починається, коли тиск суміші падає нижче тиску насичення пари, що призводить до утворення парових каверн, які схлопуються при виході з сопла. В результаті цього відбувається ефективне змішування компонентів початкового розчину.

Зовнішній вигляд стенду наведено на рис. 2.



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд кавітаційного пристрою із встановленими вимірювальними приладами

Ступінь кавітації визначають за допомогою числа кавітації [2]:

$$C_v = \frac{P_2 - P_v}{\frac{1}{2} \rho v^2}.$$

Воно залежить від перепаду тиску на соплі, властивостей та швидкості руху рідини – відношення перепаду тиску до динамічного напору в найвужчому місці. Оптимальні умови для кавітації, коли $C_v < 1$.

Сопло типу Вентурі було виготовлено на основі рекомендацій, наведених в літературних джерелах [5–7]. В результаті проведення тестових досліджень на воді було показано можливість досягнення числа кавітації $C_v < 0,8$, що теоретично повинно бути достатньо для отримання емульсії палива.

Висновки. Спроектоване сопло було перевірено на експериментальному стенді на воді, було досягнуто необхідне число кавітації. В наступних дослідженнях планується перевірити його роботу на реальній паливній суміші.

Перелік посилань:

1. Oo Y.M., Legwiriyaikul A., Thawornprasert J., Somnuk K., Production of diesel–biodiesel–water fuel nanoemulsions using three-dimensional printed rotor–stator hydrodynamic cavitation, *Fuel* 317 (2022), 123445, [https://doi.org/ 10.1016/j.fuel.2022.123445](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123445).
2. Teran R., Hilaes, Ramos L., da Silva S.S., Dragone G., Mussatto S.I., Santos J.C.D., Hydrodynamic cavitation as a strategy to enhance the efficiency of lignocellulosic biomass pretreatment, *Crit. Rev. Biotechnol.* 38 (2018) 483–493, <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1369932>.
3. Gogate P.R., Pandit A.B., Engineering design methods for cavitation reactors II: Hydrodynamic cavitation, *AIChE J.* 46 (2000) 1641–1649, <https://doi.org/10.1002/aic.690460815>.
4. Gogate P.R., Shirgaonkar I.Z., Sivakumar M., Senthilkumar P., Vichare N.P., Pandit A.B., Cavitation reactors: Efficiency assessment using a model reaction, *AIChE J.* 47 (2001) 2526–2538, <https://doi.org/10.1002/aic.690471115>
5. Saharan V.K., 2016. Computational study of different venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices. *Journal of Hydrodynamics* 28, 293–305.
6. Liu X, Wu Z, Li B, Zhao J, He J, Li W, et al. Influence of inlet pressure on cavitation characteristics in regulating valve. *Eng Appl Comput Fluid Mech* 2020;14(1):299–310.
7. Bashir TA, Soni AG, Mahulkar AV, Pandit AB. The CFD driven optimisation of a modified venturi for cavitation activity. *Can J Chem Eng* 2011;89(6): 1366–75.

¹ Бакалаврант 3 курсу Руденко А.О.

¹ Доц., к.т.н. Боженко М.Ф.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ

Постановка проблеми та її актуальність. У приміщеннях житлових, громадських та промислових будівель мають підтримуватися необхідні метеорологічні умови, які визначаються санітарно-гігієнічними нормами для нормального самопочуття людини чи вимогами технологічного процесу, для забезпечення яких призначені системи опалення, вентиляції та кондиціонування [1]. До основних параметрів повітря, які повинні забезпечуватися у приміщеннях, відносяться температура, відносна вологість, чистота, швидкість (рухомість) тощо.

Видалення з приміщень забрудненого повітря та подачу до них свіжого навколишнього здійснюється за допомогою вентиляційних пристроїв, створюючи таким чином необхідний повітрообмін, який і призначений для забезпечення нормальних санітарно-гігієнічних умов для людей, що є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень. Системи вентиляції можуть бути місцевими та центральними. До способів організованого повітрообміну відноситься природна та вимушена вентиляція. Перша з них забезпечується за рахунок різниці густин зовнішнього та внутрішнього повітря, а також за рахунок вітрового тиску. В вимушених системах вентиляції повітря переміщується зовнішніми вентиляційними пристроями. Вимушені системи зазвичай влаштовуються для громадських та промислових будівель, природні – для житлових будівель та невеликих офісних приміщень.

Характерною особливістю житлових будівель з природною вентиляцією є те, що забруднене повітря видаляється через витяжні канали, а аерація повітря до приміщень здійснюється через отвори в огороженнях, відкриті фрамуги вікон тощо. Для покращення теплового комфорту у приміщеннях нових житлових будівель, а також при модернізації і у діючих встановлюються герметичні світлопрозорі конструкції. Відсутність нещільностей в цих конструкціях призводить до підвищення вологості в приміщеннях, виникненню цвілі на внутрішніх поверхнях огорожень та погіршення самопочуття мешканців. Для провітрювання приміщень потрібно регулярно упродовж доби відкривати фрамуги вікон, а це призводить до температурного дискомфорту у цей період, надходження забрудненого зовнішнього повітря та виникнення шуму.

Формулювання мети. В останні роки для покращення стану повітря приміщень в житлових та невеликих офісних будівлях використовуються наступні провітрювачі: припливні клапани, бризери, аерогівери, рекуператори. Метою роботи є аналіз переваг та недоліків кожного з них і вибір найбільш ефективних.

Основна частина.

Припливний клапан це пасивний вентиляційний пристрій, який встановлюється у верхній частині стулки герметичних металопластикових вікон. Перевагою є його компактність. Монтуються на нові або вже на встановлені вікна, але при цьому змінюється їх конструкція, що може порушити умови дії гарантії цих вікон. Клапан поставляється без фільтра; має можливість регулювати витрату повітря від 0 до 34 м³/год, яке здійснюється вручну. До недоліку відноситься небезпека його обмерзання в холодний період року при температурах зовнішнього повітря нижче мінус 5 °С.

Стіновий провітрювач – пластиковий повітропровід, який встановлюється в стіні. З зовнішнього боку повітропроводу встановлюється захисна решітка, а з внутрішнього – розподільувач повітря в приміщенні. Повітропровід шумо- теплоізолюється. Регулювання витрати повітря здійснюється за допомогою заслінки вручну або автоматично. До недоліків відноситься відсутність очищення повітря та його підігрів. В механічному стіновому провітрювачу встановлені повітряні фільтри, вентилятор і можливий електронагрівач. Повітропродуктивність таких пристроїв коливається від 10 до 150 м³/год.

На приплив, рідше на витяжку, працюють віконні або стінові клапани з активним вентилятором (*аерогівери*). Їх встановлюють у тому випадку, коли тільки витяжної вентиляції недостатньо. До недоліків відноситься наявність шуму та відсутність нагрівання повітря.

Технічною новинкою сьогодні є вентиляційна припливна установка *бризер* [2], який забезпечує, подачу, очищення та підігрів зовнішнього повітря, а також і рециркуляцію внутрішнього. В стіні приміщення робиться наскрізний отвір необхідного діаметру (наприклад, 132 мм), куди вставляється повітропровід (наприклад, діаметром 100 мм) з теплоізоляцією. На вхідному отворі повітропроводу розміщується заслінка, яка автоматично закривається при виключеному приладу. Сам бризер монтується на внутрішній стіні приміщення і з'єднується з припливним повітропроводом. Зовнішнє повітря через припливний клапан послідовно проходить багатоступеневу систему фільтрації (як правило, 3 – 4 ступені), потім підігрівається в керамічному повітронагрівачі (до температури 25 – 30 °С) і за допомогою вентилятора через припливні решітки подається до приміщення. До зовнішнього повітря може підмішуватися внутрішнє, тобто система працюватиме з рециркуляцією. При роботі, наприклад, бризер однієї з конструкцій, може забезпечити 6 режимів за повітропродуктивністю в інтервалі від 30 до 140 м³/год. До недоліку цього приладу відноситься підвищена витрата електроенергії на нагрівання повітря.

Одним з різновидів децентралізованих припливно-витяжних систем вентиляції для житлових приміщень є *рекуператор* [3]. Цей прилад складається з системи фільтрів, двох вентиляторів (витяжного та припливного), теплообмінника (пластинчастого, роторного, камерного тощо), півітрозабірного та повітророзподільчого пристроїв, встановлюється в стіні приміщення (рис. 1).

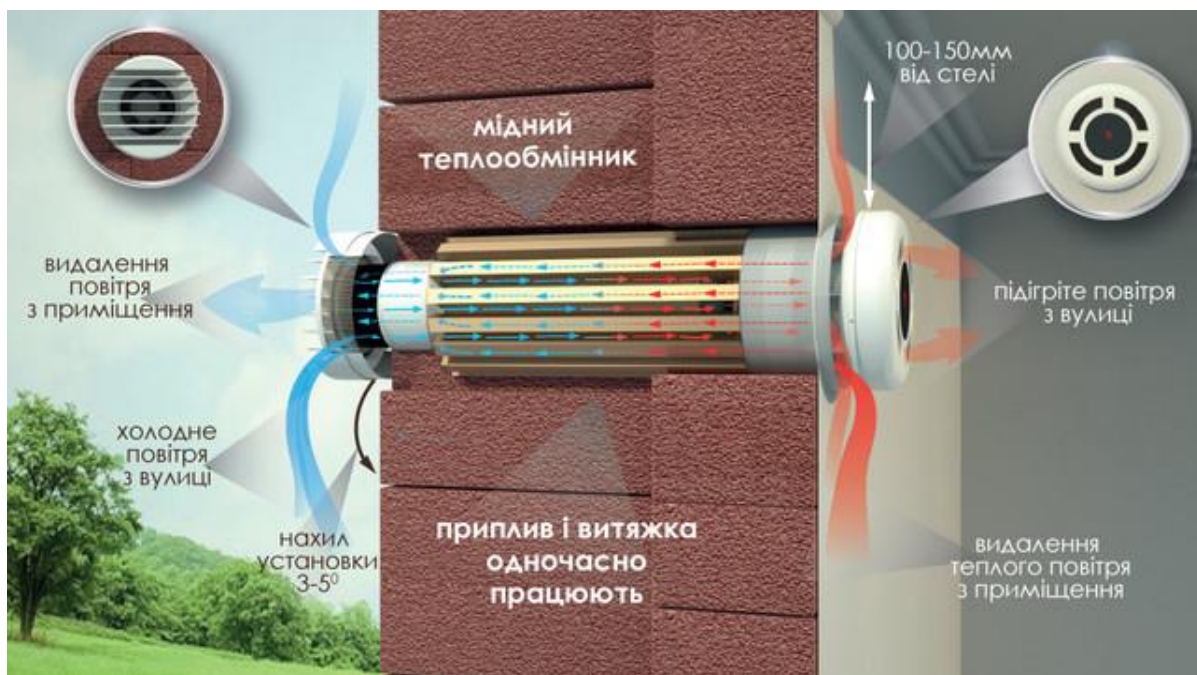


Рисунок 1 – Встановлення рекуператора в стіні приміщення

В холодний період року, наприклад, витягне повітря здійснює нагрів припливного повітря в теплообміннику, що зменшує витрату потоків теплоти для створення комфортних умов у приміщеннях від нагрівальних приладів системи опалення будівель. Ефективність рекуператорів може бути більшою за 90 %, що є дієвим енергозберігаючим фактором.

Наприклад, для однієї з кімнат квартири у м. Києві, де одночасно може знаходитися 3 людини, повітрообмін при нормативній витраті повітря на одну людину біля $30 \text{ м}^3/\text{год}$, складе $V = 90 \text{ м}^3/\text{год}$. Обираємо для цієї кімнати рекуператор максимальною повітропродуктивністю $110 \text{ м}^3/\text{год}$.

Кінцева температура припливного повітря, що нагрівається в рекуператорі, $^{\circ}\text{C}$, визначається за формулою [4]

$$t_{n2} = t_{n1} + \eta_{t_n} (t_{b1} - t_{n1}), \quad (1)$$

де t_{n1} – температура зовнішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$;

η_{t_n} – коефіцієнт температурної ефективності рекуператора;

t_{b1} – температура повітря, що видаляється з приміщення, $^{\circ}\text{C}$.

Беремо $t_{n1} = -22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (розрахункова температура зовнішнього повітря на опалення), $\eta_{t_n} = 0,9$, $t_{b1} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$, тоді $t_{n2} = 17,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Висновки. Аналіз використання в приміщеннях житлових та невеликих офісних будівель для покращення повітряного середовища провітрювачів різних типів (припливні клапани, бризери, аерогівери, рекуператори) показав, що найбільш ефективними з них є рекуператори. Ці прилади забезпечують не тільки ефективний повітрообмін та насичення повітря киснем, але і зберігають нормальний мікроклімат у приміщенні та здійснюють фільтрацію повітря від пилу і виконують роль вологопоглинача. Разом з тим в рекуператорах утилізується теплота витяжного повітря, яка використовується для нагрівання зовнішнього припливного повітря в високоефективних теплообмінниках. Розрахунки, виконані для одного з житлових приміщень будівлі в м. Києві показали, що при використанні рекуператора потік теплоти для нагрівання вентиляційного повітря може бути зменшений на 90 % порівняно з необхідним, що надходить від нагрівальних приладів.

Перелік посилань:

1. Боженко М.Ф. Системи опалення, вентиляції і кондиціювання 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.

2. Бризер. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://бризекс.пф/blog/brizer-что-это> (15.02.25).

3. Рекуператор. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ek.ua/ua/post/5820/534-air-r> (15.02.25).

4. Боженко М.Ф. Енергозбереження в теплопостачанні: навч. посіб./ М.Ф. Боженко, В.П. Сало. – Київ. : НТУУ «КПІ», 2008. – 268 с.

¹ Бакалаврант 3 курсу Сидоренко М.С.¹ Доц., к.т.н. Боженко М.Ф.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОТИ ВІДХІДНИХ ДИМОВИХ ГАЗІВ КОТЛІВ ДЛЯ НАГРІВАННЯ ВОДИ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ КОТЕЛЬНОЇ

Постановка проблеми та її актуальність. Теплопостачання житлових, громадських та виробничих будівель може здійснюватися від ТЕЦ; районних, квартальних (групових), індивідуальних котелень або теплогенераторних. ТЕЦ та районні котельні, які можуть бути промисловими, опалювальними та промислово-опалювальними, відносяться до централізованих джерел теплопостачання. Безперебійне і надійне теплопостачання споживачів з оптимальними експлуатаційними витратами за рахунок підвищення енергетичної ефективності встановленого обладнання є актуальною задачею сьогодення.

Аналіз останніх досліджень. Для наступного аналізу розглядається промислово-опалювальна пароводогрійна котельня (м. Київ), яка покриває навантаження у гарячій воді на опалення, вентиляцію і гаряче водопостачання споживачів $\Sigma Q = 24,5$ МВт температурним графіком (150 / 70) °С та парове навантаження $D_T = 18,9$ т/год. В котельні встановлено 4 водогрійних котли КВ-ГМ-6,5 та 3 парових котли ДЕ-6,5-14ГМ (табл. 1).

Таблиця 1 – Технічні характеристики обраних котлів [1]

Найменування характеристики	Позначення	Одиниця	Значення для котлів	
			КВ-ГМ-6,5	ДЕ-6,5-14ГМ
Температура відхідних димових газів	$t'_{г.і}$	°С	153	156
Витрата природного газу	$B_{к.і}$	м³/год	830	489
ККД	$\eta_{к.і}$	%	91,1	91

За результатами розрахунків теплової схеми котельні були отримані витрати потоків води власних потреб та їх параметри:

- Загальна витрата сирової води, що надходить на хімічну водопідготовку (ХВО), складає $\Sigma G_{с.в} = 5,4$ кг/с. Цей потік води перед ХВО нагрівається в пароводяному теплообміннику водяною парою після РОУ від $t'_{с.в} = 5$ °С до $t''_{с.в} = 25$ °С.

- Витрата хімічно підготовленої води, яка після першого ступеня ХВО надходить у деаератор підживлюваної води, складає $G'_{хво} = 2,7$ кг/с. Цей потік води нагрівається в охолоднику деаерованої води від $t''_{с.в} = 25$ °С до $T'_5 = 61,1$ °С.

- Витрата хімічно підготовленої води, яка після першого ступеня ХВО надходить у деаератор живильної води, складає $G'_{хво} = 1,8$ кг/с. Цей потік води нагрівається в охолоднику продувальної води від $t''_{с.в} = 25$ °С до $T_5 = 30,4$ °С.

Формулювання мети. Для підвищення ефективності котельні пропонується встановити за деякими котлами утилізатори теплоти димових газів (поверхневі калорифери), використавши їх для нагрівання води зазначених вище потоків води власних потреб:

- Сирової води витратою $\Sigma G_{с.в} = 5,4$ кг/с від $t'_{с.в} = 5$ °С до $t''_{с.в} = 25$ °С.

- Хімічно підготовленої води витратою $G'_{\text{хво}} = 2,7$ кг/с, що спрямовується в атмосферний деаератор підживлюваної води, від $t'_{\text{підж}} = 61,1$ °С до $t''_{\text{підж}} = 94$ °С.

- Хімічно підготовленої води витратою $G_{\text{хво}} = 1,8$ кг/с, що спрямовується в атмосферний деаератор живильної води, від $t'_{\text{жив}} = 30,4$ °С до $t''_{\text{жив}} = 94$ °С.

Основна частина. Можливу теплопродуктивність калориферних установок за димовими газами за кожним з котлів, кВт, визначають за формулою [2]

$$Q_{\text{гi}} = L_{\text{гi}}^{\text{с}} (h'_{\text{гi}} - h''_{\text{гi}}), \quad (1)$$

де $L_{\text{гi}}^{\text{с}}$ – масова витрата сухих продуктів згоряння, кг/с;

$h'_{\text{гi}}$ та $h''_{\text{гi}}$ – ентальпія продуктів згоряння на вході в калориферні установки та виході з них відповідно, кДж/кг с.г.

Масова витрата сухих димових газів на виході із котлів, кг/с [2]

$$L_{\text{гi}}^{\text{с}} = \frac{B_{\text{ки}}}{3600} G_{\text{г}}^{\text{с}}, \quad (2)$$

де $G_{\text{г}}^{\text{с}}$ – маса сухих продуктів згоряння, кг/м³.

Ентальпія продуктів згоряння на вході в калориферні установки, кДж/кг с.г [2]

$$h'_{\text{г}} = t'_{\text{г}} + (2500 + 1,97t'_{\text{г}}) d'_{\text{г}}, \quad (3)$$

де $d'_{\text{г}}$ – вологовміст продуктів згоряння, кг/кг с.г.

За заданим складом природного газу визначені величини $G_{\text{г}}^{\text{с}} = 13,82$ кг/м³ та $d'_{\text{г}} = 0,13$ кг/кг с.г, тоді згідно з формулами (2) і (3) для водогрійних котлів $L_{\text{г.в}}^{\text{с}} = 3,19$ кг/с і $h'_{\text{г.в}} = 517,2$ кДж/кг, а для парових - $L_{\text{г.п}}^{\text{с}} = 1,88$ кг/с і $h'_{\text{г.п}} = 521$ кДж/кг.

Калориферні установки будуть експлуатуватися в «сухому» режиму, тому попередньо беремо температуру димових газів на виході з них $t''_{\text{г}} = 60$ °С і за формулою вигляду (3) визначаємо ентальпію $h''_{\text{г}} = 400,4$ кДж/кг, тоді можлива теплопродуктивність калориферних установок за кожним з водогрійних котлів складе $Q_{\text{г.в}} = 372,6$ кВт, а за кожним з парових – $Q_{\text{г.п}} = 226,7$ кВт. Сумарна можлива теплопродуктивність калориферних установок при встановленні їх за всіма котлами складе $\Sigma Q_{\text{г}} = 2170,5$ кВт.

Необхідне теплове навантаження для нагрівання води власних потреб котельні, кВт, визначаємо за формулою [2]

$$Q_{\text{в.i}} = G_{\text{в.i}} c_{\text{в}} (t''_{\text{в.i}} - t'_{\text{в.i}}), \quad (4)$$

де $c_{\text{в}}$ – теплоємність води, кДж/(кг·К).

Беремо $c_{\text{в}} = 4,19$ кДж/(кг·К), тоді навантаження для нагрівання потоків води власних потреб складуть: сирій – $Q_{\text{с.в}} = 452,5$ кВт; хімічно підготовленої, що надходить в деаератор підживлюваної води – $Q_{\text{підж}} = 372,2$ кВт; хімічно підготовленої, що надходить в деаератор живильної води – $Q_{\text{жив}} = 479,7$ кВт; сумарне необхідне навантаження $\Sigma Q_{\text{в}} = 1304,4$ кВт.

Оскільки величина $\Sigma Q_{\text{в}} < \Sigma Q_{\text{г}}$, тому калориферні установки будуть встановлені не за всіма котлами, а деякі з них будуть завантажені не повністю. Рекомендується калориферні установки встановити за наступними котлами: за двома паровими для нагрівання сирій води (установки Т1, Т2), завантажуються повністю; за двома водогрійними для нагрівання підживлюваної води (Т3, Т4), завантажуються не повністю; за одним паровим – Т5 (завантажується повністю) і одним водогрійним – Т6 (завантажується не

повністю) для нагрівання живильної води. За одним водогрійним котлом калориферні установки не встановлюються.

Вибір калориферних установок виконаний за методикою [2], результати розрахунків наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати вибору калориферних установок

Показник	Калориферні установки			
	T1 і T2	T3 і T4	T5	T6
Q_k , кВт	226,25	186,1	226,7	253
L_T^c , кг/с	1,88	3,19	1,88	3,19
t'_T , °C	156	153	156	153
t''_T , °C	60	106,8	60	90
G_{Bi} , кг/с	2,7	1,35	0,85	0,95
t'_B , °C	5	61,1	30,4	30,4
t''_B , °C	25	94	94	94
$(\rho v)_T^d$, кг/(с·м ²)	3,52	4,06	1,62	2,75
ω_B , м/с	1,16	0,58	0,73	0,82
K , Вт/(м ² ·К)	52,05	49,36	34,32	44,09
Δt_{cp} , °C	84,9	50,6	42,5	57,5
Модель, номер	КСк3-6	КСк3-8	КСк3-10	КСк3-10
Кількість калориферів, спосіб під'єднання	$n_{заг} = 4; N = 2;$ $n_k = 2;$ $n_T = 2; n_B = 2$	$n_{заг} = 4; N = 2;$ $n_k = 2;$ $n_T = 2; n_B = 2$	$n_{заг} = 6; N = 2;$ $n_k = 1;$ $n_T = 3; n_B = 6$	$n_{заг} = 4; N = 2;$ $n_k = 1;$ $n_T = 2; n_B = 4$
F_T , м ²	51,2	74,5	155,4	99,8
F_d , м ²	55,2	80,8	178,8	119,1
δF_d , %	7,2	7,8	13	16,2

Примітки: $n_{заг}$ – загальна кількість калориферів; N – кількість паралельних у фронтальному перетині; n_k – кількість паралельних за напрямком руху води; n_T і n_B – кількість послідовних за напрямком руху димових газів і води відповідно.

Висновки. Охолодження продуктів згоряння природного газу в калориферних установках сприятиме зменшенню втрат теплоти з димовими газами q_2 і, відповідно, збільшенню ККД котлів та котельні в цілому. Кількість утилізованої теплоти димових газів в котельні за опалувальний сезон з урахуванням температури внутрішнього повітря в приміщеннях ($t_{вн} = 20$ °C), розрахункової температури зовнішнього повітря на опалення ($t_{p.o} = -22$ °C), середньої температури зовнішнього повітря за опалувальний період ($t_{cp.o} = -0,1$ °C) тривалості опалувального періоду ($n_o = 176$ діб) розраховується за відомою залежністю [2] і складе 9493 ГДж/сезон. Економічна ефективність утилізації теплоти при вартості одиниці теплоти за даними Київтеплоенерго 1654,41 грн/Гкал (394,85 грн/ГДж) складе 3 748 310 грн/сезон.

Перелік посилань:

1. Алабовський О.М. Проектування котелень промислових підприємств: Курсове проектування з елементами САПР: Навч. посібник для студентів вузів із спец. «Промислова теплотехніка» / О.М. Алабовський, М.Ф. Боженко, Ю.В. Хоренженко. – Київ : Вища школа, 1992. – 207 с.

2. Боженко М.Ф. Енергозбереження в теплопостачанні : навч. посіб./ Боженко М.Ф., Сало В.П. – Київ. : НТУУ «КПІ», 2008. – 268 с.

¹ Аспірант 4 курсу Лю Я.; ¹ Аспірант 3 курсу Подстєвая Т.Л.

¹ Доц., к.т.н. Серєда В.В.

<https://scholar.google.com/citations?user=-a6E3eMAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ПЛІВКОВОГО ЗВОЛОЖУВАЧА ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ СИСТЕМИ ОПРІСНЕННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. На сьогоднішній день дефіцит прісної води є однією з ключових глобальних проблем, що загрожує соціально-економічній стабільності та екологічній рівновазі в багатьох регіонах світу. Зі зростанням населення, прискореним темпом урбанізації та зміною клімату потреби у прісній воді постійно збільшуються, тоді як наявні природні ресурси обмежені.

Термічне опріснення води за допомогою зволоження-осушення повітря (HDH) має значний потенціал для зменшення навантаження на традиційні водні ресурси та створення надійних джерел водопостачання для посушливих та прибережних регіонів, оскільки мають просту конструкцію та не потребують складного технічного обслуговування.

Аналіз останніх досліджень. Найпоширенішими типами зволожувачів в HDH-системах є теплообмінники з пакувальним матеріалом та барботери. Найвищу термодинамічну ефективність мають барботажні апарати [1, 2], проте у них значні аеродинамічні опори (більше ніж 10 кПа) та низька об'ємна продуктивність. Теплообмінники з пакувальним матеріалом [3, 4] мають високу ефективність через велику площу поверхні тепломасообміну та порівняно низькі втрати тиску за повітрям (10...100 Па). Водночас, вони потребують значних витрат солоної води ($MR > 1$).

Брак даних щодо втрат тиску води й повітря ускладнює комплексний аналіз наявних конструкцій зволожувачів, унеможливорює визначення їхньої економічної та ексергетичної ефективності. Це спонукає до подальших досліджень з пошуку оптимальних конструкцій зволожувачів. У цій роботі запропоновано застосувати як зволожувач – вертикальну трубку, внутрішній об'єм якої використовується як активна зона тепломасообміну під час випаровування вологи з води до повітря.

Формулювання мети. Експериментально визначити оптимальні режимні параметри плівкового зволожувача для отримання максимальних показників продуктивності і енергетичної ефективності. Провести порівняння ефективності плівкового контактного теплообмінника з іншими типами зволожувачів.

Основна частина. Принципова схема експериментальної установки з плівковим зволожувачем зображена на рис. 1. Установка має відкритий повітряний контур і закритий водяний контур. Основними частинами установки є зволожувач 10, нагрівник води 6, насос 8, вентилятор 15, система регулювання та вимірювання необхідних параметрів.

Було визначено, що обмежувати максимальну витрату повітря початком режиму затоплення недоцільно, оскільки різке зростання загального падіння тиску повітря (а відповідно і потужності вентилятора) розпочинається за нижчих швидкостей повітря. З огляду на це, максимальну поверхневу фазову швидкість в зволожувачі пропонується обмежити до 0,34. За такої умови виключене забруднення конденсату краплями солоної води та забезпечуються найменші втрати тиску за повітрям.

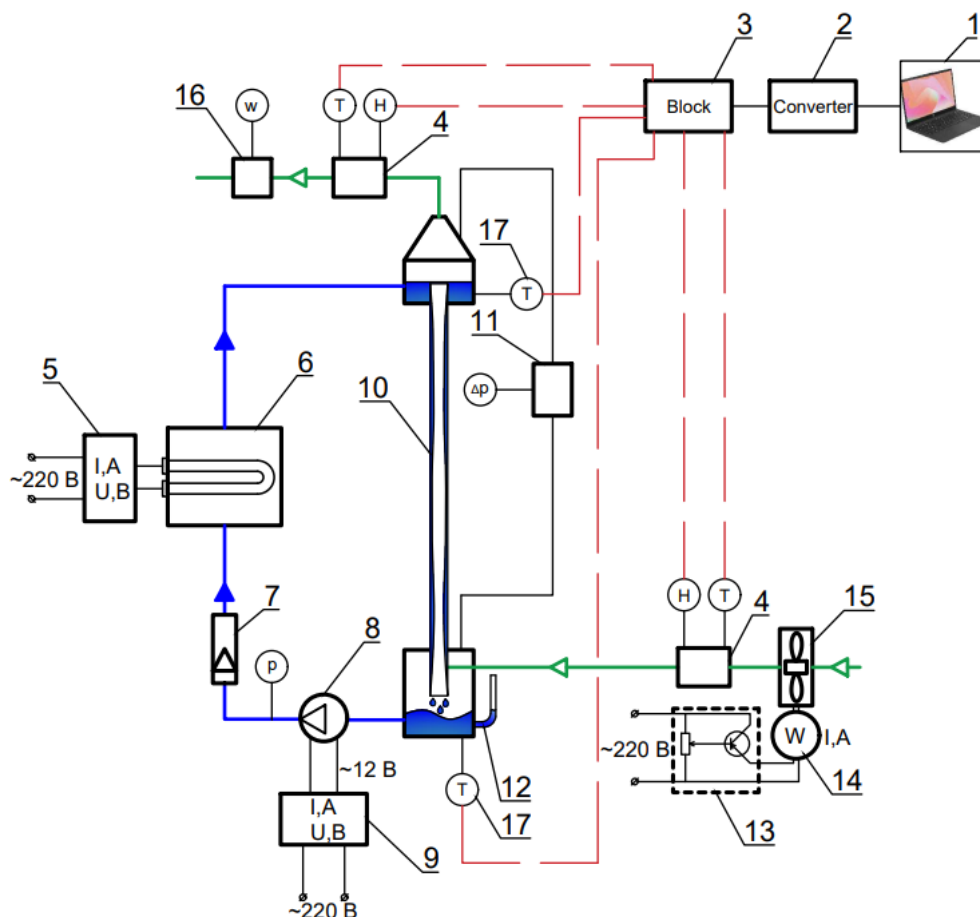


Рисунок 1 – Принципова схема експериментальної установки:

- 1 – ноутбук; 2 – перетворювач інтерфейсів RS485/USB;
 3 – вимірювач восьмиканальний; 4 – перетворювач відносної вологості та температури повітря; 5 – регулятор потужності із термодатчиком; 6 – проточний водонагрівник;
 7 – ротаметр; 8 – мембранний насос; 9 – лабораторний блок живлення з плавним регулюванням вихідних параметрів за рахунок потенціометрів струму і напруги 0-24 В, 6 А із цифровим електронним вимірювачем; 10 – експериментальний зволожувач;
 11 – мікроманометр із похилою трубкою; 12 – п'єзометр; 13 – лабораторний автотрансформатор регульований; 14 – цифровий багатофункціональний лічильник змінного струму; 15 – вентилятор; 16 – анемометр, 17 – датчик температури Pt1000

Можна стверджувати, що зменшення витрати води (а відповідно і коефіцієнта масової витрати MR) призводить до підвищення загальної ефективності роботи зволожувача. Зокрема, масова витрата вологи $\Delta\omega$ збільшується (рис. 2), питоме споживання енергії SEC зменшується, а термодинамічна та ексергетична ефективність зволожувача майже не змінюються. Однак у разі настання розриву плівки SEC різко зростає, водночас $\Delta\omega$, ε_{hum} , η_{hum} різко зменшуються. Такий режим роботи зволожувача не ефективний для HDH системи. З огляду на це, доцільно прийняти мінімальне значення коефіцієнта MR для трубних зволожувачів рівне 2. За таких умов виключене порушення безперервного падіння плівки рідини та забезпечується найефективніша робота зволожувача.

Було виконано порівняння показників ефективності плівкового зволожувача з іншими типами зволожувачів. Запропонований плівковий зволожувач має високі значення швидкості випаровування ER (більше 500 кг/(м³·год)). Значення ER багатострунного зволожувача у 2-3 рази нижче у всьому діапазоні MR. Зволожувачі з різними пакувальними матеріалами мають значення ER на рівні 100 кг/(м³·год). Барботажний та нетипові зволожувачі демонструють найнижчі значення ER, які не перевищують 20 кг/(м³·год).

Порівняння середніх значень η_{hum} різних типів зволожувачів показало, що барботажний зволожувач має найвище значення – 0,94. Ефективність плівкового зволожувача не досягає максимальних значень пакувальних матеріалів ($\eta_{hum}=0.81$) і знаходиться на середньому рівні поміж всіх зволожувачів.

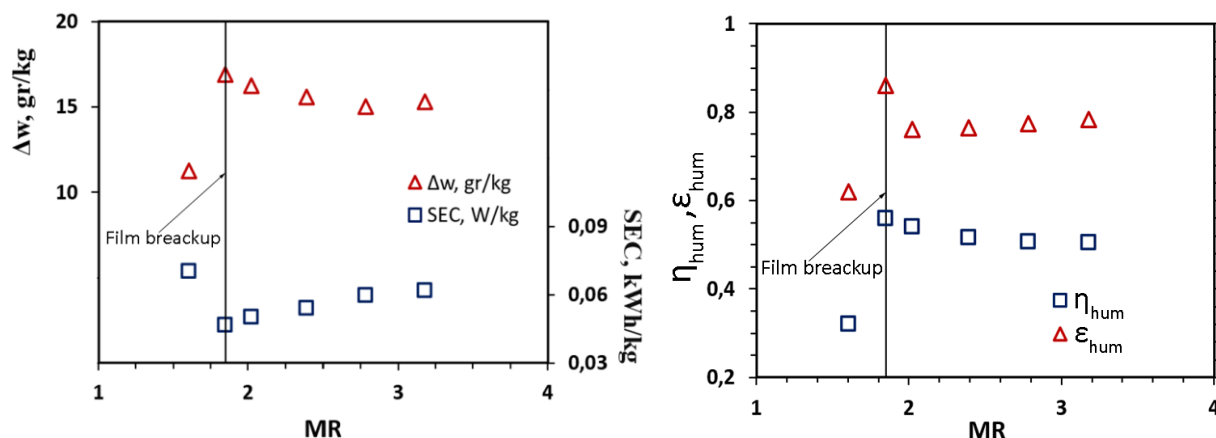


Рисунок 2 – Вплив MR на енергетичні показники зволожувача

Плівковий зволожувач має найвищі значення швидкості випаровування (ER) за падіння тиску повітря ≈ 25 Pa/m. Значення ER багатострунного зволожувача у 2-3 рази менші, однак і втрати тиску на порядок нижчі. Зволожувач з гідрофобним пластиковим пакувальним матеріалом має найнижчі значення ER (≈ 60 кг/(м³·год)) за перепаду тиску ≈ 100 Pa/m. Найбільший перепад тиску (7–12 kPa/m) спостерігається у барботажному зволожувачі. Водночас значення ER барботажного апарату у 1,5 рази менші ніж у плівкового зволожувача. Таким чином, плівковий зволожувач забезпечує найбільший ER за найнижчого падіння тиску повітря.

Висновки. З експлуатаційної точки зору, найбільшу цікавість являє режим роботи плівкового зволожувача за $j_a = 0,34$, MR = 2 and $t_{w,in} = 60$ °C. Такі параметри дозволяють отримати максимальну продуктивність (ER = 642 kg/[m³h]) за мінімальних затрат енергії та запобігти потраплянню крапель забрудненої води до конденсату. За таких умов $\varepsilon_{hum} \approx \eta_{hum} = 0,6$.

Порівняння енергетичних показників різних типів зволожувачів показало, що плівковий зволожувач демонструє найвищий ER у всьому діапазоні зміни MR. Крім того втрати тиску за водою і повітрям є найнижчими і становлять 22,3 kPa і 25 Pa/m відповідно. Таким чином використання вертикальної трубки як зволожувача HDH-системи призведе до зменшення потужності та питомого енергоспоживання опріснювальної установки.

Перелік посилань:

1. T. Rajaseenivasan, K. Srithar, An investigation into a laboratory scale bubble column humidification dehumidification desalination system powered by biomass energy, Energy Convers. Manag. 139 (2017) 232–244.
2. Khan M., Experimental study on optimum performance of two-stage air-heated bubble-column humidification–dehumidification system, Water SA 49(4) (2023).
3. Thanaiah K., Gumtapure V., Tadesse G.M., Experimental analysis on humidification-dehumidification desalination system using different packing materials with baffle plates, Therm. Sci. Eng. Prog. 22 (2021) 100831.
4. Soomro S.H., Santosh R., Bak C.-U., Yoo C.-H., Kim W.-S., Kim Y.-D., Effect of humidifier characteristics on performance of a small-scale humidification-dehumidification desalination system, Appl. Therm. Eng. 210 (2022) 118400.

СЕКЦІЯ № 6

Енергетичний менеджмент та інжинірінг

¹ Аспірант 1 курсу Бірюков Д.В.

¹ Доц., к.т.н. Буяк Н.А.

<https://scholar.google.com/citations?user=B77eOhgAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АНАЛІЗ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ІСТОРИЧНИХ БУДІВЕЛЬ

Постановка проблеми та її актуальність. Споживання енергії будівлями викликає зростаючий інтерес у світі та ЄС, що отримало своє відображення у відповідних нормативних документах. Наприклад, було прийнято зобов'язання модернізувати існуючий будівельний фонд, зробивши його більш стійким і декарбонізованим. Вводяться нові визначення, а саме «Будівлі з нульовими викидами (ZEB)» з високим рівнем виробництва енергії з відновлюваних джерел і майже нульовим споживанням енергії. В умовах воєнної агресії для України є актуальним питання відновлення пошкоджених будівель в реаліях високих стандартів щодо енергоефективності та викидів вуглецю. Особливий інтерес становлять історичні будівлі у відновленні яких є свої особливості та цінність.

Відповідно до визначення, історичні будівлі – це споруди, побудовані до 1945 року з використанням доіндустріальних технологій. Виходячи з європейської законодавчої та нормативної точки, лише ті будівлі, які мають відносно високий ступінь фізичної цілісності, а також визнані історичні та культурні особливості (наприклад, внесені до списку архітектурної спадщини), можуть вважатися «історичними» [1].

Аналіз останніх досліджень. Енергетичне моделювання (BEM) історичних будівель, стає все більш неінвазивним і корисним засобом покращення їх енергетичних і екологічних показників шляхом підтримки обґрунтованого вибору відповідних рішень для чутливої реконструкції [2]. Під час енергетичної реновації історичної будівлі слід досягнути балансу між покращенням енергоефективності та захистом цінностей спадщини. Тому розроблені різні методології для оцінки та визначення найбільш прийнятних заходів з енергетичної реновації для таких об'єктів [3].

Перший етап проекту енергетичної реновації включає енергоаудит для визначення заходів щодо покращення енергоефективності. За допомогою цієї оцінки пропонуються пасивні та активні дії чи заходи. Наступним етапом є оцінка сценаріїв з використанням енергетичного [4], економічного [5] та ексергетичного підходів [6]. Особливо актуальним в умовах сталого розвитку є аналіз життєвого циклу таких проектів та забезпечення відповідного мікроклімату та теплового комфорту. Важливим етапом є встановлення системи енергоменеджменту будівлі (BEMS), яка контролює та оптимізує роботу обладнання, що у свою чергу покращує енергетичну ефективність будівлі.

Формулювання мети. Метою дослідження є аналіз методів аналізу для низьковуглецевого відновлення історичних будівель в Україні із врахуванням вимог до будівель з майже нульовим споживанням енергії.

Основна частина. Відповідно до ДБН А.2.2.3, на основі якого здійснюється проектування будівель і споруд, введено можливість обґрунтування інвестицій на основі аналізу всіх етапів життєвого циклу об'єкту будівництва. Тому у проектанта існує нормативно обґрунтована можливість застосування інструментів оцінки життєвого циклу. Основні етапи життєвого циклу та модулі для аналізу, що використовують конкретні програмні продукти, відповідно до EN 15978. Будівлі та об'єкти нерухомого майна. Планування строку експлуатації. Частина 5. Оцінювання вартості життєвого циклу, представлено у таблиці 1.

Фінансовий аналіз життєвого циклу здійснюється відповідно до ДСТУ ISO 15686-5:2023 на основі таких показників:

- чиста приведена вартість (NPV) або чисті приведені витрати (NPC);
- термін окупності;
- чисті заощадження (net savings; NS);
- відношення заощаджень до інвестицій (savings-toinvestment ratio; SIR);
- річна вартість (annual cost; AC) чи річний еквівалент вартості (annual equivalent value; AEV).

Даний стандарт описує можливість врахування зміни вартості грошей у часі та інфляції, ризиків та невизначеностей, істотно описано розрахунок чутливості проекту до зміни ставки дисконтування та вартості енергоносіїв в часі, що є основою для здійснення таких розрахунків під час відновлення історичних будівель і надає ширшу інформацію для прийняття рішень.

Аналіз впливу на навколишнє середовище регламентує серія стандартів ISO 14000, відповідно до якої оцінюють такі показники:

- потенціал глобального потепління, кг CO₂ -еквіваленту;
- руйнування озонового шару, в кг CFC-11;
- підкислення земельних та водних джерел, в молях H⁺ або кг SO₂ ;
- евтрофікація, в кг азоту або кг фосфату;
- утворення тропосферного озону, в кг O₃ -еквіваленту чи в кг прекурсорів (етену, NO_x);
- виснаження невідновлюваних джерел енергії, в МДж.

Таблиця 1 – Фази життєвого циклу будівлі

Фаза життєвого циклу	Виробництво			Зведення		Використання							Закінчення життєвого циклу				
	Видобуток сировини	Транспортування	Виробництво	Транспортування	Зведення	Експлуатація	Обслуговування	Ремонт	Заміщення	Модернізація	Споживання енергії при експлуатації	Споживання води при експлуатації	Заміщення/демонтаж	Транспортування	Переробка відходів	Утилізація	Потенціал повторного використання
Модуль	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

Використання різних за якістю джерел енергії для забезпечення відповідного мікроклімату в історичних будівлях обумовлює доповнення аналізу життєвого циклу ексергетичним аналізом, ексергоекономічним а також оцінкою рівня теплового комфорту та мікроклімату, що має свої особливості в таких будівлях.

Ексергетична оцінка життєвого циклу використовується для обліку ресурсів при оцінці життєвого циклу, методи, засновані на ексергії, забезпечують більш комплексну міру сталості, враховуючи як енергетичні, так і неенергетичні ресурси. Існуючі дослідження використовують ексергетичну оцінку життєвого циклу як доповнення до традиційного LCA в обліку ресурсів, а також існує можливість для більш комплексної ексергетичної оцінки життєвого циклу, яка включає ексергію викидів життєвого циклу [6]. Запропоновано обирати оптимальну товщину теплоізоляції будівлі на основі ексергетичного аналізу

життєвого циклу, представно ексергетичний екологічний фактор, на основі якого проводиться оптимізація [7].

Важливим аспектом є забезпечення належного мікроклімату в історичних будівлях, для оцінки якого використовують показники PMV та PPD [8], а також ексергетичні моделі, що дозволяють врахувати механізми терморегуляції людини.

Висновки. В рамках даної роботи було проаналізовані літературні джерела які присвячені вивченню питання відновлення історичних будівель в умовах викликів щодо створення будівель з майже нульовим споживанням енергії та викидами парникових газів. Представлено нормативні документи які обумовлюють використання методів аналізу життєвого циклу під час створення проектної документації на будівництво. Детально розглянуто особливості аналізу життєвого циклу, а саме його етапи та показники. Можна стверджувати необхідність проведення такого аналізу із застосуванням динамічного енергетичного моделювання, енергетичного, ексергетичного та екологічного аналізів, що дозволить врахувати більший набір факторів і створювати та відновлювати будівлі із меншим споживанням викопних ресурсів та шкодою для довкілля. Такий аналіз дозволяє на етапі проектування приймати рішення, що передбачають вищі капітальні вкладення, але у період експлуатації створюють менше навантаження на довкілля та вичерпність енергоресурсів.

Ще одним важливим аспектом аналізу є забезпечення відповідного мікроклімату та теплового комфорту у будівлях, для цього необхідно використовувати стандарти та моделі теплового комфорту, особливо актуальною є ексергетична модель. Використання таких моделей в стратегіях керування є вагомим кроком до підвищення енергоефективності.

Перелік посилань:

1. Current practices and open issues on the whole-building dynamic simulation of historical buildings: a review of the literature case studies / E. Verticchio et al. Building and Environment. 2024. P. 111621. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111621> (date of access: 15.03.2025).

2. Building Energy Modelling for Historical Buildings: Current Distribution of Literature Case Studies in View of Climate Change / E. Verticchio et al. Procedia Structural Integrity. 2024. Vol. 55. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.001> (date of access: 15.03.2025).

3. Methodological approach for performance assessment of historical buildings based on seismic, energy and cost performance: A Mediterranean case / S. K. Güleroglu et al. Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 31. P. 101372. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101372> (date of access: 15.03.2025).

4 Panakaduwa C., Coates P., Munir M. Identifying sustainable retrofit challenges of historical Buildings: A systematic review. Energy and Buildings. 2024. P. 114226. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114226> (date of access: 15.03.2025).

5. Low carbon emission renovation of historical residential buildings / K.-A. Kertsmitk et al. Energy Reports. 2024. Vol. 11. P. 3836–3847. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.03.030> (date of access: 13.03.2025).

6. Nwodo M.N., Anumba C.J. Exergetic Life Cycle Assessment: A Review. Energies. 2020. Vol. 13, no. 11. P. 2684. URL: <https://doi.org/10.3390/en13112684> (date of access: 15.03.2025).

7. Optimum insulation thickness determination of a building wall using exergetic life cycle assessment / M. Ashouri et al. Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 106. P. 307–315. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.190> (date of access: 15.03.2025).

8. Analysis of occupant thermal comfort and energy-saving potential based on cooling behaviors in residential buildings: A case study of Shanghai / J. Lyu et al. Building and Environment. 2025. P. 112792. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112792> (date of access: 16.03.2025).

¹ Магістрант 1 курсу Бороздін Д.С.

¹ Доц., к.т.н. Білоус І.Ю.

<https://scholar.google.com/citations?user=USpfruwAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ НАВЧАЛЬНОГО КОРПУСУ №8 КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ

Постановка проблеми та її актуальність. Підвищення рівня енергетичної ефективності навчальних корпусів КПІ ім. Ігоря Сікорського та покращення комфортних умов навчання як для студентів, лаборантів та викладачів є однією з найважливіших завдань. Завдяки цьому прискорюється дослідницька діяльність, отримується практичний досвід, а також залучаються міжнародні інвестиції. В сучасному світі використання відновлювальних джерел енергії для підвищення енергетичної ефективності будівлі зростає, оскільки це рішення допомагає зменшити викиди парникових газів, зменшити енергетичну залежність та знизити споживання енергетичних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень. З кожним роком актуальність використання відновлювальних джерел енергії зростає. Перш за все це пов'язано з метою зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, залежність від традиційних джерел енергії та витрати на енергоносії.

Формулювання мети. Покращення енергетичної ефективності навчальних корпусів за рахунок використання поновлювальних джерел енергії є оптимальним рішенням, так як період окупності мінімальний, а економію від заходу можна побачити вже в перші місяці використання заходу. Зважаючи на постійне зростання цін на енергоносії, за допомогою відновлювальних джерел енергії можна отримати певну стабільність, а зекономлені кошти інвестувати.

Основна частина. Об'єктом дослідження є навчальний корпус № 8 КПІ ім. Ігоря Сікорського. Будівля побудована в 1930 році, та спершу використовувалася як гуртожиток, але в 1996 році як навчальний корпус. Навчальний корпус має три поверхи та два не з'єднаних між собою підвали які опалюються. Теплопостачання навчального корпусу №8 здійснюється від теплової мережі, прокладеної у 4-му корпусі. У підвалі розташований тепловий пункт, обладнаний манометрами та термометрами, запірною арматурою грязьовиками та елеватором. В будівлі однотрубна систему опалення. Більшість опалювальних приладів чавунні типу М-140, їх стан незадовільний. Навчальний корпус використовує теплову енергію лише для потреб опалення, так як гарячого водопостачання немає. Навчальний корпус №8 відноситься до II категорії електропостачання. Трансформаторна підстанція ТП 5167 відповідає за електропостачання корпусу. В трансформаторній підстанції встановлено два трансформатори ТМ 630 кВА. В навчальному корпусі ведеться як комерційний так і технічний облік.

Після отримання та аналізу даних був сформований сертифікат енергетичної ефективності в програмному середовищі E-audit [1], яка дозволяє розрахувати енергоспоживання згідно Стандарту [2]. Клас енергетичної ефективності навчального корпусу № 8 – «G». Серед заходів для підвищення енергоефективності Навчального корпусу № 8, серед яких утеплення зовнішніх стін, утеплення даху, заміна приладів опалення, встановлення ІТП, заміна ламп розжарювання та люмінесцентних ламп на світлодіодні лампи, встановлення датчиків руху. Після впровадження енергоефективних заходів клас енергоефективності будівлі становитиме «C», а сумарні капіталовкладення становитимуть біля 20 млн 200 тис. грн. Використання відновлювальних джерел енергії в умовах енергонезалежності та безперебійного живлення є важливим питанням сьогодення.

Моделювання та розрахунок фотоелектричних панелей дахової ФЕС корпусу було виконано за допомогою програмного середовища PVSol [3]. Враховано кут нахилу даху, затінення та просторову орієнтацію. Після проведення розрахунків, порівнянь ефективності встановлення різного виробництва та кількості сонячних панелей було вибрано сонячні модулі виробництва JA Solar Holdings Co, Ltd. Навчальний корпус архітектурно можна розділити на три частини, пропонується встановити сонячні панелі в лівій частині, так як це рішення є найефективнішим.

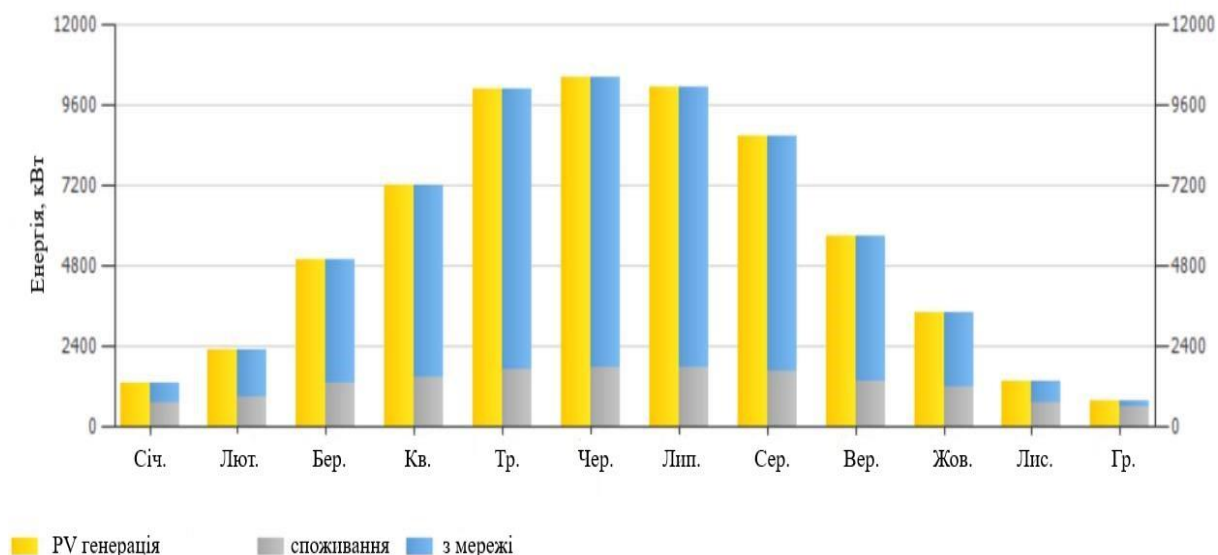


Рисунок 1 – Результати моделювання сонячних панелей

При встановленні сонячних модулів виробництва JA Solar Holdings Co, Ltd в кількості 171 одиниць сонячна електростанція генерує 66 398 кВт·год/рік (рис.1). Графік, що відображає достатність електрики, що генерується сонячними панелями відповідно до обсягів, необхідних для нормального функціонування навчального корпусу (рис.2).

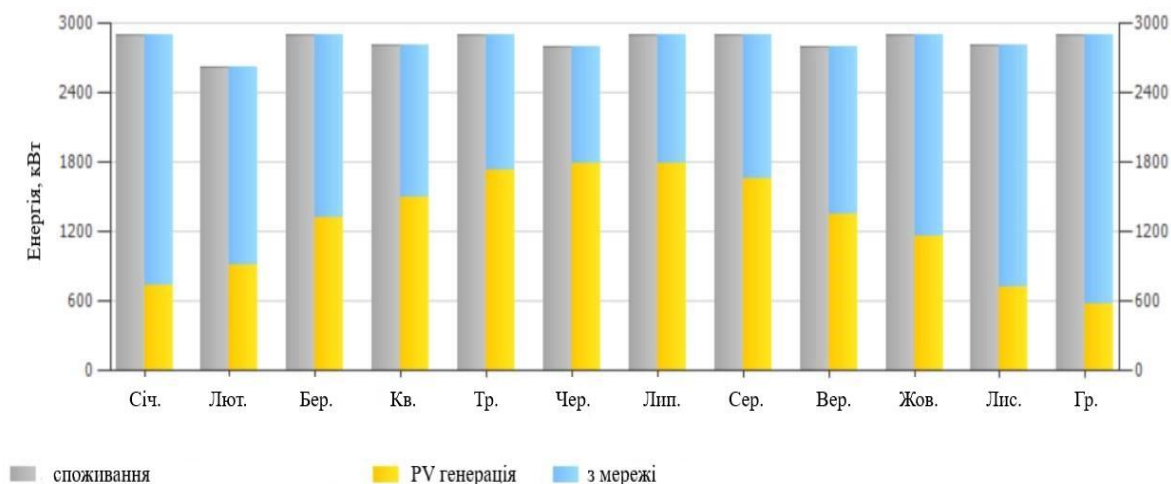


Рисунок 2 – Рівень споживання електричної енергії

Висновки. В навчальному корпус № 8 КПІ ім. Ігоря Сікорського проведено енергетичний аудит та встановлено, що клас енергетичної ефективності будівлі відповідає класу «Г». Після впровадження комплексу енергозберігаючих заходів, таких як: утеплення зовнішніх стін, утеплення даху, заміна приладів опалення, встановлення ІТП, заміна ламп розжарювання та люмінесцентних ламп на світлодіодні лампи, встановлення датчиків руху,

клас енергоефективності будівлі становитиме «С». Для безперебійної системи енергоживлення та підвищення декарбонізації енергопостачання навчального корпусу розглянуто питання встановлення дахової ФЕС, що дозволить згенерувати 66 398 кВт·год енергії в рік.

Перелік посилань:

1. E-Audit. Login | E-Аудит. URL: <https://e-audit.escoua.com> (date of access: 15.03.2025).
2. 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.
3. Програмне забезпечення PV*Sol Premium. URL: <https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/> (дата звернення 15.03.2025).

¹ Аспірант 1 курсу Ільченко Д.С.

¹ Доц., к.т.н. Суходуб І.О.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГООЩАДНОСТІ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ ОВОЧЕСХОВИЩ ЗА РАХУНОК ОПТИМІЗАЦІЇ ПОКАЗНИКІВ МІКРОКЛІМАТУ ТА ІНТЕГРАЦІЇ ВДЕ

Постановка проблеми та її актуальність. Проблема збереження свіжості та якості овочів протягом тривалого часу є актуальною для аграрного сектору багатьох країн світу, зокрема і для України. Щороку значні обсяги свіжозібраних овочів втрачаються через недосконалість систем зберігання. За оцінками, у розвинених країнах з ефективними післязбиральними технологіями втрата продукції на етапі від виробництва до реалізації становить від 5 до 25 %, а в країнах, що розвиваються, післязбиральні втрати можуть сягати до 50 % врожаю [1]. Також у контексті постійного зростання цін на енергоносії, особливої актуальності набуває питання енергоощадності систем підтримання мікроклімату овочесховищ. Тому на сучасному етапі розвитку технологій значна увага приділяється створенню енергоефективних інженерних систем для овочесховищ, які дозволяють знижувати експлуатаційні витрати та мінімізувати вплив на навколишнє середовище. У зв'язку з цим особливої ваги набуває використання відновлюваних джерел енергії, інтеграція автоматизованих систем керування мікрокліматом а також оптимізація розподілу температур, вологості та потоків повітря в середині камер зберігання овочів. Зокрема, широкі перспективи для оптимізації мікроклімату в овочесховищах відкриває застосування метода чисельного моделювання в гідроаеродинаміці (CFD – Computational Fluid Dynamics) – це сучасна технологія, яка все частіше застосовується в різних галузях, включаючи сільське господарство.

Аналіз останніх досліджень. Нещодавні дослідження зосереджені на різних аспектах збереження овочів з урахуванням енергоефективності, зокрема оптимізація мікроклімату сховищ, впровадження інтелектуальних систем керування, використання експертного аналізу для оцінки ефективності вентиляційних та охолоджувальних систем. Значна увага приділяється інтеграції відновлюваних джерел енергії в інженерні системи овочесховищ, що дозволяє суттєво знизити енергоспоживання. В рамках чисельного моделювання активно застосовується CFD-аналіз, який дає змогу досліджувати повітряні потоки, розподіл температури та вологості в овочесховищах. Останні роботи фокусуються на розробці моделей, що враховують вплив щільності укладки продукції, особливостей вентиляційних систем та умов охолодження на якість зберігання.

Формулювання мети. Метою дослідження є аналіз сучасних технологій зберігання овочів, зосереджуючи увагу на енергоощадності систем мікроклімату овочесховищ. Особливий акцент зроблено на використанні CFD-моделювання для оптимізації розподілу кліматичних параметрів та інтеграцію відновлюваних джерел енергії для підвищення енергоефективності інженерних систем, збереження якості продукції та мінімізацію екологічного впливу.

Основна частина. Основними системами забезпечення мікроклімату в овочесховищі є вентиляція та охолодження, які є значними споживачами енергії і суттєво впливають на загальну собівартість та енергоємність кінцевої продукції. Для підвищення рівня енергоощадності овочесховищ, особливо в умовах енергетичної кризи, необхідно зважено підбирати оптимальні методи обробки повітря [2]. Зробити сховища більш енергоефективними можна шляхом впровадження наступних технологій та заходів:

- Застосування вентиляторів із високим коефіцієнтом корисної дії та частотних перетворювачів для регулювання швидкості обертання вентиляторів залежно від потреби.

- Використання розумної автоматизації: встановлення датчиків температури, вологості, концентрації CO₂ та використання інтелектуальних систем управління для аналізу даних і створення оптимальних режимів вентиляції.

- Інтеграція рекуператорів, які дозволяють повторно використовувати тепло/холод з відпрацьованого повітря, що значно знижує енергоспоживання на підігрів або охолодження свіжого повітря.

- Покращення теплоізоляції стін, покрівлі, підлоги в овочесховищі. Застосування сучасних ізоляційних матеріалів та технологій будівництва сприяє зменшенню тепловтрат, що, в свою чергу, знижує потребу в опаленні або охолодженні приміщень.

- Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонце, вітер і біомаса для забезпечення живлення інженерних системи зберігання овочів.

- Оптимізація повітряних потоків, тобто розробка системи вентиляції з урахуванням розташування продукції, щоб забезпечити рівномірний розподіл повітря і уникнути «застійних зон».

Всі дані технології та заходи вимагають значних капітальних інвестицій, окрім останнього з наведених. Так як оптимізацію повітряних потоків в овочесховищі можливо просто здійснити оптимальним розміщенням продукції по відношенню до вентиляторів та випарників. Зазвичай для аналізу розподілу температур, вологи та швидкостей повітря у приміщеннях овочесховищ використовують моделювання процесів, що дозволяє заощадити значну кількість енергоресурсів, продукції та часу порівняно з експериментом.

Протягом останніх 20 років спостерігається зростаючий інтерес до аналізу умов розподілу температур, вологості та повітряних потоків в системах зберігання овочів за допомогою метода чисельного моделювання в гідроаеродинаміці (CFD – Computational Fluid Dynamics). CFD-моделювання використовує метод скінченних елементів для розв'язання диференціальних рівнянь аеродинаміки та теплофізики у часткових похідних. Чисельне моделювання дозволяє визначити значення швидкості, температури, вологості та тиску повітря в кожній точці приміщення, а також оцінити інші параметри, що впливають на мікроклімат у сховищі. Візуалізація результатів чисельного моделювання забезпечує комплексне уявлення про формування мікроклімату в овочесховищі, дозволяє наочно оцінити ефективність вибраної схеми вентиляції та розташування продукції, що зберігається. Програмний пакет ANSYS Fluent є широко застосовуваним інструментом для виконання CFD-обчислень [3], що базуються на рівняннях безперервності, імпульсу та енергії, і дає змогу аналізувати теплові та тривимірні поля течії [4].

CFD-аналіз дозволяє моделювати різні схеми вентиляції та охолодження, щоб оцінити, як змінюються мікрокліматичні умови при різних налаштуваннях параметрів зберігання. CFD-моделювання також є ефективним інструментом для аналізу турбулентності та напрямку руху повітря в овочесховищі завдяки можливостям візуалізації та розрахунку складних потоків [5]. Розподіл вологи в овочесховищі, процеси тепло- та масообміну, які впливають на рівень вологості в різних зонах сховища, також можуть бути змодельовані за допомогою CFD-інструментів.

В теперішній час сучасні інженерні системи відкривають широкі можливості для підвищення енергоефективності зберігання овочів, що є критично важливим для забезпечення продовольчої безпеки та економічної стабільності аграрного сектору. Системи вентиляції та кондиціонування є одними з найбільш енерговитратних елементів у сховищах, що робить питання підвищення їх енергоефективності особливо актуальним. Сучасні технології дозволяють значно зменшити енергоспоживання вентиляційних та охолоджувальних систем завдяки використанню інверторних вентиляторів та компресорів, застосуванню низько енергетичних холодоагентів, адаптивного управління мікрокліматом, рекуперації тепла та використанню теплових насосів, які можуть працювати в режимі як охолодження, так і нагріву, що дозволяє значно зменшити навантаження на традиційні

холодильні установки та скоротити загальні витрати на енергоресурси [6]. Енергоефективні рішення не тільки знижують витрати виробників, але й сприяють зменшенню викидів парникових газів та збереженню природних ресурсів.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як біомаса, сонячна, вітрова та геотермальна енергетика в системи зберігання овочів є перспективним підходом до значного підвищення рівнів енергоощадності та енергонезалежності. Використання інноваційних технологій, що поєднують ВДЕ та сучасні системи керування енергоспоживанням, забезпечує стабільність роботи холодильних установок та вентиляції навіть у віддалених регіонах. Багато досліджень підкреслюють важливу роль відновлюваної енергетики в зберіганні овочів, зокрема розглядаються різні варіанти використання відновлюваних джерел енергії для підвищення енергоефективності в системах зберігання овочів. Дослідники зазначають, що поєднання кількох ВДЕ (сонце + вітер + біогаз) разом із сучасними системами моніторингу дає змогу зменшити витрати енергії на 40–70 % в овочесховищах [7].

Висновки. У цій роботі був проведений аналіз сучасних методів зберігання овочів з акцентом на енергоефективність та оптимізацію мікрокліматичних параметрів овочесховищ. Досліджено основні методи забезпечення оптимальних енергоощадних умов зберігання, включаючи використання вентиляції, охолодження, автоматизованих систем керування. Також увагу приділено інтеграції ВДЕ, розглянуто можливості застосування CFD-моделювання для аналізу повітряних потоків та розподілу температури й вологості в овочесховищах.

Незважаючи на значний прогрес у застосуванні CFD-технологій у світі, в Україні цей напрямок залишається недостатньо дослідженим. Більшість наукових робіт базуються на закордонному досвіді, що потребує адаптації до місцевих кліматичних умов, конструктивних особливостей сховищ та доступних технологічних рішень. Тому подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку та впровадження CFD-моделей, які враховують специфіку українських овочесховищ, з метою підвищення їх енергоефективності та покращення якості збереженої продукції.

Перелік посилань:

1. Прісс О.П., Калитка В.В. Скорочення втрат під час зберігання овочів, чутливих до низьких температур. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2014. № 1. С. 209–221.
2. Rao C.G. Engineering for storage of fruits and vegetables. Elsevier Science & Technology Books, 2015. 894 p.
3. Ansys fluent fluid simulation software. www.ansys.com. URL: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent> (дата звернення: 28.02.2025).
4. Дешко В.І., Суходуб І.О., Яценко О.І. Дослідження коефіцієнтів ефективності підсистеми тепловіддачі на основі CFD-моделі кімнати. *Technologies and engineering*. 2023. № 5. С. 17–26. URL: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.5.2> (дата звернення: 28.02.2025).
5. Defraeye T., Verboven P., Nicolai B. CFD modelling of flow and scalar exchange of spherical food products: turbulence and boundary-layer modelling. *Journal of food engineering*. 2013. Vol. 114, no. 4. P. 495–504. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.09.003> (date of access: 02.03.2025).
6. Industrial storage of root vegetables: energy and quality aspects of existing cold-storages / E. Indergård et al. In *Proceedings of the 25th IIR International Congress of Refrigeration*. Montréal, 24–30 August 2019. URL: <https://hdl.handle.net/11250/2647694> (date of access: 02.03.2025).
7. Renewable energy as an alternative source for energy management in agriculture / Y. Majeed et al. *Energy reports*. 2023. Vol. 10. P. 344–359. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.06.032> (date of access: 02.03.2025).

¹ Магістрант 1 курсу Кисельов В.О.

¹ Асист., к.т.н. Яценко О.І.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=LRiP-5AAAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ У МІСТІ СЛАВУТИЧ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛЮВАННЯ В ПРОГРАМІ DESIGNBUILDER

Постановка проблеми та її актуальність. Житлові будинки споживають значну кількість енергії, що впливає на навколишнє середовище та економічну ефективність експлуатації. Одним із ключових напрямів підвищення енергоефективності є впровадження сучасних технологій енергозбереження та раціонального використання ресурсів. Місто Славутич, як зразок енергоефективного міста, має значний потенціал для оптимізації енергоспоживання житлових будинків. Оцінка цього потенціалу можлива за допомогою комп'ютерного моделювання в програмі DesignBuilder, що дозволяє проаналізувати теплові втрати і ефективність утеплення об'єкту. Проведене дослідження сприятиме розробці заходів для підвищення енергоефективності та зниження витрат на опалення.

Формулювання мети. Дослідження можливостей скорочення енергоспоживання на потреби опалення багатоповерхового житлового будинку шляхом енергетичного моделювання в програмному середовищі DesignBuilder [1]. Для досягнення мети проводиться аналіз базового, фактичного та енергоефективного сценаріїв із верифікацією результатів.

Основна частина. Об'єктом дослідження є багатоквартирний житловий будинок панельного типу в м. Славутич. Побудований в 1987 році за типовим проектом з керамзитобетонних панелей. Має п'ять поверхів та неопалювальний підвал під всією площею будівлі. Підвал, за проектом, облаштований як ПРУ (протирадіаційне укриття). Плаский дах поєднаний з останнім поверхом (суміщене покриття). Будинок складається з трьох під'їздів та сорока п'яти квартир (по 15 квартир в кожному). Вхід до будівлі орієнтовано на північний схід. Вікна розташовані з двох сторін: північно сходу та південного заходу. Житлова площа об'єкту – 2112 м². Опалювальна площа – 4110 м², опалювальний об'єм – 11090 м³.

Для комп'ютерного моделювання була створена 3D-модель в програмі DesignBuilder (рис. 1)



Рисунок 1 – 3D-модель будинку в DesignBuilder

Геометрія будівлі створювалась на основі поверхових планів. Місця загального користування виділені в окрему зону. На рис. 2 можна побачити різні огорожувальні конструкції будинку, які необхідно задавати для більш точного моделювання, такі як зовнішні стіни, дах, перекриття, вікна, двері тощо. Для кожної огорожувальної конструкції були задані свої параметри теплопередачі, як для базового сценарію (до термомодернізації), так і для запропонованого (після термомодернізації). В запропонованому сценарії опір теплопередачі огорожувальних відповідає нормативним вимогам ДБН В.2.6-31:2021 [2].

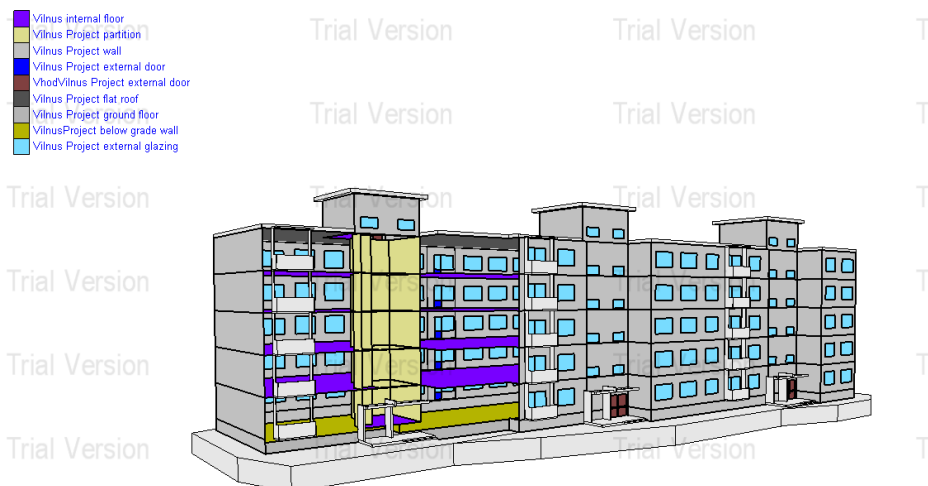


Рисунок 2 – Візуалізація огорожувальних конструкцій будівлі

В роботі розроблено три сценарії моделювання: Actual (фактичний), Baseline (базовий) і Proposed (запропонований). У сценарії Actual характеристики будівлі та внутрішнього мікроклімату наближені до фактичного стану, Baseline – приведені до нормативних вимог, Proposed – з рекомендованими заходами з енергозбереження. Покращення рівня енергоефективності будівлі досягалось за рахунок теплоізоляції огорожувальних конструкцій, заміни вікон і дверей на більш сучасні та енергозберігаючі, встановлення ІТП та модернізації внутрішньобудинкової системи опалення.

Для порівняння трьох розглянутих моделей будівлі з історичним споживанням теплової енергії основні показники споживання енергоресурсів зведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння результатів моделювання в DesignBuilder

Теплова енергія					
	Модель	Історичне	Actual	Baseline	Proposed
DesignBuilder	Абсолютне значення	373 447	374 438	554 727	245 852
	Відхилення	0%	+0,26%	+51,5%	Від «Baseline» -55,7% Від «Історичне» -34,2%

Отримані результати показують, що загальне споживання теплової енергії запропонованою моделлю будівлі значно знижується у порівнянні з базовою (у більше ніж 2 рази). Отже, запропоновані заходи з підвищення енергоефективності житлових будинків, зокрема утеплення огорожувальних конструкцій (фасадів, дахів, підвалів) для зменшення теплових втрат, а також модернізація систем опалення шляхом впровадження енергоефективного обладнання та систем автоматизованого керування енергоспоживанням для оптимізації витрат теплової, є доцільними до впровадження.

Висновки. Використання моделі в програмі DesignBuilder є ефективним інструментом для аналізу енергоспоживання житлових будинків та оцінки ефекту від впровадження енергоефективних заходів. Завдяки моделюванню можна детально

проаналізувати теплові втрати, визначити оптимальні варіанти утеплення та модернізації систем опалення. Це дозволяє ще на етапі планування оцінити потенціал енергозбереження та економічну доцільність запропонованих змін. Таким чином, застосування DesignBuilder сприяє прийняттю обґрунтованих рішень щодо підвищення енергоефективності житлових будинків та зменшення експлуатаційних витрат. Отримані результати можуть бути корисними як для проектувальників і забудовників, так і для міських адміністрацій при розробці програм енергозбереження.

Перелік посилань:

1. DesignBuilder Software Ltd – Home. DesignBuilder Software Ltd – Home. URL: <https://designbuilder.co.uk/> (дата звернення: 03.03.2025).
2. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Чинний від 2022-09-01. Вид. офіц. Київ, 2022. 27 с.

¹ Аспірант 1 курсу Лазарев Є.С.

¹ Доц., к.т.н. Суходуб І.О.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВИКОРИСТАННЯ ФАЗОПЕРЕХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ АКУМУЛЯТОРІВ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ОБОЛОНКИ БУДІВЛІ

Постановка проблеми та її актуальність. Надмірне споживання енергії будівлями є однією з найбільш важливих та досліджуваних проблем сьогодення по всьому світу. Станом на 2021 рік на експлуатацію будівель припадало близько 30 % від загального споживання енергії та 27 % від усіх викидів енергетичного сектору [1]. У 2022 році споживання енергії зросло на 1 %. Тренд на зростання зберігається і сьогодні. Прогнозується збільшення споживання енергії для опалення та охолодження приміщень до 12 % і 37 % відповідно в 2050 році [2]. Одним із багатьох шляхів покращення енергетичної ефективності будівель є включення фазоперехідних матеріалів (phase change materials - PCM) в оболонку будівлі задля покращення її теплової інерційності.

Слід зазначити, що на сьогоднішній день також залишаються актуальними загальносвітові тренди щодо переходу з традиційних джерел вироблення енергії до альтернативних. Головним недоліком відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) є нестабільний профіль генерації останніх. В той же час графіки споживання енергії в пікові години не завжди співпадають із графіками генерації енергії від ВДЕ. Вирішенням даної проблеми може бути механізм акумуляції теплової енергії від ВДЕ за допомогою теплових акумуляторів, побудованих на основі PCM.

Аналіз останніх досліджень. В рамках останніх досліджень розглядалися різні варіанти включення PCM в оболонку будівель, в тому числі шляхом прямого додавання PCM в будівельні матеріали, занурення будівельних конструкцій в рідкий PCM, мікро- та макроінкапсуляції та інші. В рамках різних експериментів дослідники намагаються знайти найкращий варіант PCM для включення в оболонку будівлі в конкретних кліматичних умовах. Варто також згадати велику кількість робіт щодо проектування теплових акумуляторів на основі PCM, а також дослідження інтенсифікації теплообміну, життєвого циклу, підбір оптимальних розмірів таких акумуляторів тощо.

Формулювання мети. Метою дослідження є аналіз можливості застосування PCM для покращення ефективності оболонки будівель та систем накопичення теплової енергії. До того ж, проаналізовано можливість застосування методів інтенсифікації теплообміну в об'ємі PCM, а також покращення теплофізичних характеристик такого матеріалу. Найбільш ефективні методи інтенсифікації планується застосувати при моделюванні процесів теплообміну в шарі PCM.

Основна частина. Всі фазоперехідні матеріали поділяються на 3 основні типи: органічні, неорганічні та евтектичні.

Серед органічних найбільш розповсюдженими є парафіни, жирні кислоти, складні ефіри. Органічні PCM мають такі переваги, як низький рівень переохолодження, відсутність фазового поділу, низький рівень корозійної активності, хімічна стабільність та низька вартість. Ці переваги роблять цей тип PCM найбільш розповсюдженим та придатним для застосування в теплових акумуляторах та огорожувальних конструкціях будівель. Недоліками вищезазначених матеріалів є низька теплопровідність, відносно невелика прихована теплота, низька щільність зберігання енергії. Крім того, явище деградації при зміні фази поступово з'являється зі збільшенням кількості циклів заряджання-розряджання, що обмежує термін служби.

У порівнянні з органічними РСМ, неорганічні демонструють переваги більшої теплопровідності та менш інтенсивної деградації матеріалу з часом. Однак існують і недоліки, такі як переохолодження, розділення фаз і висока корозійна активність. Серед неорганічних РСМ варто виділити метали та гідровані солі.

Третім типом РСМ є евтектичні, які є кристалічними сумішами, що утворені двома або більше видами легкоплавких компонентів у процесі кристалізації. Вони поділяються на три типи: органічні-органічні, органічні-неорганічні, неорганічні-неорганічні. Їх головною перевагою є те, що можна контролювати пропорцію компонентів в складі такого РСМ, що дає широкі можливості для різних способів застосування. Тим не менш, прихована теплота і питома теплоємність евтектичних РСМ зазвичай нижчі, ніж у органічних і неорганічних.

Велика кількість фазоперехідних матеріалів знаходяться на стадії дослідження. На сьогоднішній день найбільш розповсюдженими на ринку є парафіни та сольові розчини [3].

Значна кількість наукових робіт та експериментів продемонстрували ефективність включення РСМ в оболонку будівель. Стіни та дах є елементами будівлі, в які найбільш ефективно інтегрувати РСМ для менших витрат на охолодження та вентиляцію в жарку пору року. Натомість, для більш ефективного обігріву будівлі при низьких температурах РСМ найчастіше інтегрують у підлогу та стіни. Існує декілька варіантів інтеграції РСМ в огорожувальну конструкцію будівель:

- безпосереднє додавання РСМ у будівельний матеріал;
- занурення будівельних конструкцій в рідкий РСМ;
- мікро- та макроінкапсуляція;
- РСМ у стабільній формі огорожений матрицею;
- формостійкі РСМ композити.

Останні два методи є найдорожчими, але в той же час найбільш надійними. Надійність означає, що цикли фазового переходу РСМ проходять із постійною продуктивністю без деградації протягом довгого періоду часу, що є вирішальним фактором для таких випадків застосування РСМ, як огорожувальні конструкції будівель [4].

Також розрізняють два типи систем інтеграції РСМ в оболонку будівель: активна та пасивна.

У пасивних системах РСМ інтегрується в такі будівельні матеріали, як стінові плити, застелення, дах та підлога. Коли внутрішня або зовнішня температура підвищується або падає за межі температури фазового переходу РСМ, накопичена теплова енергія або охолоджувальний потенціал буде автоматично вивільнено. Пасивні системи характеризуються низькими початковими капіталовкладеннями та експлуатаційними витратами, але мають малий обсяг накопичення енергії [3]. Деякі експерименти показали, що пасивні системи працюють неефективно за певних умов. В певних кліматичних зонах цикл фазового переходу РСМ у пасивній системі не є повним, і значний об'єм РСМ не задіяний в акумуляції теплової енергії.

Застосування активних систем вирішує вищезгадану проблему. В таких системах накопичувач охолоджувального потенціалу або теплової енергії поєднується з традиційною системою опалення, вентиляції та кондиціонування та є її невід'ємною частиною. Основними перевагами є зменшення розміру обладнання, зниження капітальних і експлуатаційних витрат, економія енергії, зміщення пікової потужності відповідно до потреб та покращення роботи системи [3]. В більшості випадків у активних системах через певні елементи будівлі циркулює теплоносій, за допомогою якого можна контролювати фазовий перехід РСМ, таким чином досягаючи максимальної ефективності від накопичення енергії.

Крім включення фазоперехідних матеріалів в оболонку будівель, їх застосовують в теплових акумуляторах. Такі акумулятори можуть врахувати невідповідність між профілем генерації енергії від відновлювальних джерел енергії та споживанням, збільшувати ефективність систем опалення районів міста. Також є дослідження щодо встановлення теплових акумуляторів великої ємності на атомних електричних станціях малої потужності

замість регенеративних підігрівачів. Це дозволяє збільшити потужність станції в пікові години [5].

Промислові парафіни є найпоширенішими фазоперехідними матеріалами, що застосовуються в теплових акумуляторах. Такі матеріали мають один суттєвий недолік – низьку теплопровідність. Велика кількість експериментів і досліджень присвячена усуненню цього недоліку, тобто інтенсифікації теплообміну в об'ємі PCM теплового акумулятора. Серед найефективніших методів інтенсифікації теплообміну варто виділити наступні:

- додавання наночастинок до PCM (таких як металеві частинки, вуглецеве волокно, графіт і композити з наночастинок);
- мікроінкапсуляція PCM;
- зовнішнє оребрення труб, по яких протікає теплоносіє;
- внутрішнє оребрення труб для турбулізації потоку теплоносія та зменшення товщини пограничного шару.

Вищезгадані методи інтенсифікації дозволяють значно збільшити об'єм PCM, який задіяний у процесі акумуляції тепла, вирівняти градієнт температур по об'єму PCM, а також значно зменшити швидкість зарядки/розрядки теплового акумулятора.

Процеси теплообміну в теплових акумуляторах зазвичай досліджуються за допомогою таких інструментів, як COMSOL Multiphysics, ANSYS FLUENT, EnergyPlus та інших [4].

Висновки. В рамках даної роботи було проаналізовано десятки джерел літератури, в яких описуються різні типи PCM, їх фізичні та хімічні властивості, а також сфери застосування таких матеріалів. Розглянуто різні методи включення PCM в оболонку будівель та ефективність застосування таких методів. Окремо розглянуто застосування PCM в теплових акумуляторах, методи інтенсифікації теплообміну в таких пристроях, а також вплив різних параметрів (таких як розміри акумулятора, тип PCM, напрямок руху теплоносія, його швидкість та інш.) на їх продуктивність.

Базуючись на аналізі існуючої на сьогоднішній день літератури, прийнято рішення дослідити можливість застосування PCM для покращення енергоефективності будівель в кліматичних умовах України з урахуванням зміни клімату в найближчому майбутньому. Також планується дослідити ефективність застосування теплових акумуляторів із PCM для компенсації нестабільного профілю генерації ВДЕ в рамках процесу енергозабезпечення будівель.

Перелік посилань:

1. Buildings – Energy System – IEA. IEA. URL: <https://www.iea.org/energy-system/buildings> (дата звернення: 06.03.2025).
2. The Future of Cooling – Analysis – IEA. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling> (дата звернення: 06.03.2025).
3. Research Progress on the Phase Change Materials for Cold Thermal Energy Storage / X. Zhang et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 24. P. 8233. URL: <https://doi.org/10.3390/en14248233>
4. Al-Yasiri Q., Szabó M. Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 36. P. 102122. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102122>
5. Lebedev V., Deev A., Deev K. Method for Calculating Heat Transfer in a Heat Accumulator Using a Phase Change Material with Intensification Due to Longitudinal Fins. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 21. P. 5281. URL: <https://doi.org/10.3390/en17215281>

¹ Аспірант 1 курсу Левицький О.О.

¹ Проф., д.т.н. Дешко В.І.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

СУЧАСНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ БУДІВЕЛЬ ПІСЛЯ ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ: РЕГРЕСІЙНІ, НЕЙРОННІ ТА ГІБРИДНІ ПІДХОДИ

Постановка проблеми та її актуальність. Будівлі є одним із основних споживачів енергії у світі (близько 30 % глобального балансу), а в Україні понад 80 % існуючого будівельного фонду характеризуються низькою теплоефективністю. Це створює серйозні виклики для оптимізації енергоспоживання та зниження викидів CO₂. Підвищення енергоефективності через термомодернізацію є необхідним заходом для досягнення енергозбереження та декарбонізації, проте традиційні методи прогнозування часто не враховують складні нелінійні взаємозв'язки між численними чинниками, а також не адаптовані до змін режимів роботи будівель після модернізації [1–3].

Аналіз останніх досліджень. Огляд сучасної літератури (21 джерело) показує, що класичні регресійні методи (наприклад, множинна лінійна регресія, ARIMA і SVR) дозволяють оцінити вплив кліматичних та експлуатаційних чинників, проте їх точність обмежена [4–7]. Дослідження [2, 3] підкреслюють необхідність врахування як зовнішніх, так і внутрішніх параметрів будівлі для точного прогнозування енергоспоживання. Натомість, методи штучних нейронних мереж (MLP, LSTM, CNN) забезпечують можливість моделювання нелінійних залежностей, що підтверджується роботами [1, 14, 15]. Крім того, гібридні підходи (наприклад, ARIMA+LSTM, стекінг-ансамблі) дозволяють поєднати переваги статистичних методів і сучасних алгоритмів машинного навчання, що значно знижує похибки прогнозування (RMSE, MAPE) [10–13, 19].

Формулювання мети. Метою доповіді є аналіз сучасних підходів до прогнозування енергоспоживання будівель після проведення термомодернізації, визначення їх переваг і обмежень, а також обґрунтування практичної ефективності гібридних методів і концепції цифрових двійників для розробки систем моніторингу та управління енергоспоживанням у режимі реального часу.

Основна частина.

Класичні регресійні моделі. Методи, такі як множинна регресія, ARIMA і SVR, використовуються для оцінки впливу зовнішніх чинників (наприклад, клімату) на енергоспоживання. Наприклад, аналіз супермаркету у Великобританії [4] показав, що при підвищенні температури електроспоживання зростає, а споживання газу – знижується. Для офісних будівель розроблено регресійні залежності на основі 3840 варіантів моделей [5], а також методи з використанням симуляцій DOE-2 [6]. Окрім того, застосування SVR з оптимізацією диференційною еволюцією дозволило досягти MAPE ~3,8 % [7].

Методи штучних нейронних мереж. Штучні нейронні мережі (MLP, LSTM, CNN) активно використовуються для прогнозування завдяки здатності моделювати нелінійні залежності між численними факторами [1]. Зокрема, модель LSTM, що враховує дані про присутність людей, демонструє помилку прогнозування близько 2,05 % [14]. Для покращення точності застосовують також гібридні рішення, де CNN використовується як екстрактор ознак, а простий класифікатор (ELM) миттєво визначає ваги [9]; підхід із застосуванням attention-механізмів, наприклад, BiGTA-Net, показав переваги в прогнозуванні енергоспоживання [13, 15].

Гібридні методи та цифрові двійники. Оскільки жодна окрема модель не може повністю відобразити складну динаміку енергоспоживання, поєднують статистичні та нейромережеві

методи. Наприклад, схема ARIMA+LSTM дозволяє значно знизити RMSE (до 7,35) порівняно з окремими моделями [12]. Також популярним є поєднання LSTM з Prophet для покращення погодинного прогнозу [19]. Окремо розглядається концепція цифрових двійників, що дозволяє в режимі реального часу моніторити та оптимізувати енергоспоживання [16].

Приклади практичного застосування. Практичні кейси демонструють високу ефективність сучасних методів. Наприклад, для офісних будівель використання LSTM забезпечує похибку прогнозу близько 2 % [14], а у дата-центрах, за допомогою глибоких нейромереж від DeepMind, знижується споживання енергії на кондиціонування до 40 % [15]. В Україні вже запропоновані до впровадження системи на основі методів з огляду, що дозволяють економити до 12–15 % теплової енергії [2]. Також у «розумному місті» Сонгдо застосовано стекінг-ансамбль із метарегресором, що забезпечує $R^2 \approx 0,9789$ [10, 11, 12].

Порівняльний аналіз. Аналіз підтверджує, що гібридні та ансамблеві забезпечують найвищу точність прогнозування (середня похибка 3–5 %), тоді як класичні регресійні моделі мають більші похибки (5–10 % і більше). Результати підтверджують перевагу інтегрованих підходів для енергоменеджменту будівель після термомодернізації.

Висновки. Сучасні методи штучних нейронних мереж та їх ансамблеві варіанти забезпечують похибку прогнозування в межах 2–5 %, що значно перевищує точність традиційних регресійних моделей.

Гібридні моделі, такі як ARIMA+LSTM, демонструють зниження RMSE у 2–2,5 рази порівняно з окремими підходами, що свідчить про їх практичну ефективність.

Інтеграція статистичних методів із сучасними алгоритмами штучного інтелекту відкриває нові можливості для розробки інноваційних систем моніторингу та управління енергоспоживанням, зокрема через впровадження цифрових двійників.

Отримані результати мають практичне значення для оптимізації енергоресурсів як у комерційних, так і у муніципальних об'єктах.

Перелік посилань:

1. A Review of Research on Building Energy Consumption Prediction Models Based on Artificial Neural Networks / Q. Yin et al. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 17. P. 7805. URL: <https://doi.org/10.3390/su16177805> (date of access: 18.03.2025).
2. Reinforcement Learning Model for Energy System Management to Ensure Energy Efficiency and Comfort in Buildings / I. Bilous et al. *Energy Engineering*. 2024. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.32604/ee.2024.051684> (date of access: 18.03.2025).
3. A Review of Data-Driven Building Energy Prediction / H. Liu et al. *Buildings*. 2023. Vol. 13, no. 2. P. 532. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13020532> (date of access: 18.03.2025).
4. Braun M.R., Altan H., Beck S.B.M. Using regression analysis to predict the future energy consumption of a supermarket in the UK. *Applied Energy*. 2014. Vol. 130. P. 305–313. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.062> (date of access: 18.03.2025).
5. Regression models for predicting UK office building energy consumption from heating and cooling demands / I. Korolija et al. *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 59. P. 214–227. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.005> (date of access: 18.03.2025).
6. Amiri S.S., Mottahedi M., Asadi S. Using multiple regression analysis to develop energy consumption indicators for commercial buildings in the U.S. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 109. P. 209–216. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.073> (date of access: 18.03.2025).
7. Time series forecasting for building energy consumption using weighted Support Vector Regression with differential evolution optimization technique / F. Zhang et al. *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 126. P. 94–103. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.028> (date of access: 18.03.2025).
8. Mohandes S.R., Zhang X., Mahdiyar A. A comprehensive review on the application of artificial neural networks in building energy analysis. *Neurocomputing*. 2019. Vol. 340. P. 55–75. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.02.040> (date of access: 18.03.2025).

9. Short-Term Load Forecasting Model of Ameliorated CNN Based on Adaptive Mutation Fruit Fly Optimization Algorithm / K. Sun et al. *Electric Power Components and Systems*. 2022. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1080/15325008.2022.2135051> (date of access: 18.03.2025).
10. Carrera B., Peyrard S., Kim K. Meta-regression framework for energy consumption prediction in a smart city: A case study of Songdo in South Korea. *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 72. P. 103025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103025> (date of access: 18.03.2025).
11. Carrera B., Kim K. A Regression Framework for Energy Consumption in Smart Cities with Encoder-Decoder Recurrent Neural Networks. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 22. P. 7508. URL: <https://doi.org/10.3390/en16227508> (date of access: 18.03.2025).
12. Peak Electrical Energy Consumption Prediction by ARIMA, LSTM, GRU, ARIMA-LSTM and ARIMA-GRU Approaches / Pierre A.A. et al. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 12. P. 4739. URL: <https://doi.org/10.3390/en16124739> (date of access: 18.03.2025).
13. BiGTA-Net: A Hybrid Deep Learning-Based Electrical Energy Forecasting Model for Building Energy Management Systems / D. So et al. *Systems*. 2023. Vol. 11, no. 9. P. 456. URL: <https://doi.org/10.3390/systems11090456> (date of access: 18.03.2025).
14. Occupant-Aware Energy Consumption Prediction in Smart Buildings Using a LSTM Model and Time Series Data / M. Anan et al. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 24. P. 6451. URL: <https://doi.org/10.3390/en17246451> (date of access: 18.03.2025).
15. Evans R, Gao J. DeepMind AI Reduces Google Data Centre Cooling Bill by 40%. *Google DeepMind*. URL: <https://deepmind.google/discover/blog/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-by-40/> (date of access: 18.03.2025).
16. Arsecularatne B., Rodrigo N., Chang R. Digital Twins for Reducing Energy Consumption in Buildings: A Review. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 21. P. 9275. URL: <https://doi.org/10.3390/su16219275> (date of access: 18.03.2025).
17. Review of Artificial Neural Network Approaches for Predicting Building Energy Consumption / S.S. Md Ramli et al. 2023 *IEEE 3rd International Conference in Power Engineering Applications (ICPEA)*, Putrajaya, Malaysia, 6–7 March 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/icpea56918.2023.10093183> (date of access: 18.03.2025).
18. Building Energy Simulations at Urban Scale Based on Standardized Data Models Using a Transparent Enrichment Process / A. Geiger et al. *Building Simulation 2019*, Rome, Italy, 2–4 September 2019. URL: <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210250> (date of access: 18.03.2025).
19. Study on deep reinforcement learning techniques for building energy consumption forecasting / T. Liu et al. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 208. P. 109675. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109675> (date of access: 18.03.2025).
20. Accuracy analyses and model comparison of machine learning adopted in building energy consumption prediction / Z. Liu et al. *Energy Exploration & Exploitation*. 2019. Vol. 37, no. 4. P. 1426–1451. URL: <https://doi.org/10.1177/0144598718822400> (date of access: 18.03.2025).
21. Villano F., Mauro G.M., Pedace A. A Review on Machine/Deep Learning Techniques Applied to Building Energy Simulation, Optimization and Management. *Thermo*. 2024. Vol. 4, no. 1. P. 100–139. URL: <https://doi.org/10.3390/thermo4010008> (date of access: 18.03.2025).
22. Bilous I., Deshko V., Sukhodub I. Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models. *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 20. P. 327–336. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2018.07.021> (date of access: 18.03.2025).

¹ Аспірант 1 курсу Політикін М.В.

¹ Асист., к.т.н. Яценко О.І.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=LRiP-5AAAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ ЖИТЛОВОГО БАГАТОКВАРТИРНОГО БУДИНКУ

Постановка проблеми та її актуальність. В умовах воєнного стану та відбудови країни прагнення України до енергетичної незалежності стало одним із пріоритетних завдань [1]. У цьому контексті особливого значення набувають енергоефективність, диверсифікація джерел енергії та впровадження відновлюваних енергетичних технологій у міському середовищі. Скорочення енергоспоживання та перехід до сталих енергетичних рішень сприятиме не лише зниженню негативного впливу урбанізації на довкілля, а й підвищенню енергетичної безпеки.

Масовані атаки на енергетичну інфраструктуру країни та перебої в електропостачанні значно актуалізували проекти з використання альтернативних джерел енергії, зокрема сонячних та геотермальних. Підвищений інтерес до встановлення сонячних електростанцій (СЕС) на дахах багатоквартирних житлових будинків в Україні спостерігається протягом останніх кількох років, так як для реалізації таких проектів існують програми державної підтримки, які передбачають компенсацію частини витрат на встановлення СЕС (наприклад, програма «ГрінДІМ» Фонду енергоефективності).

Аналіз останніх досліджень. Авторами роботи [2] було досліджено потенціал встановлення фотоелектричних систем для міста Вроцлав. Аналіз дозволив визначити, що у великому місті площею майже 300 км² є понад 11 км² дахів, з яких понад 60 % придатні для встановлення фотоелектричних модулів та понад 30 % – це дахи житлових будівель.

На ефективність використання сонячної енергії будинками впливають затінення від навколишніх будівель з різною архітектурою та висотою. В роботі [3] досліджується можливість використання сонячної енергії в багатоповерхових житлових будинках, зокрема оцінюється потенціал встановлення сонячних панелей на дахах і фасадах таких будівель. Дослідження умов затінення у роботі [2] показало, що в кожен день року принаймні 50 % поверхонь дахів не затінюються.

В роботі [4] досліджено необхідні площі майданчиків та вартості сонячних електростанцій для автономного живлення багатоквартирних будинків для потреб електропостачання, опалення, та гарячого водопостачання в різних містах України (Львів, Київ, Харків, Одеса). Наведені в роботі [4] площі неможливо використовувати в умовах міста, тому в даній роботі пропонується дослідити застосування СЕС саме для потреб критичної інфраструктури житлового багатоквартирного будинку.

Формулювання мети. Метою даного дослідження є аналіз ефективності застосування сонячної електростанції для забезпечення електропостачання інфраструктури житлового багатоквартирного будинку у місті Києві.

Основна частина. Об'єктом аналізу і моделювання є житлова багатоповерхова будівля у місті Києві. Це типовий 1 секційний житловий будинок 2004 року будівництва, що складається з 74 квартир та 4 нежитлових приміщень на 1 поверсі. Житлова площа становить 6574 м², а площа місць загального користування (МЗК) та допоміжних приміщень – 1730,7 м². На даху будівлі розміщена діюча СЕС, вихідні дані якої використовуються для моделювання.

Моделювання СЕС проводилось з використанням спеціалізованого програмного середовища PV*SOL premium, яке є потужним інструментом для детального аналізу та оптимізації сонячних електростанцій. Для імітації реального об'єкта було виконано 3D-моделювання будівлі з сонячною електростанцією на даху (рис. 1). В ході моделювання використані точні розміри та орієнтація будівлі за сторонами світу, а також фактичні дані щодо висоти парапету та надбудов. Сонячний масив складає 76 фотоелектричних модулів, потужністю 425 Вт кожен, розміщених аналогічно до їх фактичного розташування за сторонами світу та кута нахилу до горизонту (30° для 40 модулів та 60° для 4 модулів, які розміщені на плоскій поверхні даху, а також 90° для 20 модулів та 60° для 12 модулів, які розміщені на стіні надбудови). Більшість модулів (56 од.) орієнтовані на ПдСх, інші – на ПдЗх (20 од.).

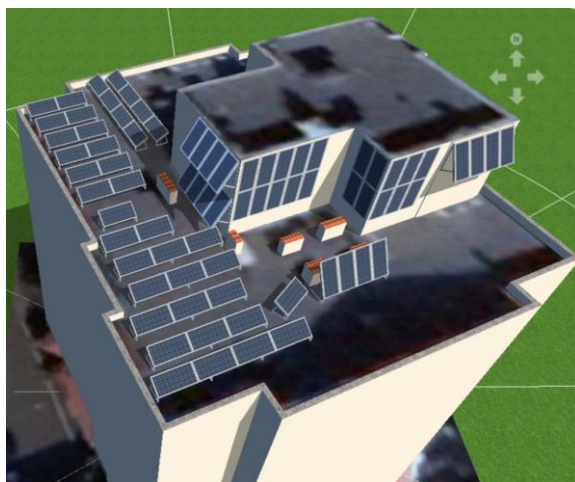


Рисунок 1 – 3D-модель сонячного масиву на даху в PV*SOL

Загальна потужність СЕС становить 32,3 кВт. Задане річне електроспоживання загальнобудинкових споживачів становить 34 500 кВт·год було розбито по місяцям відповідно до фактичних даних про споживання.

У дослідженні проведено моделювання роботи системи з СЕС, результати якого відображаються у помісячному балансі генерації та споживання електричної енергії. Частка покриття представлена на рис. 2, що дозволяє проаналізувати сезонні особливості ефективності роботи системи.

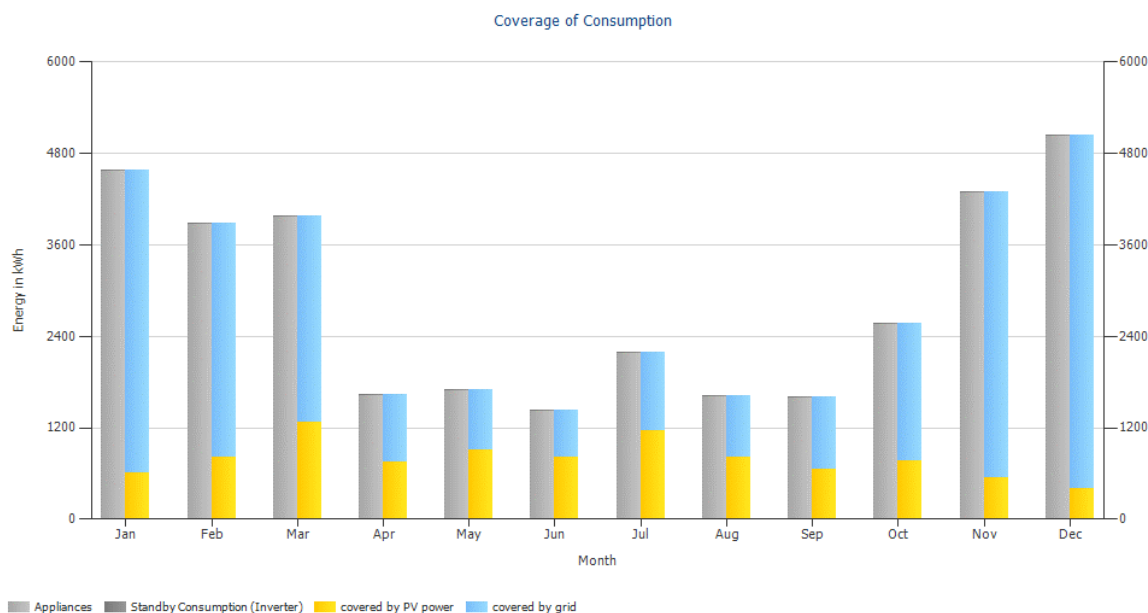


Рисунок 2 – Помісячна частка покриття споживачів за рахунок СЕС та мережі

Результати моделювання СЕС у річному розрізі демонструють, що наявна сонячна електростанція покриває 27,5 % потреб в електроенергії основних загальнобудинкових споживачів. В літній період – до 57 %.

Варто також звернути увагу на те, що в місяці з високим рівнем сонячної активності (квітень-вересень) використовується всього близько 27 % від згенерованої СЕС електроенергії, в той час як у зимовий період, зокрема в грудні, показник може досягати майже 80 %.

Типовий баланс генерації та споживання електричної енергії у зимовий та літній дні представлено на рис. 3.

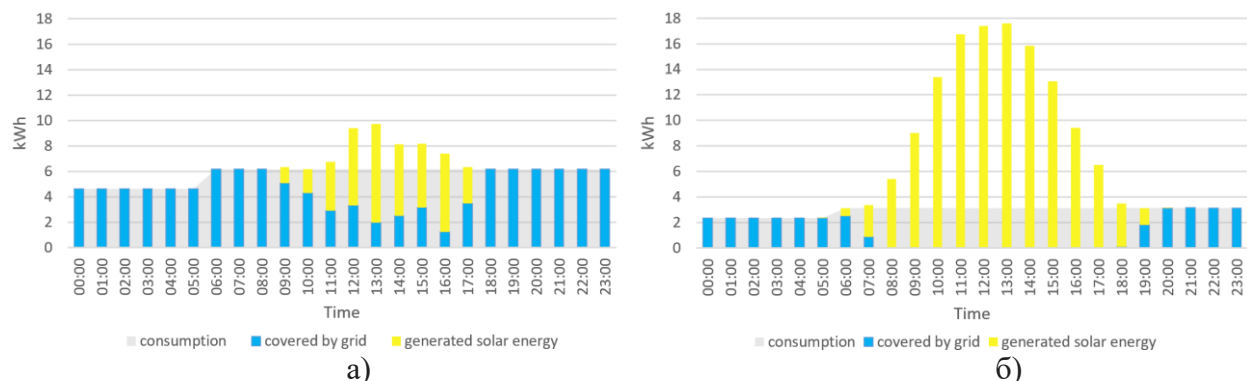


Рисунок 3 – Погодинна частка покриття споживачів за рахунок СЕС та мережі:
а) типовий зимовий день (19,9 % споживання покрито СЕС)
б) типовий літній день (54,8 % споживання покрито СЕС)

Висновки. В результаті аналізу наведених вище графіків виявлено, що в години максимальної сонячної активності електростанція виробляє більше електроенергії, ніж споживають наявні споживачі, що створює можливості для передачі надлишку електроенергії в мережу або під'єднання нових споживачів. Так в типовий літній день (рис. 3б) близько 70 % згенерованої сонячним масивом електроенергії не використовується, а в зимовий (рис. 3а) – всього 32 %. Загалом, протягом року 16 529,7 кВт-год виробленої СЕС електроенергії не було використано, що створює можливості для її продажу в мережу відповідно до механізму «Активний споживач електроенергії» або спрямування на додаткові потреби, зокрема живлення нових споживачів, наприклад, теплового насоса для гарячого водопостачання. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації роботи існуючої системи.

Перелік посилань:

1. Кузь В.А. Енергетична безпека держави в умовах посилення глобалізаційних процесів. Університетські наукові записки. 2023. № 3–4 (93–94). С. 18–29.
2. Dąbek P.B., Jurasz J. GIS estimated potential of rooftop PVs in urban areas – case study Wrocław (Poland). E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 45. P. 00014. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184500014>.
3. Tian J., Ooka R. Evaluation of solar energy potential for residential buildings in urban environments based on a parametric approach. Sustainable Cities and Society. 2024. Vol. 106. P. 105350. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105350>.
4. Савченко О.О, Козак Х.Р, Федак Ю.Т. Автономна сонячна електростанція для будинку ОСББ. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. 2018. № 888. С. 117–122.

¹ Магістрант 1 курсу Турко Р.В.

¹ Асист., к.т.н. Яценко О.І.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=LRiP-5AAAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЖИТЛОВИХ БУДІВЛЯХ ЗАСОБАМИ DESIGNBUILDER

Постановка проблеми та її актуальність. Після початку повномасштабного вторгнення енергетична інфраструктура України зазнала значних руйнувань, особливо системи генерації. Дефіцит енергії показав наскільки важливими є енергоефективність та енергетична стійкість будівель, особливо якщо говорити про житловий сектор який споживає значний відсоток від генерації енергії. Шляхом енергомодернізації будівель можна суттєво знизити споживання, а відповідно й дефіцит енергії в енергосистемі.

Першим кроком на шляху до енергоефективності, завжди, є оцінка існуючого стану енергоефективності будівлі та оцінка потенціалу енергозбереження. Для вирішення даного завдання існують різні методики. Однією з найточніших вважається створення енергетичної моделі будівлі.

Аналіз останніх досліджень. Для проведення енергетичного моделювання існують різні програмні забезпечення, одним з яких є DesignBuilder. Програмне середовище DesignBuilder має широкий набір інструментів для створення енергетичних моделей високої точності, а також зручний користувацький інтерфейс. За допомогою енергетичної моделі можна оцінити фактичний стан енергоефективності будівлі та оцінити ступінь впливу різних факторів на неї.

Формулювання мети. Дослідити можливості енергетичного моделювання на прикладі житлової будівлі у програмному середовищі DesignBuilder та визначити вихідні параметри для створення базової моделі.

Основна частина. Об'єктом дослідження в даній роботі є багатоквартирний 4-ох поверховий житловий будинок в Луганській області.

Процес створення енергетичної моделі в програмному середовищі DesignBuilder умовно можна розділити на наступні етапи:

- збір та обробка необхідної інформації про об'єкт дослідження;
- попередні налаштування програмного середовища;
- створення геометричної моделі будівлі в 3D;
- внесення інформації про конструкції будівлі та енергетичний режим;
- симуляція та обробка отриманої інформації.

Збір та обробка необхідної інформації про об'єкт дослідження. Для створення енергетичної моделі потрібна всі інформація про фактори, що впливають на енергоспоживання будівлі. До таких факторів належать: розташування та орієнтація будівлі, обміри геометрії будівлі, матеріали та стан будівельних конструкцій, тип та стан інженерних систем будівлі. При відсутності певних даних (наприклад кліматичних, або тепломеханічних характеристик матеріалів) можна скористатися вбудованими бібліотеками даних програмного середовища DesignBuilder. Перелічену вище інформацію можна отримати з існуючої технічної документації на будівлю, нормативних документів (ДСТУ, ДБН) та при обстеженні будівлі.

Попередні налаштування програмного середовища. При створенні нового проєкту в програмному середовищі DesignBuilder потрібно провести попередні налаштування проєкту. Прикладом таких налаштувань є внесення інформації про розташування будівлі, вибір бібліотек кліматичних даних налаштування роботи з геометрією будівлі тощо. Ці налаштування, в переважній більшості, стосуються саме зовнішніх чинників, що впливають на енергоспоживання

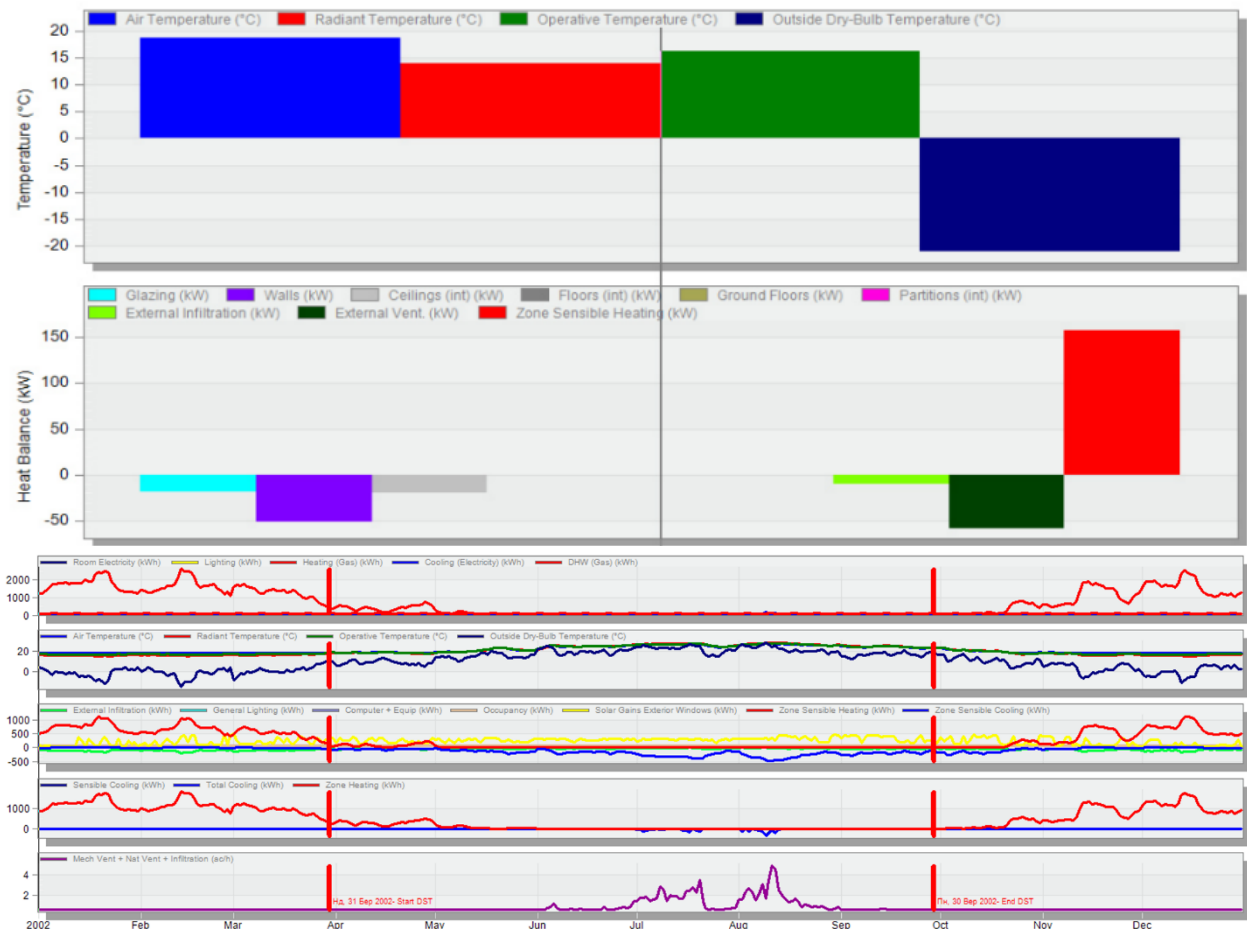


Рисунок 3 – Результати симуляції об'єкту

Висновки. Програмне забезпечення DesignBuilder є потужним інструментом для створення енергетичних моделей. Його функціонал дозволяє робити досить точні прорахунки базового, фактичного та запропонованого сценаріїв енергоспоживання, що в свою чергу дозволяє оцінити доцільність та необхідність впровадження тих чи інших заходів з енергозбереження.

Перелік посилань:

1. DesignBuilder Simulation + CFD Training Guide [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.designbuilder.co.uk/training/onlinelearning/tutorials>. Назва з екрану.
2. Будівельна кліматологія: ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. – [Чинні від 2011-11-01] // Мінрегіонбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 2011. – 123 с. – (Національний стандарт України).
3. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2016. – [Чинні від 2016-10-08, на заміну ДБН В.2.6-31:2006.] // Мінбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 20016. –33 с. – (Державні будівельні норми України).
4. Опалення, вентиляція та кондиціювання: ДБН В.2.5-67:2013. – [Чинні від 2014-01-01] // Мінбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 2013. – 149 с. (Державні будівельні норми України).
5. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні: ДСТУ- Б А.2.2-12:2015. – [Чинні від 2016-01-01] // Мінрегіонбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 2015. – 145 с. – (Національний стандарт України).

¹ Аспірант 2 курсу Ходаківський В.О.

¹ Ст.н.спів., к.т.н. Карпенко Д.С.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=R93mmvkAAAAJ&hl=uk&oi=ao>

¹ Інститут загальної енергетики НАН України

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ УКРАЇНИ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасна система централізованого теплопостачання (ЦТ) України є ключовою ланкою національної інфраструктури, що забезпечує стабільне теплопостачання житлового фонду, соціально-культурних та промислових об'єктів. Однак, тривала експлуатація, недостатність інвестицій та залежність від обмеженого кола енергоресурсів (переважно природного газу та вугілля) зумовили високий рівень зношеності обладнання, значні втрати тепла при транспортуванні та підвищену вразливість до зовнішніх факторів, таких як коливання цін на енергоносії та геополітична нестабільність. Зважаючи на поточну воєнну ситуацію, питання надійності ЦТ набуває критичного значення для забезпечення життєдіяльності населення та функціонування критичної інфраструктури. Перебої у теплопостачанні, спричинені пошкодженням об'єктів інфраструктури або дефіцитом енергоресурсів, можуть мати катастрофічні наслідки, особливо в зимовий період. Відтак, розробка та впровадження ефективних методів підвищення надійності ЦТ є актуальним науково-технічним завданням, спрямованим на забезпечення енергетичної безпеки держави та підвищення якості життя населення.

Аналіз останніх досліджень. Огляд наукових публікацій та галузевих звітів демонструє зростаючий інтерес до розробки та впровадження інноваційних технологій в сфері ЦТ. Значна увага приділяється дослідженню можливостей когенерації (СНР) як ефективного способу одночасного виробництва теплової та електричної енергії, що дозволяє підвищити коефіцієнт використання палива та знизити викиди парникових газів [1–3]. Досліджуються перспективи використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема біомаси, геотермальної енергії та сонячної енергії, для декарбонізації сектору ЦТ [4–5]. Активно вивчаються можливості інтеграції систем акумулювання теплової енергії для згладжування пікових навантажень та підвищення гнучкості систем ЦТ [3, 4, 6]. Розробляються методи оптимізації гідравлічного режиму теплових мереж з використанням сучасних інформаційних технологій та моделювання [7,8]. Значна увага приділяється дослідженню можливостей використання цифрових двійників для моніторингу та управління системами ЦТ [7]. Важливим аспектом є аналіз економічної доцільності впровадження різних технологій та методів підвищення надійності ЦТ, з урахуванням місцевих умов та доступних ресурсів.

Формулювання мети. Метою даної наукової роботи є розробка комплексу науково обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення надійності ЦТ України шляхом аналізу та оцінки ефективності різних технологій, методів та організаційних рішень, з урахуванням сучасних викликів та перспектив розвитку енергетичного сектору.

Основна частина. Більшість систем ЦТ України характеризуються значним фізичним зносом обладнання, зокрема теплових мереж, котелень та центральних теплових пунктів (ЦТП). Застарілі технології та матеріали призводять до значних втрат тепла при транспортуванні теплоносія. Згідно з даними Державної служби статистики України (Держстат), середній коефіцієнт корисної дії (ККД) котелень, що працюють на природному газі, становить близько 75–85 %, тоді як для котелень на вугіллі цей показник може бути

значно нижчим, досягаючи 60–70 % [7–8]. Втрати тепла в теплових мережах в середньому складають 15–25 %, проте в окремих регіонах цей показник може досягати 30 % і більше.

Структура споживання тепла в Україні характеризується значною часткою житлового сектору (близько 70–80 %), що обумовлено кліматичними умовами та відносно низьким рівнем енергоефективності будівель.

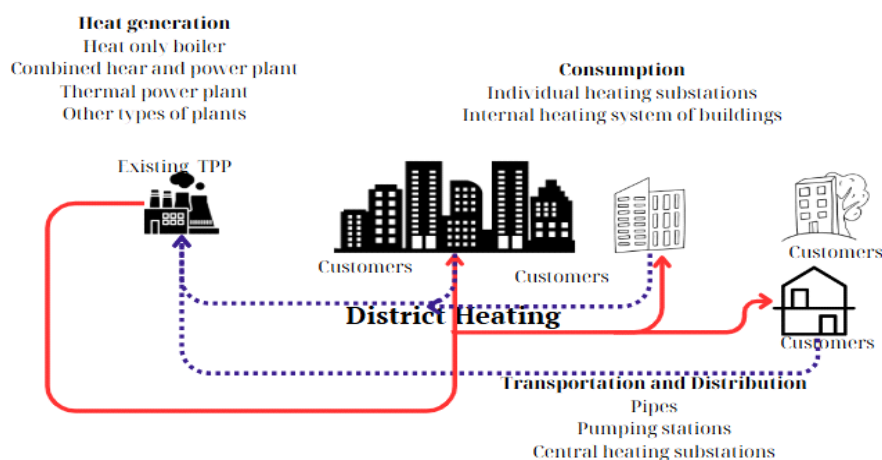


Рисунок 1 – Спрощена схема традиційної системи ЦТ

На рис. 1 представлено узагальнену схему традиційної системи ЦТ, що включає в себе: джерело теплової енергії (котельню), теплову мережу, центральні теплові пункти (ЦТП) та споживачів тепла (житлові будинки, об'єкти соціальної інфраструктури, промислові підприємства). Схема ілюструє послідовність передачі теплоносія від котельні через теплову мережу до ЦТП, де здійснюється розподіл тепла між окремими споживачами.

У таблиці 1 наведено порівняльний аналіз ключових технологій, що можуть бути використані для модернізації та підвищення надійності систем ЦТ. Таблиця містить короткий опис кожної технології, а також перелік її основних переваг та недоліків, що дозволяє оцінити її потенціал та доцільність застосування в конкретних умовах.

Забезпечення стабільної роботи систем централізованого теплопостачання (ЦТ) в умовах воєнного часу потребує впровадження комплексних технічних та організаційних рішень. Оптимізація енергетичних ресурсів, зменшення втрат, впровадження цифрових технологій та децентралізація теплогенеруючих потужностей є ключовими напрямками підвищення ефективності та надійності ЦТ. Одним із перспективних рішень є когенерація (СНР), яка дозволяє одночасно виробляти тепло та електроенергію, підвищуючи загальний коефіцієнт корисної дії системи. Важливу роль відіграє інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що сприяє енергетичній незалежності та зниженню шкідливих викидів. Використання технології Power-to-Heat (P2H) дозволяє перетворювати надлишкову електроенергію на тепло, оптимізуючи навантаження на мережу та сприяючи декарбонізації сектора. Для підвищення надійності теплопостачання важливим є розвиток систем акумулювання теплової енергії (TES), що забезпечує гнучкість у використанні ресурсів та зниження пікових навантажень. Модернізація теплових мереж шляхом заміни застарілих трубопроводів сприяє зменшенню втрат та підвищенню ефективності транспортування теплової енергії. Додатково впровадження систем енергоменеджменту (EMS) дозволяє оптимізувати використання енергоресурсів, забезпечуючи більш ефективний контроль споживання. Автоматизовані системи управління сприяють оперативному моніторингу, швидкому виявленню несправностей та оптимізації гідравлічного режиму роботи тепломереж.

Представлені заходи спрямовані на підвищення ефективності, зниження залежності від традиційних енергоносіїв та мінімізацію ризиків в умовах високої невизначеності.

Таблиця 1 – Методи для підвищення надійності систем ЦТ

Технологія	Опис	Переваги	Недоліки
Когенерація (CHP)	Одночасне виробництво теплової та електричної енергії з одного джерела палива.	Підвищення ККД, зниження викидів, енергетична децентралізація.	Високі інвестиції, необхідність обслуговування.
ВДЕ та Power-to-Heat	Використання сонця, вітру, біомаси, біогазу та водню; перетворення надлишкової електроенергії в тепло.	Енергетична незалежність, зменшення викидів, оптимізація навантаження.	Залежність від сезонності, потреба в додатковому регулюванні.
Акумулювання тепла та модернізація мереж	Накопичення теплової енергії в непікові періоди; оновлення та ізоляція тепломереж.	Зменшення втрат тепла, стабілізація навантаження, підвищення надійності.	Високі капітальні витрати, ризики пошкодження інфраструктури.
Енергоменеджмент та автоматизоване управління	Використання цифрових технологій для моніторингу та оптимізації роботи системи.	Підвищення ефективності, швидке виявлення несправностей, зменшення витрат.	Витрати на впровадження, потреба в навчанні персоналу.

Висновки. Підвищення надійності ЦТ України є складним та багатоаспектним завданням, що потребує комплексного підходу та реалізації цілого ряду заходів, спрямованих на модернізацію існуючої інфраструктури, диверсифікацію джерел енергії, впровадження сучасних технологій та організаційних рішень. Результати проведеного дослідження дозволять визначити найбільш ефективні шляхи модернізації систем ЦТ, що сприятимуть підвищенню енергетичної безпеки держави, покращенню якості життя населення та зниженню негативного впливу на навколишнє середовище.

Перелік посилань:

1. Babak V., & Kulyk M. (2023). Increasing the efficiency and security of Integrated Power System operation through heat supply electrification in Ukraine. *Science and Innovation*, 19(5), 100–116. <https://doi.org/10.15407/scine19.05.100>
2. European Commission. (2024). Homepage. Retrieved January 3, 2025, from https://commission.europa.eu/index_en
3. Gao J., Du Z., Yang S., Xu Y., & Xu S. (2024). Research on intelligent heating for urban systems based on digital twin. *Journal of Physics: Conference Series*, 2806, 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2806/1/012003>
4. Havrylenko Y., & Derii V. (2024). Formation of legal framework for the functioning and development of green energy. *System Research in Energy*, 4(80), 120–133. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.120>
5. Karpenko D., Yevtukhova T., & Novoseltsev O. (2024). METHOD FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF THE DISTRICT HEATING SYSTEM UNDER MARKET CONDITIONS . *Vidnovluvana Energetika* , (4(79), 6–16. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\).6-16](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79).6-16)
6. Vitalii Khodakivskyi Dmytro Karpenko “Prospects for using combined heat and power plants and boiler houses to balance the integrated energy system of Ukraine” *Technologies and Engineering*, Vol. 25, No. 6, 2024
DOI: 10.30857/2786-5371.2024.6.3
7. Nikitin Y.Y., Yevtukhova T. O., Novoseltsev O.V., & Komkov I.S. (2024). Regional energy efficiency programs: Current status and development prospects. *Energy Technologies and Resource Saving*, 78 (1), 34–47. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.03>
8. Державна служба статистики України. <https://www.ukrstat.gov.ua/>

¹ Бакалаврант 4 курсу Корчма В.О.

¹ Ст.викл., к.т.н. Шевченко О.М.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=7gLsQIwAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ДІАГНОСТИКА СТАНУ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ БУДІВЛІ ЗАКЛАДУ ОСВІТИ ТА ВИЯВЛЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ

Постановка проблеми та її актуальність. Загальновідомо, що частка будівельного фонду у балансі світового енерговикористання складає близько 40% та третини глобальних викидів CO₂. В той же час будівлі є невід'ємною частиною нашого життя та створенні для забезпечення комфортних умов проживання, роботи, навчання. Тому для балансу між комфортом для користувачів та впливом будівель на довкілля, в останніх мають бути застосовані сучасні методи діагностики рівня енергоефективності, впровадженні технології теплозахисту, ВДЕ, енергоефективне обладнання та системи автоматизації. Український уряд активно підтримує інтеграцію європейських норм, зокрема запровадження енергоефективних стандартів у будівельному секторі та затвердження вимог до будівель з близьким до нульового рівня енергоспоживанням (nZEB) [1]. Постійно підсилюються вимоги щодо огорожувальних конструкцій [2]. В рамках дослідження будівлі існуючого закладу загальної середньої освіти, розміщеного у місті Чорноморськ Одеської області виконано детальне енергетичне обстеження, проведено розрахунки енергопотреб, побудовано модель будівлі в програмному середовищі E-Audit та розроблено заходи підвищення енергоефективності.

Аналіз останніх досліджень. Відповідно до чинного законодавства, новозбудована чи термомодернізована будівля на момент введення в експлуатацію має відповідати мінімальним вимогам з енергоефективності, що встановлені ДБН «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» [2]. Клас енергоефективності такої будівлі має становити не нижче «С». В той же час у ЄС введено вимоги щодо необхідності дотримання стандартів будівель з нульовим енергоспоживанням для всіх новобудов з 2028 року. В Україні також розробляється нормативна база у цій сфері. Проведення енергетичного аудиту будівлі є стандартизованою процедурою, що визначена низкою нормативних документів України та ЄС [3–4]. В той же час дослідження ефективності застосування інженерно-технічних рішень для підвищення енергоефективності будівель є актуальною темою сьогодення, що відображено у роботах як наукової спільноти, виробників енергоефективного обладнання так і об'єднань фахівців у цій сфері [5].

Формулювання мети. Метою роботи є діагностика стану інженерних систем будівлі (системи теплопостачання) закладу освіти з подальшою розробкою пропозицій їх енергоефективної модернізації.

Основна частина. Об'єктом енергетичного обстеження є економіко-правовий ліцей № 1 за адресою: м. Чорноморськ, вул. Шкільна, 8 (рис. 1).

Згідно з [6] кліматичні умови для міста Чорноморськ: кліматична зона – II (друга); розрахункова температура – мінус 18 °С; середня опалювальна температура – 2 °С; кількість днів опалювального періоду – 158 днів.

В ліцеї навчаються та працюють 670 осіб. Режим роботи – з понеділка по п'ятницю з 8:00 до 21:30. Загальна площа об'єкту складає 3537,1 м², а загальний об'єм – 15951,0 м³. Споруда налічує три поверхи, розрахункова висота поверху – 3,29 м. Споруда прийнята в експлуатацію у 1963 році. Вентиляція приміщень будівлі припливно-витяжна з природним спонуканням. Для забезпечення належного повітрообміну приміщення харчоблоку обладнані механічною системою припливно-витяжної вентиляції.



Рисунок 1 – Економіко-правовий ліцей №1 в м. Чорноморськ

Джерело теплопостачання – місцева котельня. Теплоносій – гаряча вода. Будівля приєднана до централізованої мережі через тепловий пункт за залежною схемою з центральним якісним регулюванням. Температурний графік системи опалення – 90/70 °С. Система опалення (СО) однотрубна з вертикальною розводкою. Теплова ізоляція вузла теплового вводу та трубопроводів системи опалення в неопалювальних приміщеннях знаходиться у незадовільному технічному стані.

В ході діагностики було виконано тепловізійне обстеження будівлі та її інженерних мереж, температурне сканування зі складанням температурної карти приміщень, аналіз даних з приладу обліку теплової енергії, опитування адміністрації, вчителів та учнів щодо рівня забезпечення комфортних умов впродовж року. За результатами обстеження та аналізу зібраної інформації отримано наступні висновки:

- 1) обладнання теплового пункту, що відповідає за автоматичне регулювання теплового потоку, за погодними умовами та умовами комфорту у приміщеннях не налаштоване;
- 2) СО розбалансована, балансувальні клапани відсутні;
- 3) відсутнє місцеве терморегулювання на опалювальних приладах;
- 4) теплоізоляція трубопроводів СО потребує повної модернізації.
- 5) будівля потребує термомодернізації огорожувальних конструкцій (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристики зовнішніх огорожувальних конструкцій будівлі

Вид конструкції	Зовнішні стіни	Вікна	Двері	Перекриття над неопалюваним підвалом	Суміщене покриття
Існуючий опір теплопередачі, $R_{\Sigma \text{пр}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	0,79	0,44	0,51	0,51	0,73
Мінімальне значення опору теплопередачі, згідно [2], R_{min} , $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	3,50	0,70	0,60	4,00	6,00

Виконано розрахунки енергопотреби та енергоспоживання будівлі ліцею відповідно до ДСТУ 9190 [7] з використанням програмного продукту E-Audit. Встановлено клас енергоефективності будівлі – G (рис. 2), що не відповідає мінімальним вимогам з енергоефективності відповідно до [2].

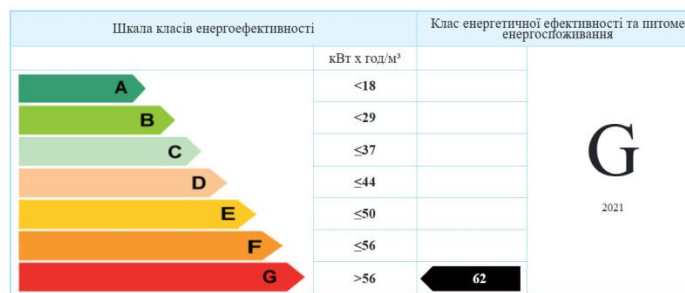


Рисунок 2 – Клас енергетичної ефективності закладу освіти для базового сценарію до впровадження заходів з підвищення енергоефективності

За результатами аналізу існуючого стану будівлі та інженерних систем запропоновано та розраховано техніко-економічні показники заходів з підвищення енергоефективності (табл. 2), реалізація яких дозволить підвищити клас енергоефективності будівлі до рівня B.

Таблиця 2 – Запропоновані заходи з підвищення енергоефективності та ефект від їх впровадження

№ з/п	Найменування заходу	Економія енергії від впровадження,		Орієнтована вартість впровадження, тис. грн.	Простий термін окупності, років
		кВт*год/рік	грн./рік		
1	Утеплення стін	185 622	1 596 349,2	11 426,2	7,16
2	Заміна вікон	128 419,3	1 104 405,9	7956,7	7,2
3	Утеплення перекриття	138 577,9	1 191 769,9	5639,8	4,73
4	Модернізація СО	36 359,1	312 688,26	3714,8	11,88

Висновки. В роботі проведено діагностику стану інженерних систем та оболонки будівлі, виконано розрахунки енергопотреб та енергоспоживання для потреб опалення, охолодження, гарячого водопостачання та освітлення, визначено клас енергоефективності до та після реалізації запропонованих заходів з підвищення енергоефективності будівлі економіко-правового ліцею № 1 м. Чорноморськ Одеської області, що дозволить підвищити його з G до B.

Перелік посилань:

1. Міністерство розвитку громад та територій України. Наказ «Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії» від 06.02.2025 № 168.
2. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель [Текст]. – На заміну ДБН В.2.6-31:2016; чинний від 2022.09.01. – К.: Мінрегіон України. – 27 с.
3. ДСТУ Б В.2.2-39:2016 Методи та етапи проведення енергетичного аудиту будівель [Текст]. – чинний від 2017.01.01. – К.: ДП НДІБК. – 50 с.
4. ДСТУ EN 16247-2:2015 Енергетичні аудити. Частина 2. Будівлі [Текст]. – чинний від 2017.01.01. – К.: ДП «НДІ «Система». – 32 с.
5. Офіційний сайт ГО «Асоціація енергоаудиторів України» - <https://aea.org.ua/>
6. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія [Текст]. – [Чинні від 2011-11-01]. Мінрегіонбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 2011. – 123 с.
7. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні [Текст]. – К.: ДП «УкрНДНЦ». – 140 с.

¹ Бакалаврант 4 курсу Ленков Д.Є.

¹ Асист., к.т.н. Яценко О.І.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=LRiP-5AAAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЗНИЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ НА ПОТРЕБИ ОПАЛЕННЯ НОВОВОЛИНСЬКОГО ЛІЦЕЮ №1

Постановка проблеми та її актуальність. На сьогоднішній день, більша частина шкільних навчальних закладів в Україні не відповідають діючим нормативним вимогам щодо енергоефективності. Приблизно 60 % закладів нераціонально використовують паливно-енергетичні ресурси та не дотримуються нормативних вимог до мікроклімату. Зазвичай проблемними місцями є: висока теплопередача огорожувальних конструкцій, застаріла розбалансована система опалення, залежне приєднання до тепломережі (без погодного регулювання) та відсутність або недостатня товщина утеплювача трубопроводів в неопалювальних приміщеннях.

Для вирішення цих проблем в Україні активно впроваджуються проєкти з енергомодернізації шкільних навчальних закладів. Крім того, у 2018 році в Україні вступили в дію оновлені державні будівельні норми щодо будівництва та реконструкції навчальних закладів, які передбачають обов'язкову енергомодернізацію будівель. Однак, попри ці зусилля, значна частина шкіл все ще потребує модернізації для досягнення належного рівня енергоефективності.

Формулювання мети. Метою даного дослідження є підвищення ефективності теплоспоживання будівлі учбового закладу шляхом застосування класичних енергозберігаючих заходів, спрямованих на забезпечення нормативних вимог щодо мікроклімату всередині приміщень, підвищення рівня комфортності перебування учнів та вчителів у навчальних класах, більш ефективне використання теплової енергії, підвищення класу енергоефективності та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Основна частина. Об'єктом даного дослідження є спеціалізована школа №1 міста Нововолинськ, Волинської області, 1959 року побудови. Заклад освіти має чотири поверхи, розрахований на 603 учні та 67 вчителів. Опалювальна площа будівлі становить 3644,3 м².

Зовнішні стіни виконані з червоної керамічної цегли на цементно-піщаному розчині, загальною товщиною 560 мм. Четвертий поверх будівлі ліцею межує з неопалювальним приміщенням горища. Крівля чотирьохскатна з пошкодженим покриттям, гідроізоляція відсутня. 86 % залізобетонної плити горищного перекриття вкрито шаром керамзитового гравію, товщиною 200 мм, інша частина – не має насипного шару. Під першим поверхом будівлі присутній опалювальний підвал, підлога підвалу по ґрунту (844 м²). Світлопрозорі конструкції будівлі неенергоефективні: 33,7 % конструкцій мають дерев'яні нещільні рами, 66,3 % – двокамерні склопакети з трикамерним металопластиковим профілем. Сім з восьми зовнішніх входних дверей до будівлі металопластикові з однокамерним склопакетом, одні – дерев'яні.

Система теплопостачання будівлі централізована, залежна. Система опалення одноконтурна, з верхньою розводкою по неопалювальному горищу, складає 28 стояків та 215 чавунних радіаторів. Температурний графік системи опалення 90/70 °С. Труби на неопалювальному горищі утеплені приблизно на 30 %. Автоматична балансувальна арматура на стояках та регулююча на приладах опалення відсутні. Система опалення гідравлічно розбалансована, нормативні умови по внутрішній температурі в частині навчальних класів не виконуються.

Дослідження енергетичних показників будівлі було проведено за допомогою програмного забезпечення «Е-Аудит» [1], що дає можливість аналізувати енергоспоживання, завдяки чому можна визначити потенціал для енергозбереження. Програма використовує наступні дані про об'єкт: місцезнаходження, склад огорожувальних конструкцій, типи вікон та дверей, поточний стан систем опалення, вентиляції (рівень повітрообміну) та освітлення.

У результаті дослідження було визначено фактичний клас енергоефективності будівлі навчального закладу – G, що є незадовільним та типовим показником для будівель, які не підлягали термомодернізації. Додатково було визначено потенціал впровадження заходів з енергозбереження для підвищення ефективності системи опалення. Розглядалися наступні заходи: утеплення стін та горищного перекриття, заміна світлопрозорих конструкцій та зовнішніх дверей, встановлення індивідуального теплового пункту (ІТП) з погодним регулюванням, балансування системи опалення та теплоізоляції трубопроводів системи опалення. Опір теплопередачі утеплених огорожувальних конструкцій після термомодернізації був прийнятий на рівні 75 % від R_{qmin} що є допустимим при реконструкції, відповідно до ДБН В.2.6-31:2021 [2]. Опір теплопередачі огорожувальних конструкцій навчального закладу до та після термомодернізації представлено у табл. 1.

Таблиця 1 – Опір теплопередачі огорожувальних конструкцій навчального закладу до та після термомодернізації

	Огорожувальні конструкції	Опір теплопередачі, $m^2 \cdot K/Wt$	
		Базовий	Запропонований
1	Зовнішні стіни	1,2	3,35
2	Світлопрозорі конструкції	0,45	0,96
3	Зовнішні двері	0,49	0,77
4	Горищне перекриття	1,4	4,51

В табл. 2 представлено баланс теплопередачі та теплонадходжень будівлі. З таблиці видно, що енергоспоживання будівлі скоротилося приблизно в 2,8 рази.

Таблиця 2 – Енергетичний баланс будівлі до та після модернізації

	Характеристика	Базовий	Запропонований
		тис. кВт·год/рік	тис. кВт·год/рік
1	Теплопередача трансмісією (опалення)	393,37	174,35
2	Теплопередача вентиляцією (опалення)	279,79	132,90
3	Сонячні теплонадходження	150,02	101,11
4	Внутрішні теплонадходження	123,91	123,91
5	Енергопотреба для опалення	550,70	196,95
6	Енергоспоживання на опалення	1101,56	290,15
7	Клас енергоефективності	G	B

З метою оцінки економічної доцільності впровадження наведених заходів для зниження використання теплової енергії на потреби опалення визначено економічні показники для кожного заходу окремо та проекту загалом (таблиця 3). Термін окупності був визначений при використанні діючого тарифу на теплопостачання, який становить 3963,52 грн/Гкал.

Таблиця 3 демонструє, що найшвидший термін окупності має теплоізоляція труб системи опалення, які знаходяться в неопалювальних приміщеннях. Таким чином даний захід є недорогим, але доволі ефективним. Натомість утеплення зовнішніх стін та горищного перекриття окупаються найдовше, так як дані заходи є дорогі.

Таблиця 3 – Економічні показники впровадження енергозберігаючих заходів

	Найменування заходу	Економія	Інвестиції	Термін окупності
		тис. кВт·год/рік	тис. грн	років
1	Утеплення зовнішніх стін	230 574,1	12 719 322	16,2
2	Утеплення горищного перекриття	83 501	2 752 200	9,7
3	Заміна віконних блоків та дверей	303 827,8	5 964 112	5,8
4	Модернізація ІТП	39 508,3	860 000	6,4
5	Балансування системи опалення	44 020,7	802 500	5,4
6	Теплоізоляція трубопроводів системи опалення	45 746	322 080	2,1
7	Разом	626 683,6	16 114 530	7,6

Висновки. Запропоновані заходи дозволять суттєво зменшити теплові втрати та забезпечити комфортні умови мікроклімату в класах навчального закладу. Результати моделювання показали, що впровадження даних заходів, призведе до підвищення класу енергоефективності до рівня В, що є дуже хорошим показником.

Перелік посилань:

1. Е-Аудит. URL: <https://e-audit.escoua.com/user/sign-in?next=/home/> (дата звернення: 28.02.2025).
2. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Чинний від 2022-09-01. Вид. офіц. Київ, 2022. 27 с.

¹ Аспірант 1 курсу Гавриш А.В.; ¹ Аспірант 2 курсу Крамаренко С.О.

¹ Доц., к.т.н. Білоус І.Ю.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

БУДІВЛІ З БЛИЗЬКИМ ДО НУЛЬОВОГО СПОЖИВАННЯМ ЕНЕРГІЇ В СУЧАСНИХ ТА ІСТОРИЧНИХ БУДІВЛЯХ: ВИКЛИКИ ТА РІШЕННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. Концепція будівель з близьким до нульового споживанням енергії (Nearly Zero Energy Buildings, NZEB) отримала світове визнання як одна з ключових стратегій по зниженню споживання енергії та досягнення цілей сталого розвитку. Європейський союз впровадив Директиву з енергоефективності будівель (EPBD), відповідно до якої всі новобудови повинні відповідати критеріям NZEB [1]. Тим не менш, застосування цих критеріїв до сучасних та історичних будівель створює різні виклики та можливості. В той час як в сучасні будівлі можливо інтегрувати енергоефективні рішення на етапі проектування, в історичних будівлях доводиться зберігати баланс між покращенням енергетичних показників та збереженням культурної спадщини, що робить перехід таких споруд до NZEB складним та унікальним явищем.

Будівлі з близьким до нульового споживанням енергії відіграють важливу роль у подоланні зміни клімату шляхом зниження енергетичних потреб будівель при експлуатації. Так як будівлі відповідні за суттєву частину загальносвітового споживання енергії, покращення їх рівня енергоефективності є критичним для досягнення нульових викидів вуглецю. Однак, однією з основних задач є забезпечення економічної доцільності та технологічної придатності стандартів NZEB для широкого впровадження, особливо для старого житлового фонду. Так, Європі історичними будівлями в основному вважаються такі, що були споруджені до 1945 року та складають 23,4 % всіх будівель в Європейському Союзі [2].

Аналіз останніх досліджень. Дослідження будівель з близьким до нульового споживанням енергії об'єднують різні підходи до оцінки енергоефективності, економічної доцільності та нормативних вимог. Однією з ключових сфер уваги є оцінка впливу конструктивних рішень і поведінки мешканців на фактичне споживання енергії. Дослідження показують, що в той час як NZEB може зменшити споживання енергії до 50 %, реальна продуктивність часто відрізняється через операційну змінність [3–9]. Технічні аспекти впровадження NZEB у сучасних та історичних будівлях є ще одним важливим напрямком досліджень. Наприклад, було показано, що використання комбінованих систем ізоляції в історичних будівлях зменшують втрати тепла на 40 % без суттєвих змін архітектури. Крім того, впровадження відновлюваних джерел енергії в модернізовані будівлі може покрити до 55% їхніх енергетичних потреб. Економічна доцільність NZEB залишається важливою сферою дослідження. Аналіз витрат і заощаджень показує, що період окупності проектів NZEB коливається від 15 до 20 років, залежно від рівня початкових інвестицій і політики державної підтримки, що підкреслює важливість податкових пільг і фінансових механізмів для прискорення впровадження проектів NZEB.

Формулювання мети. Це дослідження має на меті оцінити доцільність впровадження стандартів NZEB як у сучасних, так і в історичних будівлях. Мета полягає в тому, щоб проаналізувати технологічний прогрес, регуляторні бар'єри та економічні проблеми, пов'язані з дотриманням вимог NZEB, а також визначити найкращі практики та стратегії для сприяння більш широкому застосуванню.

Основна частина. Х. Barrutieta та ін. досліджують ефективність офісної будівлі, спроектованої відповідно до стандартів NZEB. Дослідження представляє реальні дані про

енергоспоживання та підкреслює значні розбіжності в прогнозованому та фактичному споживанні енергії. В роботі продемонстровано, що в офісних будівлях за стандартами NZEB споживання первинної енергії може відрізнятись до 40 разів, що підкреслює важливість моніторингу та оптимізації в реальному часі. Наукова команда звітує, що розглянута будівля покриває до 75 % відсотків власного споживання електроенергії за рахунок фотоелектричних панелей розташованих на даху. В поєднанні з трьома іншими будівлями в межах району з нульовими викидами вуглецю стає можливим 100 % використання ВДЕ. Автори припускають, що розумні системи енергетичного менеджменту в поєднанні з пасивними стратегіями при проектуванні можуть покращити загальну продуктивність будівлі [3].

C. Carpio та ін. в даній роботі зосередилися на розбіжностях між проектною та фактичною енергоефективністю в будівлях NZEB. Дослідження проведене для таких будівель показує, що поведінка мешканців є основним фактором розбіжності між проектним та реальним споживанням енергії, що призводить до відхилень від очікуваного рівня ефективності до 30%. Вчені вказують на необхідність уважного ставлення до моделювання внутрішніх теплонадходжень, адже їх завищені показники призводять до недооцінки споживання теплової енергії [4]. Han, W та ін. в своєму дослідженні розглядають доцільність інтеграції сонячної енергії в історичній будівлі, зберігаючи архітектурну цілісність. Було запропоновано встановлення фотоелектричних панелей (ФЕП) над будівлею з опорою на додаткові конструкції без втручання в структуру даху. Початкове збільшення площі ФЕП призводить до зменшення терміну окупності, але з подальшим зростанням вплив на термін окупності майже не відбувається. В умовах клімату північно-західного Китаю термін окупності може складати від 36 до 54 місяців в залежності від цін на електроенергію [5].

G. Romano та F. Mancini в своїй роботі розглянути модернізацію історичної будівлі Palazzo De Simone в Беневенто, Італія, до рівня NZEB. Важливою складовою проекту було збереження культурної спадщини. До модернізації будівля відносилась до класу D з питомим споживанням енергії на рівні $174,9 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ зі рік. Команді вдалося досягти поставленої мети та довести об'єкт до класу A3 з питомим енергоспоживанням $36,6 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ за рік з 55 % часткою ВДЕ. Подібного результату вдалося досягти за допомогою впровадження комплексу заходів, як от: утеплення горизонтальних конструкцій першого поверху та даху, повна заміна вікон та утеплення вертикальної оболонки будівлі. Крім того на даху було встановлено повітряні теплові насоси та фотоелектричні панелі, під'єднані до загального електромережі [6].

Sodangi M. та Salman A. дослідили основні перепони на шляху до модернізації історичних будівель з метою відповідати критеріям NZEB. Вони виділяють такі проблеми, з якими стикаються найчастіше: висока вартість проектів модернізації, недостатнє залучення зацікавлених сторін та недостатня скоординованість зусиль, невідповідність між рівнями енергоефективності будівель та їх історичною значимістю. В якості рішення вчені пропонують застосовувати стратегічне планування та прийняття рішень [7].

Ramos Ruiz та ін. дослідили як будівлі NZEB сприяють адаптації до зміни клімату в Іспанії. Було виявлено, що будівлі споруджені у відповідності до нового іспанського законодавства, яке орієнтовано на стандарти NZEB, показали середній відсоток енергозбереження на рівні 84,36%. Крім того, такі будівлі показали кращу пристосованість до метеорологічних коливань та суворих умов клімату не тільки в теперішній час, але й в майбутніх сценаріях зміни клімату згідно з IPCC. Також, з точки зору комфорту для мешканців будівлі з близьким до нульового споживанням енергії краще завдяки однорідності та балансуванню розподілу теплових відчуттів у просторі. Вчені наводять список заходів для досягнення критеріїв NZEB, це: зниження теплопередачі оболонки будівлі, підвищення продуктивності систем ОВіК та контроль повітрообміну завдяки зменшенню інфільтраційної складової і використанню механічної вентиляції з рекуперацією тепла [8].

Franco та Mauri в своїй роботі описують історичну будівлю Віллетта Серра, розташовану у Генуї, Італія, яка є пам'яткою архітектури. В їх дослідженні представлено цілісну методологію, що включає глибокі попередні вишукування, архівний пошук та структурну діагностику. Ця детальна оцінка виявила значну теплову неефективність до реконструкції будівлі, включаючи значення теплопередачі 0,78–0,99 Вт/м²К для зовнішніх стін, 1,12 Вт/м²К для даху та 1,26 Вт/м²К для плити першого поверху. Щоб усунути цю неефективність, автори розробили рішення для модернізації, сумісні з консервацією, такі як внутрішня ізоляція з деревного волокна (80 мм) і аерогелевих панелей (30–40 мм). Ці втручання значно зменшили теплопроникність стіни до значень від 0,278 до 0,334 Вт/м²К. Модернізація також включала високоефективні вікна (коефіцієнт теплопередачі від 0,69 до 0,8 Вт/м²К). Крім того, було запропоновано впровадження геотермального теплового насоса та інтегрованих фотоелектричних панелей (площею приблизно 20 м²), для більшої енергетичної стійкості без шкоди для історичної достовірності. Дослідження показало, що будівлі спадщини можуть наблизитися до стандартів NZEB за допомогою ретельно відібраних заходів, наголошуючи на необхідності інтегрованого, міждисциплінарного підходу [9].

Висновки. В роботі підкреслено технологічні, нормативні та економічні фактори, що впливають на впровадження NZEB як у сучасних, так і в історичних будівлях. У той час як сучасні будівлі можуть легко інтегрувати рішення NZEB, історичні будівлі вимагають спеціальних стратегій модернізації, щоб збалансувати енергоефективність зі збереженням культурної спадщини.

Перелік посилань:

1. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), 23. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj/eng> (date of access: 17.03.2025).
2. Cecchini C., Magrini A., Morandotti M. The Energy-Oriented Management of Public Historic Buildings: An Integrated Approach and Methodology Applications. Sustainability. 2020. Vol. 12, no. 11. P. 4576. URL: <https://doi.org/10.3390/su12114576> (date of access: 17.03.2025).
3. The zero building: an exemplary nearly zero energy office building (NZEB) and its potential to become a positive energy building (PEB) / X. Barrutieta et al. Architectural Science Review. 2021. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1080/00038628.2021.1977607> (date of access: 17.03.2025).
4. Energy performance gap of a nearly Zero Energy Building (nZEB) in Denmark: the influence of occupancy modelling / C. Carpino et al. Building Research & Information. 2020. Vol. 48, no. 8. P. 899–921. URL: <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1707639> (date of access: 17.03.2025).
5. Historic Building Renovation with Solar System towards Zero-Energy Consumption: Feasibility Analysis and Case Optimization Practice in China / W. Han et al. Sustainability. 2024. Vol. 16, no. 3. P. 1298. URL: <https://doi.org/10.3390/su16031298> (date of access: 17.03.2025).
6. Romano G., Mancini F. Transformation of a historical building into a Nearly Zero Energy Building (nZEB). Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2385, no. 1. P. 012008. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2385/1/012008> (date of access: 17.03.2025).
7. Sodangi M., Salman A. Analyzing the Critical Impediments to Retrofitting Historic Buildings to Achieve Net Zero Emissions. The Open Construction & Building Technology Journal. 2024. Vol. 18, no. 1. URL: <https://doi.org/10.2174/0118748368357448241118063403> (date of access: 17.03.2025).
8. Ramos Ruiz G., Olloqui del Olmo A. Climate Change Performance of nZEB Buildings. Buildings. 2022. Vol. 12, no. 10. P. 1755. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12101755> (date of access: 17.03.2025).
9. Franco G., Mauri S. Reconciling Heritage Buildings' Preservation with Energy Transition Goals: Insights from an Italian Case Study. Sustainability. 2024. Vol. 16, no. 2. P. 712. URL: <https://doi.org/10.3390/su16020712> (date of access: 17.03.2025)

¹ Мол. вчений Гетманчук Г.О.; ¹ Аспірант 2 курсу Крамаренко С.О.

¹ Доц., к.т.н. Суходуб І.О.

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

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АНАЛІЗ ЗМІН СОНЯЧНИХ ТЕПЛОАДХОДЖЕНЬ І ВІТРОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК В РЕГІОНАХ УКРАЇНИ З ФОКУСОМ НА ЕКСТРЕМАЛЬНІ КЛІМАТИЧНІ УМОВИ

Постановка проблеми та її актуальність. Глобальні зміни клімату впливають на різні аспекти життєдіяльності людства, включаючи енергетичну безпеку та її адаптацію до екстремальних погодних умов. В Україні, де частка відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної та вітрової, зростає, важливо розуміти, як змінюються характеристики сонячної радіації та вітру в різних регіонах країни.

Дослідження змін сонячних теплонадходжень та вітрових характеристик дозволить оцінити можливості подальшого розвитку відновлюваної енергетики в Україні та розробити стратегії адаптації до змін клімату. Адже відновлювана енергетика критично важлива з точки зору декарбонізації електросистеми і пом'якшення наслідків антропогенної зміни клімату. Однак наразі на відновлювані джерела енергії припадає не більше 25 % світових генеруючих потужностей, при цьому 16 % складає гідроенергетика та близько 5 % – сонячні (СЕС) і вітрові (ВЕС) електростанції [1].

Аналіз останніх досліджень. У дослідженнях використовуються різні методи для оцінки кліматичних змін, включаючи метеорологічні спостереження, кліматичне моделювання та статистичний аналіз багаторічних даних [2–4].

Одним з елементів адаптації енергетики до зміни клімату є так званий «зелений перехід», коли основну частину енергії держава починає отримувати з відновлюваних джерел. Однак кліматичні зміни спричиняють коливання сонячної радіації та зміні вітрових умов, що, у свою чергу, впливає на ефективність використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика.

Формулювання мети. Метою дослідження є аналіз змін сонячних теплонадходжень та вітрових характеристик в регіонах України на основі даних ДСТУ 9190:2022 [5] та Meteororm [6], а також оцінка впливу екстремальних кліматичних умов на можливості використання відновлюваних джерел енергії.

Основна частина

Зміни сонячних теплонадходжень. Аналіз даних Meteororm [6] та ДСТУ 9190:2022 [5] свідчить про регіональні відмінності у змінах сонячних теплонадходжень в Україні. На рис. 1 наведено гістограми помісячних змін сонячних теплонадходжень на горизонтальну поверхню за поточний (1996-2015 роки) та історичний періоди отримані з глобальної кліматичної бази даних Meteororm [6] та, відповідно, ДСТУ 9190:2022 [5] для чотирьох міст України, що є представниками північної, південної, західної та східної частин країни.

У Києві середньорічна сонячна активність знизилася на 8 % порівняно з історичними показниками, що може впливати на ефективність пасивного опалення та роботу сонячних електростанцій. Водночас у південних та західних регіонах спостерігається незначне зростання – в Одесі (+4 %) та Ужгороді (+1,4 %). Найбільші відхилення зафіксовано у весняний період, що може позначатися на динаміці виробництва сонячної енергії в міжсезоння.

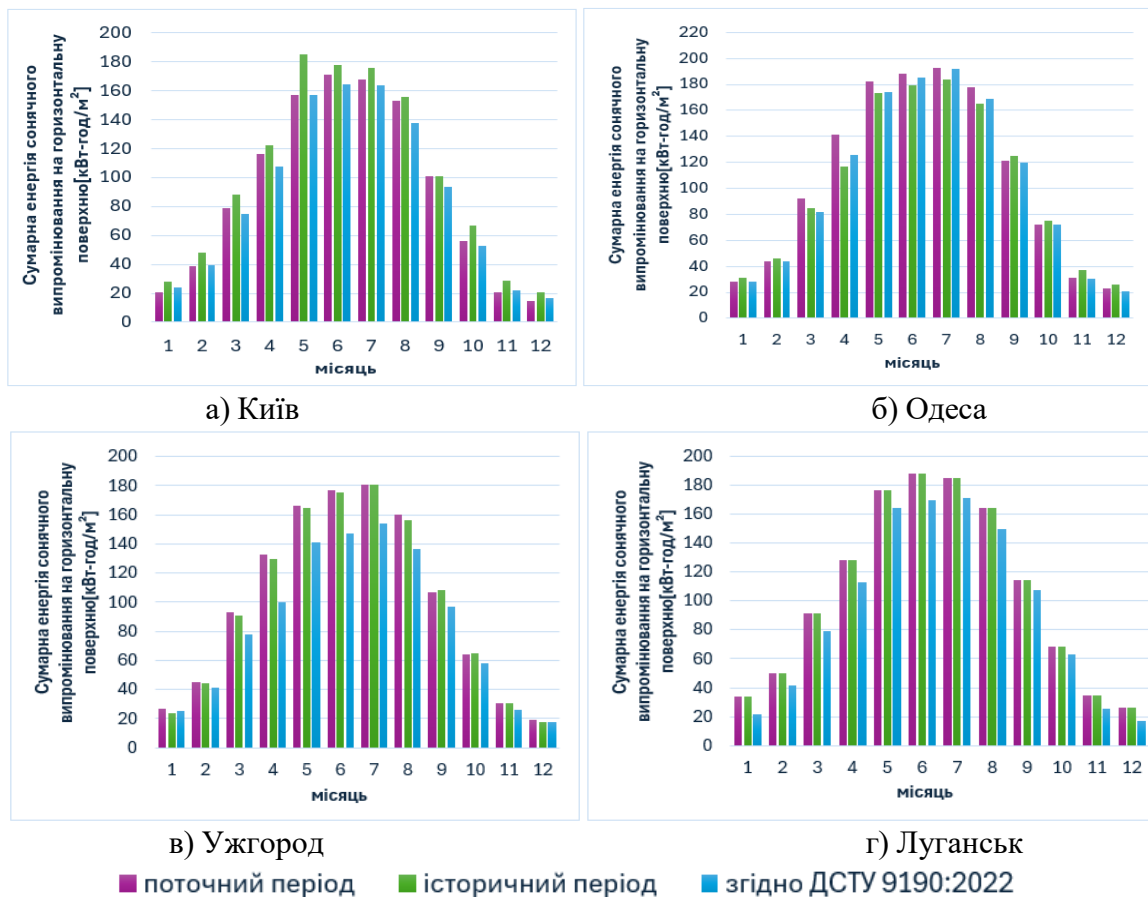


Рисунок 1 – Помісячна зміна сонячних теплонадходжень для різних міст за поточний період, відповідно історичних даних та ДСТУ 9190:2022

При порівнянні поточних даних із нормативними значеннями ДСТУ 9190:2022 [5] спостерігається суттєва різниця, яка залежить від регіону. Наприклад, у Києві помісячні відхилення сягають 0–13 %, в Одесі – 3–19 %, а в Ужгороді – 6–25 %. Максимальні розбіжності виявлено у Луганську, де ця різниця становить 7–37 %. Це свідчить про необхідність оновлення нормативної бази з урахуванням сучасних кліматичних тенденцій та коригування розрахункових параметрів для енергетичних та будівельних проектів.

Динаміка вітрових характеристик. Згідно з базою даних Meteororm [6], напрямки вітру в Україні залишаються стабільними, однак швидкості вітру демонструють регіональні відмінності (рис 2.). У Києві середньомісячна швидкість вітру за поточний період зменшилася на 0,2 м/с порівняно з історичними даними, проте перевищує нормативні значення ДСТУ 9190:2022 [5] на 0,9 м/с. В м.Одеса спостерігається зниження швидкості вітру на 1,1 м/с, що може впливати на ефективність вітроенергетичних установок у регіоні. Водночас у Луганську середньомісячна швидкість вітру залишається стабільною, а у Вінниці, Луцьку та Дніпрі збільшується кількість годин із сильними вітрами, що сприяє розвитку вітроенергетики. Аналіз погодинних даних дозволив виділити чотири регіони України з характерними напрямками вітру. Для більшості областей домінують західні та північно-західні потоки, що важливо для планування вітроенергетичних об'єктів.

Екстремальні кліматичні умови. Зміни кліматичних параметрів супроводжуються зростанням екстремальних погодних явищ, що може впливати на енергетичну інфраструктуру. Останні роки в Україні фіксується збільшення кількості хвиль спеки, зокрема з температурами вище +40 °С, що підвищує навантаження на системи охолодження будівель та кондиціонування. Це особливо актуально для південних регіонів, де спостерігається зростання сонячних теплонадходжень. Аналіз погодинних і помісячних даних вітру показав, що у Вінниці, Луцьку, Дніпрі, Запоріжжі, Івано-Франківську та інших містах зростає кількість годин із сильним вітром, тоді як у Києві, Одесі, Харкові, Полтаві,

Житомирі – зі слабким. Згідно опрацьованих погодинних даних за рік, різниця між поточними значеннями кількості годин з певною швидкістю вітру в діапазоні 0–10 м/с та між прогнозованими значеннями може сягати 10 % (RCP 2.6) – 12 % (RCP 8.5).

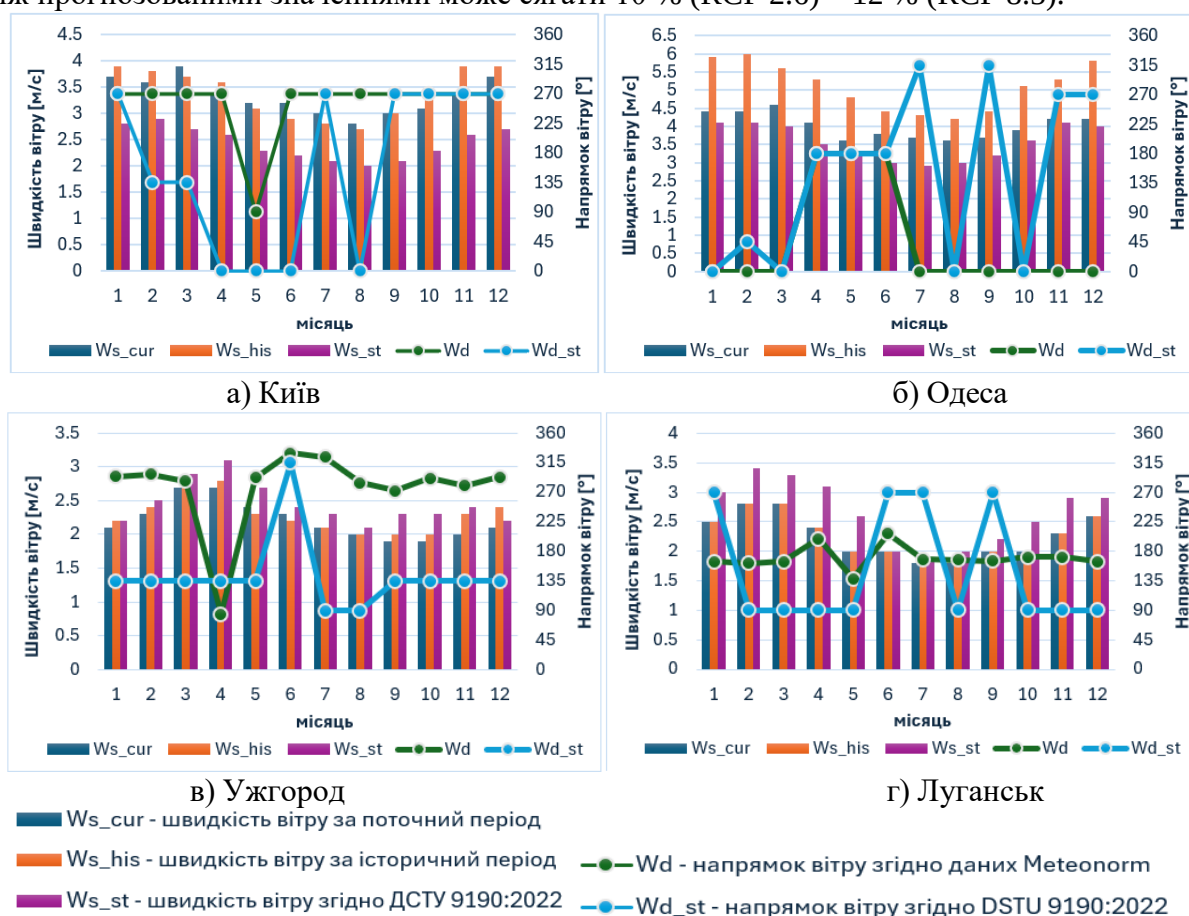


Рисунок 2 – Помісячна зміна швидкості та напрямку вітру для різних міст за поточний період, історичні дані та відповідно до ДСТУ 9190:2022

Висновки. Отже, врахування змін кліматичних умов та частоти екстремальних явищ є ключовим для розробки стратегії адаптації енергетичного сектору України. Використання сучасних кліматичних моделей та оновлення нормативної бази дозволить ефективніше планувати енергетичну інфраструктуру та знизити потенційні ризики.

Перелік посилань:

1. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь / [С.П. Іванюта, О.О. Коломієць, О.А. Малиновська, Л.М. Якушенко]; за ред. С. П. Іванюти. – К. : НІСД, 2020. – 110 с.
2. Хохлов В.М В., Замфірова М. Проекції режиму опадів для території українців найближче тридцятиріччя. Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля. 2022. № 1. С. 54–60. URL: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.5>.
3. Краковська С., Криштоп Л. Узагальнена Оцінка Впливу Зміни Клімату в Україні. С. 4–10. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34337.31840>.
4. Helevera O., Mostipan M., Topolnyi S. Summer and Autumn Long-term Dynamic of Air Temperature in Central Ukraine. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series Geology. Geography. Ecology. 2024. No. 61. P. 144–155. URL: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-12> (date of access: 17.03.2025)
5. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. На заміну ДСТУ Б А.2.2-12:2015 ; чинний від 2023-03-01. Вид. офіц. Київ, 2022. 156 с.
6. Довідник частина І: Програмне забезпечення. Meteonorm 8 Дані про опромінення для кожного місця на Землі. URL: https://meteonorm.com/assets/downloads/mn82_software. (дата звернення: 10.03.2025).

ЗМІСТ

ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ	3
Науково-технічний супровід традиційної та альтернативної теплової енергетики	4
<i>ЧЕРНЯВСЬКИЙ М.В., проф., д.т.н.</i> <i>Інститут теплоенергетичних технологій НАН України</i>	
Підвищення ефективності управління системами теплозабезпечення із застосуванням технології цифрового двійника	9
<i>ВОЛОЩУК В.А. проф., д.т.н.</i> <i>КПІ ім. Ігоря Сікорського</i>	
Освіта для кліматично нейтрального майбутнього: роль Енерго-Інноваційного Хабу КПІ ім. Ігоря Сікорського у підготовці нового покоління фахівців з енергоефективності та декарбонізації	13
<i>ШЕВЧЕНКО О.М., ст.викл., к.т.н.</i> <i>КПІ ім. Ігоря Сікорського</i>	
СЕКЦІЯ № 1 АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА	17
Підходи щодо удосконалення процедури відбору елементів і конструкцій АС для управління старінням.	18
<i>БЕНДЮГ К.С., аспірант</i> <i>Керівник – доц., к.т.н. Клевцов С.В.</i>	
Уніфікація комплексу даних автоматизованого радіаційного моніторингу для задач прогнозування радіаційних наслідків.	20
<i>ЛЯХОР Д.О., магістрант</i> <i>Керівник – доц., к.т.н. Коньшин В.І.</i>	
Методи кваліфікації модернізацій нейтронно-фізичних характеристик ядерного палива.	22
<i>ОСТАПОВЕЦЬ М.О., магістрант</i> <i>Керівник – доц., д.т.н. Кондратюк В.А.</i>	
Підвищення стійкості зовнішніх аварійних систем підживлення водою ЯЕУ з реакторами ВВЕР-1000(В320) шляхом оптимізації стратегій їх застосування.	24
<i>СПІРІДОНОВ О.О., аспірант</i> <i>Керівник – доц., д.т.н. Кондратюк В.А.</i>	
Обґрунтування безпеки впровадження палива ТВЗ Westinghouse з частковою RWFA/TB3A першою перевантажувальною партією.	27
<i>БОНДАРУК М.О., магістрант</i> <i>Керівник – ст.викл., к.т.н. Овдієнко Ю.М.</i>	
Моделювання аварії на 1 блоці Мецаморської АЕС.	29
<i>БУТЕЛЬКО В.С., магістрант</i> <i>Керівник – доц., к.т.н. Коньшин В.І.</i>	
Аналіз впливу різних компоновок паливних завантажень на радіаційне навантаження ВКП та КР ВВЕР-1000.	31
<i>ГОДУНОК Б.В., магістрант</i> <i>Керівник – доц., к.т.н. Коньшин В.І.</i>	
Вплив геометричних факторів двофазних термосифонів на їхні теплопередавальні характеристики.	34
<i>ГУПАЛО М.Б., магістрант</i> <i>Керівник – проф., д.т.н. Кравець В.Ю.</i>	

Надзвуковий ежектор із тангенціальним надзвуковим соплом.	37
<i>КОЛОДІЙ Н.О., аспірант</i>	
<i>Керівник – проф., к.т.н. Воропаєв Г.О.</i>	
Оптимізація процесу розрахунку пасивних систем за допомогою комп'ютерного теплогідрравлічного коду TRACE.	40
<i>КОРНІЛОВ О.М., магістрант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Бібік Т.В.</i>	
Розробка плану інтеграції водневої станції у проєкт АЕС.	43
<i>КОРОЛЬЧУК В.Ю., магістрант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Бібік Т.В.</i>	
Підходи для застосування мультифункціонального тренажеру ВВЕР-1000 для обґрунтування модернізації захистів атомної станції.	46
<i>ПЕЧЕРИЦЯ І.О., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Клевцов С.В.</i>	
Обґрунтування зняття з експлуатації АЕС з ВВЕР.	49
<i>САМЧУК М.Б., магістрант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Філатов В.І.</i>	
 СЕКЦІЯ № 2 ЯДЕРНА ЗАХИЩЕНІСТЬ ТА НЕРОЗПОВСЮДЖЕННЯ	52
 Вплив людського фактора на фізичний захист об'єктів з високим рівнем ризику: аналіз міжнародного досвіду та рекомендації для України.	53
<i>УШАЧ С.М., магістрант</i>	
<i>Керівник – асист. Остапенко І.А.</i>	
Захист ядерних установок в умовах війни.	55
<i>БОРЗЕНКОВ В.В., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Бібік Т.В.</i>	
Оптимізація впливу системи радіоелектронної боротьби на елементи фізичного захисту ядерної установки.	57
<i>ГОНЧАРУК В.Г., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Бібік Т.В.</i>	
 СЕКЦІЯ № 3 ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНІ ПРОЦЕСИ В ТЕПЛО-І ПАРОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВКАХ	59
 Аналіз розподілу теплового навантаження і температури по перерізу топкової камери при позонному розрахунку.	60
<i>ВОЛОШИН В.С., бакалаврант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Новаківський Є.В.</i>	
Використання аміачної води в трубі Вентурі.	63
<i>ГОРЯНОЙ С.В., аспірант</i>	
<i>Керівник – проф., д.т.н. Вольчин І.А., проф., д.т.н. Туз В.О.</i>	
CFD-моделювання процесів у економайзері котла ТП-35У.	66
<i>ЄВТУШОК В.А., магістрант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Новаківський Є.В.</i>	
Підвищення ефективності енергетичного обладнання шляхом оптимізації течії багатофазного середовища з урахуванням термодинамічної взаємодії фаз і фазов.	69
<i>КОВАЛЬ С.О., аспірант</i>	
<i>Керівник – проф., д.ф.-м.н. Воропаєв Г.О.</i>	
Теплові характеристики гравітаційної теплової труби з метилацетатом.	72
<i>МЕЛЬНИК Р.С., мол. вчений</i>	

<i>Керівник – пр.н.спів., д.т.н. Ніколаєнко Ю.Є.</i>	
Прогнозування складу і властивостей генераторного газу.	74
<i>НОВОСАД Ю.І., аспірант;</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Воробйов М.В., асист. Піцина І.Г.</i>	
Напружено-деформований стан оребрених труб плоского профілю під дією внутрішніх тисків.	77
<i>ОНИЩЕНКО В.М., мол. вчений</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Рогачов В.А.</i>	
Оптимізація теплового регулювання енергетичних систем наносупутників PolyTAN для наукових експериментів у космосі.	79
<i>ПОЛОВИНКІН К.О., аспірант</i>	
<i>Керівник – проф., д.т.н. Сорокова Н.М.</i>	
Розробка технології утилізації старої грошової маси для опалення та теплопостачання промислових об'єктів.	82
<i>СУРДУ М.В., магістрант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Воробйов М.В., асист. Піцина І.Г.</i>	
Інтенсифікація теплообміну при кипінні рідин на поверхнях малого розміру.	85
<i>ЧИКАЛО В.Б., аспірант</i>	
<i>Керівник – проф., д.т.н. Кравець В.Ю.</i>	
 СЕКЦІЯ № 4 СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ТЕПЛОВІЙ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ	87
 Напружено-деформований стан регулювального клапана турбіни К-1000-60/3000 з врахуванням впливу сита.	88
<i>БЕДНАРСЬКА І.С., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Риндюк Д.В.</i>	
Підвищення ефективності топкових процесів пилувугільного котла за рахунок використання синергетичних властивостей спалювання паливної суміші.	91
<i>ДЖЕЖУЛЕЙ В.О., аспірант</i>	
<i>Керівник – проф., д.т.н. Абдулін М.З.</i>	
Термонапружений стан ротора турбіни К-200-130 за різних технологій пуску.	94
<i>КОНОВАЛЮК О.Л., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Пешко В.А.</i>	
Аналіз технологічних особливостей переобладнання котла КВГ-7,56 для спалювання біомаси.	96
<i>МЕЛЬНИЧЕНКО І.О., магістрант; МОШКОВ О.С., магістрант</i>	
<i>Керівник – асист., к.т.н. Власенко О.В.</i>	
Підвищення ефективності ТЕЦ-6 шляхом модернізації системи технічного водопостачання.	99
<i>МОШКОВ О.С., магістрант; МЕЛЬНИЧЕНКО І.О., магістрант</i>	
<i>Керівник – проф., д.т.н. Недбайло О.М.</i>	
Синтез проточної частини циліндра середнього тиску турбіни К-200-130.	102
<i>СЕПІК А.В., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Пешко В.А.</i>	
Проектування фільтра тонкої очистки для газогенератора малої потужності.	105
<i>СТЕПАНЧЕНКО А.А., магістрант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Риндюк Д.В.</i>	

Особливості систем опалення та кондиціонування на основі теплових насосів.	107
<i>ТКАЧЕНКО М.В., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Риндюк Д.В.</i>	
Утилізація теплового потенціалу вентиляційного повітря та стічних вод підземних споруд метрополітенів.	110
<i>ТИХОНЮК С.Л., магістрант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Баранюк О.В.</i>	
Моделювання мікрофакельного спалювання водневмісних газів.	113
<i>ШАХБАЗОВ І.О., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Сірий О.А.</i>	
Математичне моделювання процесу мікродифузійного горіння газоподібних палив у струменево-нішевому стабілізаторі полум'я.	117
<i>ДУЛЬСЬКИЙ А.І., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Сірий О.А.</i>	
Геометричне моделювання вала ротора циліндра низького тиску турбіни К-800-240.	120
<i>МЕНТІЙ М.О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник – проф., д.т.н. Черноусенко О.Ю.</i>	
Побудова числової моделі ротора середнього тиску турбіни К-800-240.	122
<i>МЯГКИЙ Р.А., бакалаврант</i>	
<i>Керівник – проф., д.т.н. Черноусенко О.Ю.</i>	
Аналіз валових викидів в атмосферу при роботі парового котла на біогазі.	124
<i>РАКУТА І.О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник – асист., к.т.н. Власенко О.В.</i>	
Оцінка теплового балансу парового котла Invest на біогазі.	127
<i>РАКУТА І.О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник – асист., к.т.н. Власенко О.В.</i>	
Дослідження впливу баластування окислювача продуктами згоряння при спалюванні пропан бутанової суміші.	130
<i>СТОРОЖУК М.С., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Сірий О.А.</i>	
Моделювання теплообмінної секції апарату повітряного охолодження на основі шахових пакетів труб різного профілю.	134
<i>ФЕДОРЕНКО Р.О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Баранюк О.В.</i>	
Індивідуальна система тепlopостачання для житлових будинків міста Полтави.	137
<i>ЧЕРНІК Д.В., бакалаврант</i>	
<i>Керівник – асист., к.т.н. Власенко О.В.</i>	
СЕКЦІЯ № 5 ПРОБЛЕМИ ТЕОРЕТИЧНОЇ І ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛОТЕХНІКИ	139
Підвищення енергетичної ефективності вентиляційних систем за рахунок утилізації теплоти технологічного обладнання.	140
<i>БЕЖИК О.М., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Притула Н.О.</i>	
Підвищення ефективності сушарок зерна за рахунок встановлення теплового насосу в лінії рециркуляції сушильного агенту.	143
<i>ВОВК В.В., аспірант</i>	
<i>Керівник – проф., д.т.н. Безродний М.К.</i>	

Конденсаційне осушення повітря для промислових підприємств.	146
<i>ЛЯШЕНКО А.М., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Притула Н.О.</i>	
Оцінка ефективності осушувачів для термічних опріснювальних систем.	149
<i>ТЕЛИЧКО І.В., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Середа В.В.</i>	
Порівняльна характеристика рідких абсорбентів для уловлення діоксиду вуглецю у відцентровому апараті.	152
<i>ЗАБОЛОТНИЙ О.А., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Соломаха А.С.</i>	
Розробка стенду на основі гідродинамічної кавітації для отримання паливної емульсії .	155
<i>МЕЛЬНИК В.О., магістрант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Соломаха А.С.</i>	
Системи вентиляції житлових будівель.	158
<i>РУДЕНКО А.О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Боженко М.Ф.</i>	
Використання теплоти відхідних димових газів котлів для нагрівання води власних потреб котельні.	161
<i>СИДОРЕНКО М.С., бакалаврант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Боженко М.Ф.</i>	
Експериментальне дослідження оптимальної продуктивності плівкового зволожувача для термічної системи опріснення.	164
<i>ЛЮ Я., аспірант; ПОДСТЄВАЯ Т.Л., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Середа В.В.</i>	
 СЕКЦІЯ № 6 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ ТА ІНЖИНІРІНГ	167
 Аналіз життєвого циклу при відновленні історичних будівель.	168
<i>БІРЮКОВ Д.В., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Буяк Н.А.</i>	
Підвищення рівня енергетичної ефективності навчального корпусу № 8 КПІ ім. Ігоря Сікорського за рахунок використання відновлювальних джерел.	171
<i>БОРОЗДІН Д.С., магістрант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Білоус І.Ю.</i>	
Підвищення рівня енергоощадності інженерних систем овочесховищ за рахунок оптимізації показників мікроклімату та інтеграції ВДЕ.	174
<i>ІЛЬЧЕНКО Д.С., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Суходуб І.О.</i>	
Оцінка потенціалу енергозбереження житлового будинку у місті Славутіч за допомогою моделювання в програмі DesignBuilder.	177
<i>КИСЕЛЬОВ В.О., магістрант</i>	
<i>Керівник – асист., к.т.н. Яценко О.І.</i>	
Використання фазоперехідних матеріалів для акумуляторів теплової енергії та оболонки будівлі.	180
<i>ЛАЗАРЄВ Є.С., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Суходуб І.О.</i>	
Сучасні методи прогнозування енергоспоживання будівель після термомодернізації: регресійні, нейронні та гібридні підходи.	183
<i>ЛЕВИЦЬКИЙ О.О., аспірант</i>	
<i>Керівник – проф., д.т.н. Дешко В.І.</i>	

Моделювання та аналіз роботи сонячної електростанції для забезпечення інфраструктури житлового багатоквартирного будинку.	186
<i>ПОЛІТИКІН М.В., аспірант</i>	
<i>Керівник – асист., к.т.н. Яценко О.І.</i>	
Моделювання енергетичних процесів у житлових будівлях засобами DesignBuilder.	189
<i>ТУРКО Р.В., магістрант</i>	
<i>Керівник – асист., к.т.н. Яценко О.І.</i>	
Аналіз методів підвищення надійності централізованого теплопостачання України.	192
<i>ХОДАКІВСЬКИЙ В.О., аспірант</i>	
<i>Керівник – ст.н.спів., к.т.н. Карпенко Д.С.</i>	
Діагностика стану інженерних систем будівлі закладу освіти та виявлення можливостей енергоефективної модернізації.	195
<i>КОРЧМА В.О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник – ст.викл., к.т.н. Шевченко О.М.</i>	
Зниження використання теплової енергії на потреби опалення Нововолинського ліцею № 1.	198
<i>ЛЄНКОВ Д.Є., бакалаврант</i>	
<i>Керівник – асист., к.т.н. Яценко О.І.</i>	
Будівлі з близьким до нульового споживанням енергії в сучасних та історичних будівлях: виклики та рішення.	201
<i>ГАВРИШ А.В., аспірант; КРАМАРЕНКО С.О., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Білоус І.Ю.</i>	
Аналіз змін сонячних теплонадходжень і вітрових характеристик в регіонах України з фокусом на екстремальні кліматичні умови.	204
<i>ГЕТМАНЧУК Г.О., мол. вчений; КРАМАРЕНКО С.О., аспірант</i>	
<i>Керівник – доц., к.т.н. Суходуб І.О.</i>	

ПОКАЖЧИК АВТОРІВ ДОПОВІДЕЙ

- Абдулін М.З. 91
Баранюк О.В. 110, 134
Беднарська І.С. 88
Бежик О.М. 140
Безродний М.К. 143
Бендюг К.С. 18
Бібік Т.В. 40, 43, 55, 57
Білоус І.Ю. 171, 201
Бірюков Д.В. 168
Боженко М.Ф. 158, 161
Бондарук М.О. 27
Борзенков В.В. 55
Бороздін Д.С. 171
Бутелько В.С. 29
Буяк Н.А. 168
Власенко О.В. 96, 124, 127, 137
Вовк В.В. 143
Волошин В.С. 60
Волощук В.А. 9
Вольчин І.А. 63
Воробйов М.В. 74, 82
Воропаєв Г.О. 37, 69
Гавриш А.В. 201
Гетманчук Г.О. 204
Годунок Б.В. 31
Гончарук В.Г. 57
Горяной С.В. 63
Гупало М.Б. 34
Дешко В.І. 183
Джежулей В.О. 91
Дульський А.І. 117
Євтушок В.А. 66
Заболотний О.А. 152
Ільченко Д.С. 174
Карпенко Д.С. 192
Кисельов В.О. 177
Клевцов С.В. 18, 46
Коваль С.О. 69
Колодій Н.О. 37
Кондратюк В.А. 22, 24
Коновалюк О.Л. 94
Коньшин В.І. 20, 29, 31
Корнілов О.М. 40
Корольчук В.Ю. 43
Корчма В.О. 195
Кравець В.Ю. 34, 85
Крамаренко С.О. 201, 204
Лазарєв Є.С. 180
Левицький О.О. 183
Ленков Д.Є. 198
Лю Я. 164
Ляхор Д.О. 20
Ляшенко А.М. 146
Мельник В.О. 155
Мельник Р.С. 72
Мельниченко І.О. 96, 99
Ментій М.О. 120
Мошков О.С. 96, 99
Мягкий Р.А. 122
Недбайло О.М. 99
Ніколаєнко Ю.Є. 72
Новаківський Є.В. 60, 66
Новосад Ю.І. 74
Овдієнко Ю.М. 27
Оніщенко В.М. 77
Остапенко І.А. 53
Остаповець М.О. 22
Печериця І.О. 46
Пешко В.А. 94, 102
Піщина І.Г. 74, 82
Подстєвая Т.Л. 164
Політикін М.В. 186
Половинкін К.О. 79
Притула Н.О. 140, 146
Ракута І.О. 124, 127
Риндюк Д.В. 88, 105, 107
Рогачов В.А. 77
Руденко А.О. 158
Самчук М.Б. 49
Сепік А.В. 102
Середа В.В. 149, 164
Сидоренко М.С. 161
Сірий О.А. 113, 117, 130
Соломаха А.С. 152, 155
Сорокова Н.М. 79
Спірідонов О.О. 24
Степанченко А.А. 105
Сторожук М.С. 130
Сурду М.В. 82
Суходуб І.О. 174, 180, 204
Теличко І.В. 149
Тихонюк С.Л. 110
Ткаченко М.В. 107
Туз В.О. 63
Турко Р.В. 189
Ушач С.М. 53
Федоренко Р.О. 134
Філатов В.І. 49
Ходаківський В.О. 192
Чернік Д.В. 137

Черноусенко О.Ю. 120, 122
Чернявський М.В. 4
Чикало В.Б. 85
Шахбазов І.О. 113

Шевченко О.М. 13, 195
Яценко О.І. 177, 186, 189, 198

Наукове видання

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ НАУКОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ

У 2-х томах

Том 1

Матеріали XXII Міжнародної
науково-практичної конференції
молодих вчених і студентів

м. Київ, 22–25 квітня 2025 року

*В авторській редакції
Надруковано з оригінал-макета замовника*

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р.
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056

Підп. до друку 01.06.2025. Формат 60×84¹/₁₆. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – електрографічний. Ум. друк. арк. 12,6. Обл.-вид. арк. 14,85.
Наклад 9 пр. Зам. № 25-042.

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