НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГАЗУ

ДУТКА ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.31

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ПРИРОДНОМУ ГАЗІ У СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

05.14.06 - технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ-2026

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі технологій альтернативних палив Інституту газу НАН України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Нікітін Євгеній Євгенович,

Інститут газу НАН України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,

Туз Валерій Омелянович,

професор кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики,

НТУУ «КПІ»;

кандидат технічних наук,

Тесленко Олександр Іванович,

провідний науковий співробітник,

Інститут загальної енергетики НАН України.

Захист відбудеться 10 грудня 2026 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.225.01 Інституту газу НАН України за адресою: 03113, м. Київ, вул. Дегтярівська, 39.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту газу НАН України за адресою: 03113, м. Київ, вул. Дегтярівська, 39.

Автореферат розісланий «___» листопада 2026 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради, к.т.н. _____ **Ховавко Олександр Ігорович**

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Декарбонізація енергетичного сектору та підвищення енергетичної ефективності є стратегічними пріоритетами сталого розвитку, що визначаються міжнародними кліматичними зобов'язаннями та європейським курсом України. У структурі кінцевого енергоспоживання значну частку займає теплова енергія (ТЕ), тому саме процеси отримання, перетворення, передачі, використання ТЕ з природного газу спільно з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) та скидними джерелами енергії (СДЕ) в системах централізованого теплопостачання (СЦТ), є одним із ключових напрямків скорочення споживання викопних палив і зменшення викидів парникових газів.

Переважна частина СЦТ України сформована у другій половині XX століття та технологічно орієнтована на використання викопних енергоносіїв, насамперед природного газу. Для цих систем характерні висока зношеність теплогенеруючого обладнання і теплових мереж (ТМ), підвищені втрати теплоти під час транспортування, недостатній рівень автоматизації та регулювання теплоспоживання, а також обмежені обсяги інтеграції ВДЕ і скидної теплової енергії (СТЕ). За цих умов впровадження нових джерел енергії потребує комплексного системного методу, що поєднує скорочення попиту на ТЕ, зниження втрат у мережах, інтеграцію ТМ і поетапне заміщення викопного палива екологічно чистими ВДЕ. Це можливо за умови удосконалення наявних джерел енергії на природному газі та створення нових ефективних гібридних джерел енергії (ГДЕ) з використанням ВДЕ.

Україна обрала вектор євроінтеграції, а це означає, що вимоги до декарбонізації повинні бути найближчим часом імплементовані. Однак частка ВДЕ у СЦТ України на 2023 р. складала близько 1 %, переважно це було біопаливо.

Спостерігається перманентна тенденція зростання цін на природний газ та електроенергію (ЕЕ). Військова агресія росії проти України диктує додаткові вимоги до стійкості СЦТ, що може бути забезпечено за рахунок диверсифікації джерел енергії з використанням ВДЕ.

В цих умовах важливою науково-прикладною проблемою є обґрунтування технічних рішень комплексного використання природного газу та ВДЕ у процесі декарбонізації наявних джерел енергії на природному газі в СЦТ із забезпеченням надійності теплопостачання споживачів. Зазначена проблема має міждисциплінарний характер і потребує поєднання методів технічної теплофізики, теплотехніки та теплоенергетики з методами системного аналізу і техніко-економічного оцінювання.

В більшості розвинених країн світу виконувалися дослідження щодо вирішення даної проблеми, зокрема, відомими вченими в цій галузі є Lund H., Revesz A., Werner S., Wiltshire R., Østergaard P.A., Connolly D., Mathiesen B.V., Malcher X та інші. Також значний внесок у дослідження проблематики зробили і українські вчені: Карп В.М., Фіалко Н.М., Сігал І.Я., Нікітін Є.Є., П'яних К.Є., Кулик М.М., Сігал О.І., Тесленко О.І., Туз В.О., Сорока Б.С., Дубовський С.В., Сміхула А.В. та інші.

В умовах обмеженості фінансових ресурсів, необхідності забезпечення соціально доступних тарифів та підвищених вимог щодо енергетичної стійкості населених пунктів, особливої актуальності набуває розроблення науково обґрунтованих критеріїв вибору оптимальних сценаріїв модернізації та декарбонізації наявних джерел енергії на природному газі в СЦТ з врахуванням технічних, економічних та екологічних факторів.

У роботі представлено результати розроблення науково обґрунтованих рекомендацій до поступової трансформації газових котелень СЦТ, спрямованого на їх декарбонізацію, підвищення енергетичної ефективності та надійності шляхом застосування ГДЕ в перехідний період з урахуванням поточного стану систем і цільових показників трансформації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами та роботами. Дисертаційна робота містить результати, отримані в Інституті газу Національної академії наук України (НАН України). Проведені дослідження є складовими частинами виконаних науково-дослідних тем: «Науково-технічні основи технологій виробництва та використання альтернативних палив з біологічної сировини» (шифр ІІІ-8-13); Постанова Бюро Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України від 27.11.2012 № 18; Рішення Експертної ради з питань оцінювання тем фундаментальних науково-дослідних робіт при НАН України від 07.11.2012 № 8; «Наукові засади використання відновлюваних джерел енергії та відходів у системах енергетичного забезпечення міст та поселень України» (шифр: ІІІ-7-23); Постанова Бюро Відділення енергетики та енергетичних технологій НАН України від 03.08.2022 № 8, № держ. реєстрації 0123U100595, Рішення Експертної ради з питань оцінювання тем фундаментальних науково-дослідних робіт при НАН України від 10.08.2022 № 3.

Тематика, методи та результати дисертаційної роботи гармонійно інтегруються у сукупність наукових досліджень Інституту газу НАН України, спрямованих на підвищення енергетичної ефективності, зниження споживання викопних енергоносіїв та розвиток низьковуглецевих технологій у теплоенергетиці.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження процесів отримання, перетворення, передачі, використання ТЕ з природного газу спільно з ВДЕ, СДЕ та розробка науково-практичних рекомендацій щодо створення сучасних ГДЕ в СЦТ.

Для досягнення визначеної мети **підлягають вирішенню такі завдання**:

- аналіз поточного стану джерел енергії існуючих СЦТ України;
- аналіз європейського досвіду декарбонізації джерел енергії для теплозабезпечення населених пунктів;
- порівняння енергетичних, експлуатаційних характеристик ТДЕ та ВДЕ / СДЕ, а також врахування просторово-часових закономірностей для ефективного заміщення ТДЕ на ГДЕ у СЦТ;
- розробка науково обґрунтованої науково-обґрунтованої методології поетапної еколого-енергетичної трансформації джерел енергії на

природному газі, рекомендацій щодо структури, функціонування, енергетичної ефективності та автоматизації теплотехнічних процесів ГДЕ у складі тепло-гідравлічних кластерів;
- розробка практичних рекомендацій та прикладів імплементації ГДЕ в СЦТ.

Об'єктом дослідження є тепло-гідравлічні кластери СЦТ населених пунктів, включно з джерелами енергії на природному газі в комплексі з ВДЕ та СТЕ, мережами та споживачами ТЕ.

Предметом дослідження є закономірності та шляхи підвищення енергетичної ефективності процесів отримання, перетворення, передачі, використання ТЕ для джерел енергії на природному газі та їх комплексного використання з ВДЕ в процесі оновлення та декарбонізації СЦТ.

Методи дослідження базуються на застосуванні системного аналізу теплових джерел енергії на природному газі, ТМ і споживачів ТЕ в СЦТ, які розглядаються у рамках тепло-гідравлічних кластерів.

У роботі використано загальновідомі методи досліджень, зокрема методи аналізу термодинамічних і тепло-гідравлічних процесів перетворення первинної енергії в ТЕ та ЕЕ, МВВ, методи математичного моделювання та порівняльного техніко-економічного аналізу.

Крім того в дослідженні розроблено та використано авторські методичні напрацювання, а саме:
- декарбонізація газових котелень у масштабах тепло-гідравлічних кластерів;
- обґрунтування плану перехідного періоду та критеріїв пріоритетності трансформації застарілих джерел енергії на природному газі;
- аналізу часових витрат в процесі експлуатації та визначення моменту початку процесу трансформації джерел енергії на природному газі;
- обґрунтування ефективності створення нових ефективних та удосконалення наявних джерел енергії на природному газі в комплексі з ВДЕ та СДЕ;
- обґрунтування методу комбінованого виробництва ТЕ та ЕЕ із застосуванням когенераційних установок (КГУ) та теплових насосів (ТН);
- узагальнена структурна схема ГДЕ як методичне підґрунтя вибору рекомендованого варіанту при інтеграції в СЦТ;
- запропоновано технологічні основи та алгоритм автоматизації регулювання теплотехнічних процесів гібридних джерел ТЕ та ЕЕ за критеріями мінімізації вартості життєвого циклу та терміну окупності капітальних витрат по критерію показника нормованої вартості енергії (LCOE – levelized cost of energy) і МВВ – метод витрат та вигід;

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі отримано такі результати:

1. Вперше запропоновано доцільність та зміст процесу поступового перетворення існуючих газових котелень в гібридні джерела енергії в

рамках тепло-гідравлічних кластерів з визначенням потенціалу ВДЕ, скидного тепла для спільного виробництва теплової та електричної енергії з врахуванням показників лінійної щільності теплового навантаження та щільності теплової енергії.

2. Обґрунтовано необхідність врахування просторово-часових закономірностей тепло-гідравлічних кластерів СЦТ для забезпечення ефективного застосування ГДЕ, а саме:

– вдосконалено принцип доцільності застосування сучасних енерго-еколого-ефективних ГДЕ з врахуванням суттєвого зростання експлуатаційних витрат на існуючих джерел енергії на природному газі СЦТ після певного періоду експлуатації;
– отримало подальший розвиток науково обґрунтований метод щодо визначення зон централізованого теплопостачання для ефективного застосування нових ГДЕ з врахуванням витрат та втрат енергії при виробництві та транспортуванні теплоносія.

3. На основі аналізу енергетичних, просторових та експлуатаційних характеристик обґрунтовано умови ефективного застосування ГДЕ у складі газових КГУ, ТН та резервних газових котлів (ГК). За досліджених температурних режимів і навантажень така структура забезпечує збільшення генерації ТЕ на одиницю енергії природного газу в 1,5–2 рази та частку ТЕ з ВДЕ 18–46 % і зниження викидів CO_2.

Практичне значення одержаних результатів підтверджується їх використанням при виконанні прикладних робіт по підвищенню енергетичної ефективності процесів отримання, перетворення, передачі, використання ТЕ для джерел енергії на природному газі та їх комплексного використання з ВДЕ у сфері планування та розвитку СЦТ і муніципального енергетичного менеджменту.

Результати дисертаційного дослідження використано при розробленні схем теплопостачання населених пунктів України, зокрема для міст Кривий Ріг, Луганськ, Алчевськ, Кіровоград, Старокостянтинів, Кременчук, Сміла, Хмельницький, Вінниця, Чернігів, Івано-Франківськ, Коростень, Добротвір, Ладижин, Жовква, Ровеньки, Кіровське, Знам’янка, Луцьк, Рівне, Львів, Полтава, Кропивницький, у частині обґрунтування напрямів модернізації джерел теплопостачання, оцінювання доцільності інтеграції ВДЕ і балансуючих джерел енергії, а також формування сценаріїв декарбонізації систем теплопостачання.

Окремі положення роботи застосовано при розробленні муніципальних енергетичних планів (МЕП) міст Чернівці, Івано-Франківськ, Хотин, Конотоп, Миргород, зокрема при аналізі структури енергоспоживання, оцінюванні потенціалу підвищення енергоефективності та виборі пріоритетних заходів з розвитку систем теплопостачання.

Результати дослідження використано при підготовці рекомендацій щодо вдосконалення систем муніципального енергетичного менеджменту та навчанні персоналу органів місцевого самоврядування і підприємств теплопостачання у містах Коростень, Івано-Франківськ, Чернігів, Вінниця, Рівне, Хмельницький, а також при підготовці посібника з муніципального енергетичного менеджменту,

розробленого в межах проєкту Агентства США з міжнародного розвитку (USAID – United States Agency for International Development) «Муніципальна енергетична реформа в Україні».

Положення та результати дисертаційної роботи використано також при підготовці колективної наукової монографії «Стан та шляхи розвитку систем централізованого теплопостачання в Україні» (Київ : Наукова думка, 2021), у якій узагальнено принципи аналізу стану та напрямів трансформації систем централізованого теплопостачання, зокрема в частині підвищення енергоефективності та декарбонізації.

Загальна кількість публікацій за темою дисертації – 17, з яких 10 – у фахових виданнях, з них 6 проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, 2 – в інших зарубіжних періодичних наукових виданнях; 2 – колективні монографії, 1 колективний посібник, 4 – у збірниках матеріалів міжнародних конференцій та семінарів.

Особистий внесок здобувача. В роботах, які виконано у співавторстві, автор брав активну участь у формуванні наукового напрямку досліджень, постановці задач, проведенні аналітичних, чисельних та експериментальних досліджень, в обробці одержаних результатів математичних моделювань. Здобувач брав участь у формулюванні висновків і підготовці до публікації результатів дослідження.

Апробація результатів дисертації. Результати дослідження доповідалися та обговорювалися на понад 50 науково-практичних конференціях, семінарах і робочих нарадах з питань розвитку СЦТ, підвищення енергоефективності та декарбонізації теплопостачання, які проводились в рамках міжнародних проєктів (USAID, Німецького товариства міжнародного співробітництва GIZ, Європейського інвестиційного банку (EIB), а також використовувалися при розробленні схем теплопостачання та МЕПів населених пунктів України, основні з яких: XXXV міжнародна конференція «Проблеми екології і експлуатації об’єктів енергетики» (Київ, 2025); Трансформація застарілих газових котелень зі застосуванням теплових насосів, когенераційних установок та акумуляторів енергії, XXXV міжнародна конференція «Проблеми екології і експлуатації об’єктів енергетики», Київ: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2025; 19-а міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у 21-му столітті» (Київ, 2018); Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність-2013» (Київ, 2013).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 187 сторінок, з них основний текст – 141 сторінка. Дисертація містить 41 рисунків і 36 таблиць. Перелік використаних джерел налічує 118 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета і задачі дослідження, визначена наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, наведено особистий внесок автора, а також рівень апробації результатів дисертації та кількість публікацій.

У **першому розділі «Аналіз стану та проблем функціонування джерел енергії на природному газі»** наведено оцінку поточного стану цих джерел у складі СЦТ в Україні та проаналізовано їх роль у теплозабезпеченні населених пунктів. Показано, що існуючі СЦТ характеризуються значною зношеністю теплогенеруючого обладнання та ТМ, високими питомими втратами ТЕ під час транспортування, обмеженими можливостями регулювання режимів теплоспоживання, домінуванням природного газу в паливно-енергетичному балансі теплопостачання (таблиця 1), річною нерівномірністю теплових навантажень, понаднормових втрат ТЕ та недостатнім рівнем інтеграції ТМ.

Таблиця 1 – Домінуюча роль джерел енергії на природному газі в СЦТ України

№	Назва показника	Величина
1	Загальна встановлена теплова потужність ЦТ, ГВт	70,7
2	Загальна встановлена теплова потужність котелень ЦТ, ГВт	52,6
3	Кількість котелень, од.	4 082
4	Кількість котлів, од.	12 225
5	Кількість котлів на природному газі, од.	11 067
6	Частка котлів на природному газі, %	88
7	Протяжність ТМ, тис. км	20,9
8	Кількість будівель, приєднаних до ЦТ, од.	99 639
9	Загальна опалювальна площа будинків, приєднаних до ЦТ, млн м^2	307

Кількість потужних котелень ≥20 МВт відносно невелика – 381 од. (9,3 %, рис. 1, 2), але вони виробляють 63 % ТЕ. Саме ці котельні є основою ЦТ України та платформою для створення стійких балансуючих енерго-екологоефективних енергетичних комплексів для виробництва ТЕ та ЕЕ. Домінуюча частка цих котелень працює на природному газі.

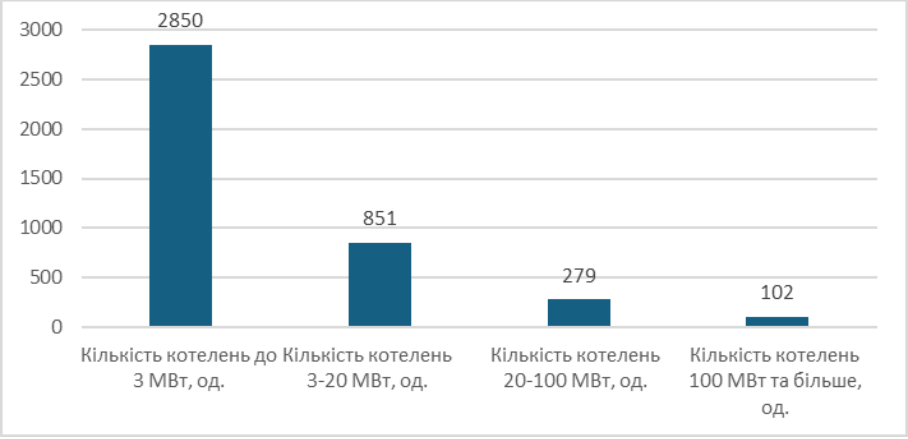


Рис. 1. Розподіл теплових джерел за потужністю

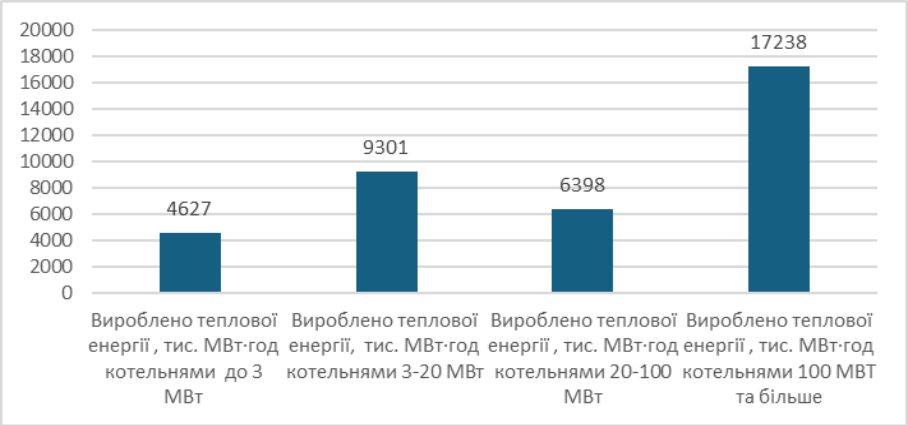


Рис. 2. Розподіл джерел енергії на природному газі за річною виробленою ТЕ

Виконано аналітичний огляд європейського досвіду декарбонізації та модернізації ТДЕ на природному газі, в якому показано, що перехід до низьковуглецевих систем теплопостачання у більшості країн Європи здійснюється поетапно з використанням гібридних рішень, поєднанням різних джерел ТЕ та активним застосуванням інструментів енергетичного планування.

Проаналізовано, що рівень впровадження ВДЕ у сфері ЦТ України є дуже низький. Частка біопалива складає близько 1 %. ТН, ССТ, системи утилізації промислової СТЕ практично відсутні. Проте, загальний потенціал потужності ВДЕ (енергія сонця, вітру, мала гідроенергетика, геотермальна енергія, енергія біомаси) 874 033 МВт.

За результатами проведеного аналізу зроблено висновок про необхідність застосування комплексної та поетапної схеми удосконалення наявних джерел енергії на природному газі, ТМ і приєднаних будівель, а також застосування природного газу як балансуючого палива перехідного періоду спільно з ВДЕ та СДЕ в СЦТ.

У **другому розділі дисертації «Методологічні засади трансформації джерел енергії на природному газі»** викладено науково-обґрунтовану схему поетапної трансформації та декарбонізації джерел енергії на природному газі в СЦТ, яка ґрунтується на положеннях загальної теорії змін, аналізі структури та технічного стану існуючих систем, динаміці часових змін сумарних витрат в ЦТ, а також декарбонізації та підвищення енергетичної ефективності процесів отримання, перетворення, передачі, використання ТЕ для джерел енергії на природному газі та їх комплексного використання з ВДЕ, удосконаленні методів комбінованого виробництва ТЕ та ЕЕ з природного газу та ВДЕ. Показано, що декарбонізація СЦТ є довготривалим процесом, який потребує розробки планування перехідного періоду та узгодження технічних і організаційних рішень у часі у рамках тепло-гідравлічних кластерів.

Виконано порівняльний аналіз природного газу, ВДЕ та СТЕ як джерел для вироблення енергії із застосуванням енергетичних (Таблиця 2), теплотехнічних, екологічних та експлуатаційних характеристик.. Як джерела енергії на природному газі розглянуто газові водогрійні котли та малі КГУ. Як ВДЕ розглянуто ЕЕ від СЕС, ТЕ від ССТ, ТН.

Таблиця 2 – Енергетичні показники газових, сонячних і гібридних установок за типовими характеристиками сучасного обладнання

№ п/п	Технологія	База розрахунку	Прийняті показники	Корисний результат	Додатково залучена ТЕ
1	ГК	1 кВт·год природного газу	$\eta_т$=0,92	0,92 кВт·год ТЕ	0
2	Газова КГУ		$\eta_{ел}$=0,36, $\eta_т$=0,50	0,36 кВт·год ЕЕ + 0,50 кВт·год ТЕ	0
3	КГУ+ТН		ті самі ККД; (COP=3)	1,58 кВт·год ТЕ; ЕЕ КГУ споживається ТН	0,72 кВт·год
4	СЕС	1 кВт·год сонячної енергії	$\eta_{елPV}$=0,20*	0,20 кВт·год ЕЕ	–
5	СЕС+ТН		$\eta_{елPV}$=0,20 (COP=3)	0,60 кВт·год ТЕ	0,40 кВт·год
6	ССТ		$\eta_т$=0,60	0,60 кВт·год ТЕ	–

* $\eta_{елPV}$=0,20 – прийнятий електричний ККД фотоелектричного перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію, який характеризує ефективність перетворення сонячної енергії фотоелектричним модулем і не є ККВП СЕС. Річний виробіток ЕЕ визначається окремо з врахуванням сонячного енергетичного потенціалу, тривалості та режиму сонячного випромінювання, орієнтації та кута нахилу панелей, експлуатаційних втрат.

Ці результати не свідчать про універсальну енергетичну перевагу газових джерел над ВДЕ. Вони показують, що поєднання КГУ з ТН дає можливість більш повно використовувати енергію природного газу завдяки одночасному виробництву ТЕ й ЕЕ та додатковому залученню низькопотенційної теплоти. Порівняння альтернативних технологій має виконуватися за єдиним функціоналом та з окремим урахуванням невідновлюваної, відновлюваної і загальної первинної енергії. При цьому комплексне застосування ТН та газових КГУ робить їх енергетично найбільш ефективним джерелом енергії.

Методологія трансформації джерел енергії на природному газі орієнтована на аналіз і трансформацію СЦТ як на рівні окремих джерел енергії на природному газі, так і на рівні систем та їх просторово-функціональних підсистем. Для цього системи теплопостачання розглядаються як сукупність тепло-гідравлічних кластерів, у межах яких комплексно розглядаються взаємопов’язані джерела ТЕ, ТМ та споживачі. Такий метод дозволяє враховувати мінливість теплових навантажень, стан ТМ, а також локальний потенціал різних джерел енергії при прийнятті рішень щодо трансформації джерел енергії на природному газі.

У межах запропонованої методології обґрунтовано поетапність реалізації процесу трансформації джерел енергії на природному газі в екологічно чисті джерела енергії, яка включає аналіз поточного стану джерел енергії на природному газі, цілісний розгляд тепло-гідравлічних кластерів, визначення можливих альтернатив модернізації джерел енергії на природному газі, порівняльну оцінку технологічних рішень та вибір пріоритетних напрямів

декарбонізації. Така послідовність забезпечує узгодженість технічних рішень і дозволяє уникнути фрагментарної модернізації окремих елементів системи.

Запропоновано критерії визначення пріоритетності трансформації джерел енергії на природному газі: потужність джерела енергії; щільність теплового навантаження та лінійна щільність теплоти; стан ТМ; наявність систем централізованого гарячого водопостачання (ГВП), яка збільшує інвестиційну привабливість проєктів трансформації; наявність потенціалу заміщення природного газу ВДЕ, скидним енергетичним потенціалом та КГУ.

У розділі обґрунтовано необхідність урахування часових аспектів у процесі експлуатації джерел енергії на природному газі та визначення обґрунтованого моменту початку їх трансформації (рис. 3).

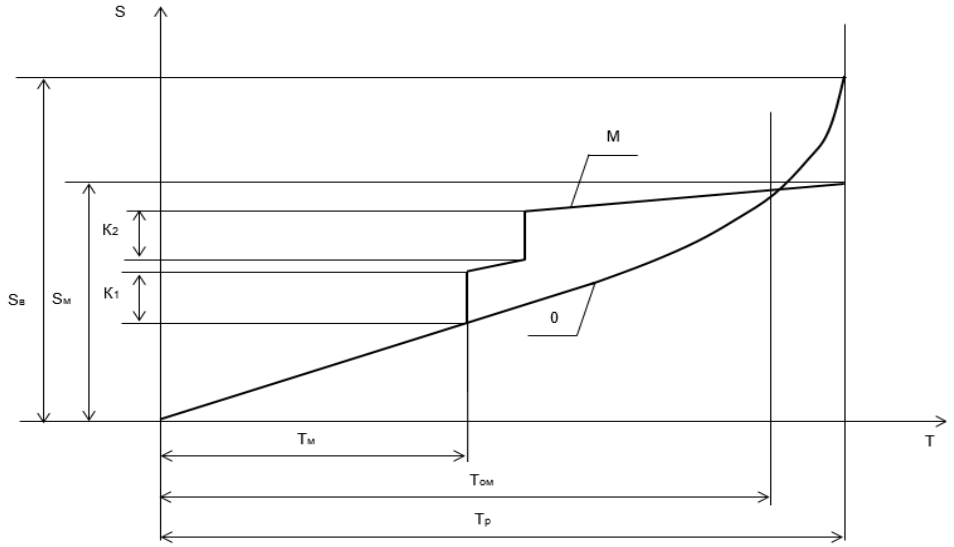


Рис. 3. Зміна сумарних витрат у часі при відсутності (сценарій 0) та наявності модернізації джерел енергії на природному газі (сценарій М)

Т – час; T_p – період планування; T_m – час початку модернізації; T_{om} – час початку періоду, коли сумарні витрати сценарію 0 більше, ніж сумарні витрати сценарію М;S – сумарні витрати (капітальні та експлуатаційні); S_o – сумарні витрати сценарію 0 наприкінці періоду планування; S_m – сумарні витрати сценарію М наприкінці періоду планування; K_1 – капітальні витрати першого етапу модернізації ЦТ сценарію М; K_2 – капітальні витрати другого етапу модернізації ЦТ сценарію М.

При відсутності модернізації джерел енергії на природному газі в СЦТ (сценарій 0), залежність сумарних витрат в часі спочатку має лінійний характер, а з часом нелінійно збільшується через потребу в усуненні аварій, ремонтах, а також збільшення втрат при виробництві та транспортуванні ТЕ. Така тенденція потребує модернізації в певний момент часу T_m. Момент часу T_m характеризується тим, що лінійний характер графіка сумарних витрат помітно змінюється, співвідношення $\Delta S/\Delta T$ все більш нелінійно збільшується. Завдяки впровадженню заходів по модернізації, яка може проводитися у декілька етапів, після певного моменту часу T_{om} сумарні витрати сценарію М будуть меншими, ніж сценарію 0 та $S_m < S_0$, що і є метою проведення модернізації джерел енергії на природному газі в СЦТ. Момент часу T_{om} слід розглядати як термін окупності

капітальних витрат $К = К_1 + К_2$. Крім того, відсутність модернізації системи в кінцевому підсумку призведе до виникнення проблем з надійністю теплопостачання.

Запропоновано використання ГДЕ в СЦТ, у яких виробництво теплової та, за необхідності, ЕЕ забезпечується сукупністю взаємопов'язаних джерел різної фізичної природи, зокрема ТДЕ, ВДЕ та СДЕ, що функціонують узгоджено в межах єдиної технологічної структури теплопостачання з метою підвищення енергетичної ефективності, надійності та поступової декарбонізації.

Запропоновано двоетапний метод щодо визначення зон тепло-гідравлічних кластерів централізованого теплопостачання для пріоритетного впровадження ГДЕ. На першому етапі окремі зони теплозабезпечення розглядаються за попередніми енергетично-геометричними індикаторами (щільності теплового навантаження та лінійної щільності тепла). На основі порівняння цих індикаторів з граничними значеннями (таблиця 3) визначаються зони, до яких необхідно застосування методу витрат та вигід.

Таблиця 3 – Граничні значення індикаторів визначення зон теплозабезпечення (на основі аналізу літературних джерел)

Значення індикатора	Існуюча зона централізованого теплопостачання	Існуюча зона індивідуального (автономного) теплопостачання	Зона багатоповерхової забудови, що проєктується
ЩТН≥ 50 МВт/км^2	ЦТ	МВВ	ЦТ
ЩТН= 30 – 50 МВт/км^2	МВВ	МВВ	МВВ
ЩТН ≤ 30 МВт/км^2	МВВ	ІТ/АТ	ІТ/АТ
ЛЩТЕ ≥ 3 МВт·год/м	ЦТ	МВВ	ЦТ
ЛЩТЕ = 1-3 МВт·год/м	МВВ	МВВ	МВВ
ЛЩТЕ ≤ 1 МВт·год/м	МВВ	ІТ/АТ	ІТ/АТ

У таблиці 3 скорочення мають таке значення: МВВ – рекомендовано застосування методу витрат та вигід; ЦТ – рекомендовано застосування ЦТ; ІТ/АТ – рекомендовано застосування індивідуального / автономного теплопостачання, ЩТН – щільність теплового навантаження, ЛЩТЕ – лінійна щільність теплової енергії.

Результати аналітичних та статистичних досліджень, які представлені у таблиці 3, показують, що при ЩТН більше 50 МВт/км^2 доцільне застосування ЦТ, при ЩТН менше 30 МВт/км^2 доцільне застосування АТ або ІТ, у проміжному діапазоні – необхідне застосування МВВ.

Запропонована модель застосування МВВ для визначення виду теплозабезпечення в існуючій зоні забудови має вигляд, наведений на рис. 4.

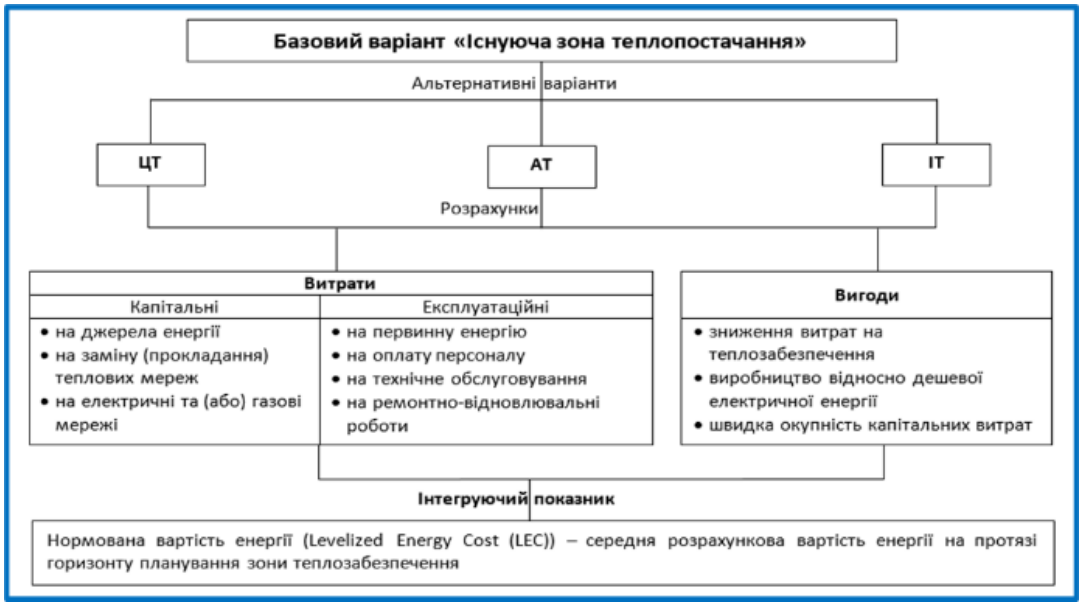


Рис. 4. Загальний метод щодо застосування МВВ для визначення зон теплозабезпечення

Такий метод передбачає порівняння існуючої зони забудови (базовий варіант) з 3-ма альтернативними варіантами: ЦТ, АТ і ІТ (рис. 4).

Для кожного варіанту визначаються витрати і вигоди та порівнюються за показником нормованої вартості життєвого циклу енергії (LCOE – levelized cost of energy).

У математичній формі рішення завдання визначення рекомендованого виду теплозабезпечення у певній зоні забудови можливо сформулювати як вибір мінімального значення із множини з 3-х елементів:

$$LCOE_{рек} = min\{LCOE_{ЦТ}, LCOE_{АТ}, LCOE_{ІТ}\}. \quad (1)$$

Тобто, як рекомендований вид теплозабезпечення зони забудови вибирається вид теплозабезпечення з мінімальною вартістю життєвого циклу енергії.

Розроблена модель може бути використана для визначення виду теплозабезпечення нової зони забудови або перегляду існуючого виду теплозабезпечення.

Із застосуванням розробленої математичної моделі виконано розрахунковий аналіз впливу різних факторів на визначення виду теплозабезпечення. Показано, що на великих горизонтах планування вартість експлуатаційних витрат суттєво перевищує капітальні витрати, тому вирішальними факторами визначення типу зони теплозабезпечення є саме вартість ТЕ, що виробляється запропонованим джерелом енергії. Другим за важливістю фактором є капітальні витрати на модернізацію / прокладання ТМ (протяжність та стан ТМ). При цьому капітальні витрати саме на джерело енергії є другорядним фактором.

Принципово важливим питанням для теплозабезпечення є зменшення втрат тепла в ТМ у неопалювальний сезон. Основні критерії застосування централізованого та децентралізованого ГВП представлені у таблиці 4.ю

Таблиця 4 – Критерії застосування централізованого або децентралізованого ГВП

Критерії	Централізоване ГВП	Децентралізація ГВП
Можливість впровадження ССТ з сезонним ТА	+	–
Можливість впровадження СЕС з ТН та сезонним ТА	+	–
Великі втрати ТЕ в неопалювальний період	–	+
Підвищення коефіцієнту використання встановленої потужності нового капіталомісткого обладнання для використання ВДЕ, СТЕ та КГУ.	+	–

Як показано в таблиці 4, доцільно розглядати децентралізацію ГВП у випадку наявних великих втрат ТЕ в неопалювальний період та відсутності можливостей трансформації джерел енергії на природному газі, вказаних у таблиці 4. В інших випадках, при наявності потенціалу впровадження СЕС з ТН та сезонним ТА, ССТ з сезонним ТА, використання ВДЕ, СТЕ та КГУ доцільно зберегти / відновити та вдосконалити / модернізувати джерела енергії на природному газі.

У **третьому розділі дисертації «Обґрунтування структури та режимів функціонування ГДЕ з використанням ВДЕ та природного газу»** наведено основні наукові результати дослідження ефективності енергетичних, тепло-гідравлічних та техніко-економічних процесів перетворення первинної енергії у ТЕ та ЕЕ з урахуванням сумісної роботи традиційних ГК, малих КГУ, ВДЕ і СДЕ, а також систем акумулювання ТЕ та ЕЕ.

На рис. 5 наведено узагальнену потенційну структурну схему ГДЕ, яка є основою для визначення рекомендованої структури ГДЕ.

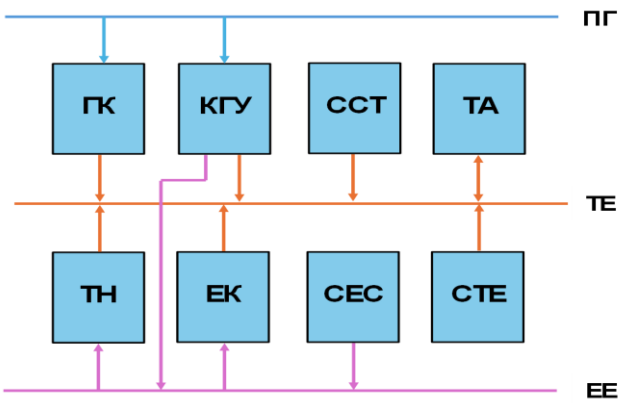


Рис. 5. Узагальнена структурна схема ГДЕ

ГК – газові котли; КГУ – когенераційні установки; ТН – теплові насоси; ЕК – електричні котли; ССТ – сонячні станції теплопостачання; СЕС – сонячні електричні станції; СТЕ – скидна теплова енергія; ТА – теплові акумулятори; ПГ, ТЕ, ЕЕ – мережі природного газу, теплової та електричної енергії.

Існуючі газові котельні розглядаються як базові платформи для поетапної інтеграції ВДЕ і СДЕ та формування малих розподілених енергетичних комплексів, здатних забезпечувати комбіноване виробництво ТЕ та ЕЕ.

Для газової котельні з приєднаним тепловим навантаженням Q та потужністю власного електричного споживання E_0 потенційні варіанти структури комбінованого декарбонізованого джерела енергії складають множину:

$$МПВ = \{ B_1, B_2, \ldots, B_i, \ldots, B_n). \quad (2)$$

Для кожного варіанту з МПВ визначаються певні значення показника вартості життєвого циклу інвестиційного проєкту (LCOE) для реалізації цього варіанту, які формують у свою чергу множину LCOE:

$$LCOE = \{LCOE_1, LCOE_2, \ldots, LCOE_i, \ldots, LCOE_n). \quad (3)$$

Необхідно визначити структуру комбінованого декарбонізованого джерела енергії, яка відповідає вимозі (4):

$$LCOE_i \rightarrow \min. \quad (4)$$

При цьому встановлена теплова ($Q_к$) та електрична ($E_к$) потужність комбінованого декарбонізованого джерела енергії повинна відповідати вимогам:

$$Q_к \leq Q \text{ і } E_к \geq E_0. \quad (5)$$

Приклад множини (2) різних варіантів структур ГДЕ (рис. 5) представлено в таблиці 5.

Таблиця 5 – Варіанти структури ГДЕ

№	Структура	Коментар
1	ГК+КГУ	КГУ на природному газі
2	ГК+КГУ на біопаливі	КГУ на біопаливі (залежно від вартості щепи)
3	ГК+КГУ+ТН+ТА	повітряний ТН за «нічним» тарифом, добовий ТА
4	ГК+КГУ+ТН+ ТМ	ТН на каналізаційні очисні споруди (КОС), додаткова ТМ від КОС до котельні
5	ГК+ ТН+ТА	повітряний ТН, живлення ТН за «нічним» тарифом
6	ГК+СЕС+ ТН+ЕА	повітряний ТН, живлення ТН від СЕС
7	Існуючий ГК	Базовий варіант для порівняння
8	ГК+ССТ+СТА	сезонний ТА
9	ГК+ газогенератор на біопаливі	модернізація газових пальників
10	ГК+КГУ+ТН	повітряний ТН

Поряд з варіантами, наведеними у таблиці 5, можуть бути розглянуті й інші варіанти ГДЕ.

У графічному вигляді запропонований метод можливо відобразити у вигляди діаграми (рис. 6). Як база для порівняння розглядається існуюча технологія виробництва енергії на газовій котельні (варіант 7). Технології 1–6 мають LCOE менше, ніж $LCOE_7$, тому застосування цих технологій слід вважати

економічно доцільним. Технології 8–10 мають LCOE більше, ніж $LCOE_7$, тому застосування цих технологій слід вважати економічно недоцільним, але таке ранжування може суттєво змінюватися в залежності від впливових факторів.

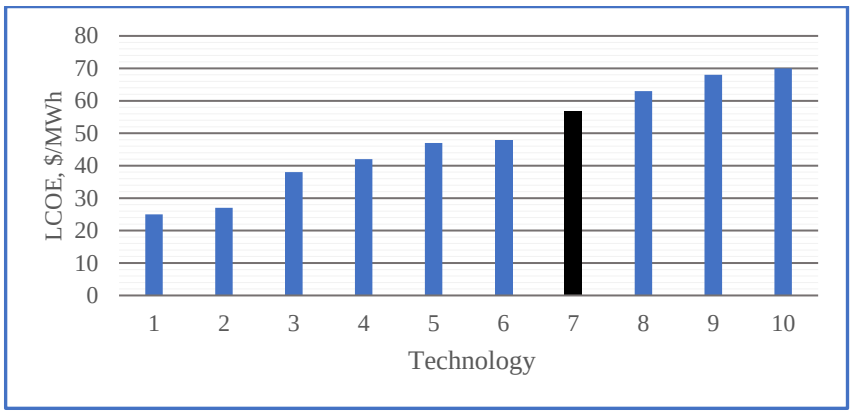


Рис. 6. Приклад порівняльного аналізу ефективності технологій виробництва ТЕ для різних джерел енергії

Показники енергетичної ефективності ВДЕ і СДЕ доцільно розглядати в рамках тепло-гідравлічних кластерів з врахуванням просторових обмежень, режимів роботи та потреби в балансуючих джерелах, потенціалу заміщення природного газу ВДЕ. Це зумовлює необхідність уточнення традиційних методів, зокрема методу щодо визначення показника енергетичної ефективності ГДЕ, який розглядається нижче.

Загальний метод щодо визначення показника енергетичної ефективності ГДЕ у порівнянні з енергетичною ефективністю базового теплового джерела проілюстровано схемою (рис. 7).

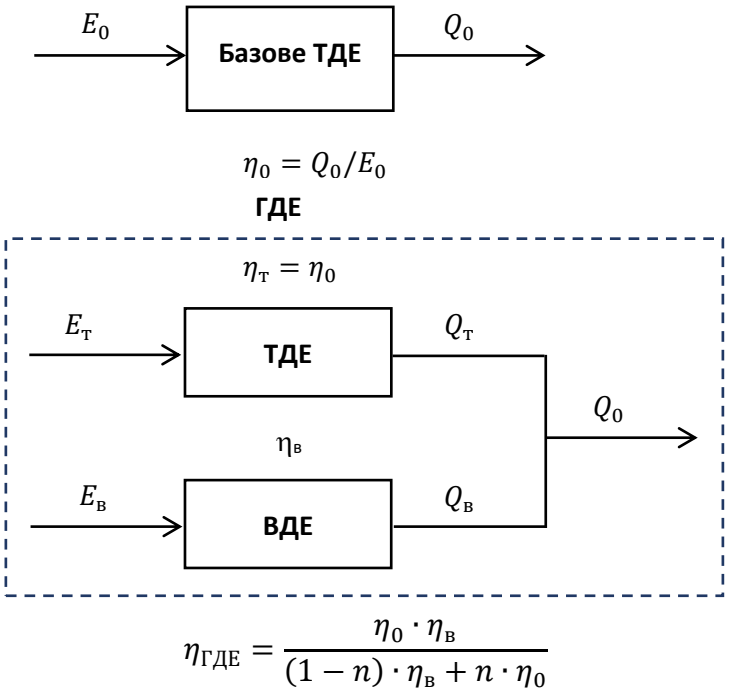


Рис.7. Схема загального методу щодо визначення $\eta_{ГДЕ}$

ТДЕ – традиційне джерело енергії (базове та у складі ГДЕ);
ВДЕ – відновлювані джерела енергії;
Q_0 – загальна корисна енергія;
$Q_т$ – корисна енергія від ТДЕ у складі ГДЕ;
$Q_в$ – корисна енергія від ВДЕ у складі ГДЕ;
E_0 – загальна первинна енергія базового ТДЕ;
$E_т$ – первинна енергія від ТДЕ у складі ГДЕ;
$E_в$ - первинна енергія від ВДЕ у складі ГДЕ;
n – частка відновлюваної енергії у загальній кількості виробленої корисної енергії, яка визначається співвідношенням $Q_в/Q_0$;
η_0 – показник ефективності використання енергії у базовому ТДЕ, який визначається співвідношенням Q_0/E_0;
$\eta_т$ – показник ефективності використання енергії ТДЕ у складі ГДЕ, який визначається співвідношенням $Q_т/E_т$;
$\eta_в$ – показник ефективності використання енергії ВДЕ у складі ГДЕ, який визначається співвідношенням $Q_в/E_в$;
$\eta_{ГДЕ}$ – показник ефективності використання енергії ГДЕ, який визначається співвідношенням $\eta_{ГДЕ} = \frac{\eta_0 \cdot \eta_в}{(1-n)\cdot\eta_в + n\cdot\eta_0}$.

З наведеної залежності для розрахунку $\eta_{где}$ (рис. 7) зрозуміло, що показник енергетичної ефективності ГДЕ залежить від показників енергетичної ефективності ТДЕ, ВДЕ (η_0, $\eta_в$) та частки корисної енергії, виробленої з ВДЕ (n). Вочевидь, якщо $\eta_0 < \eta_в$, то енергетична ефективність ГДЕ буде більша, ніж енергетична ефективність базового ТДЕ, а якщо навпаки, то енергетична ефективність ГДЕ буде менша за енергетичну ефективність базового ТДЕ, що проілюстровано графіком (рис. 8).

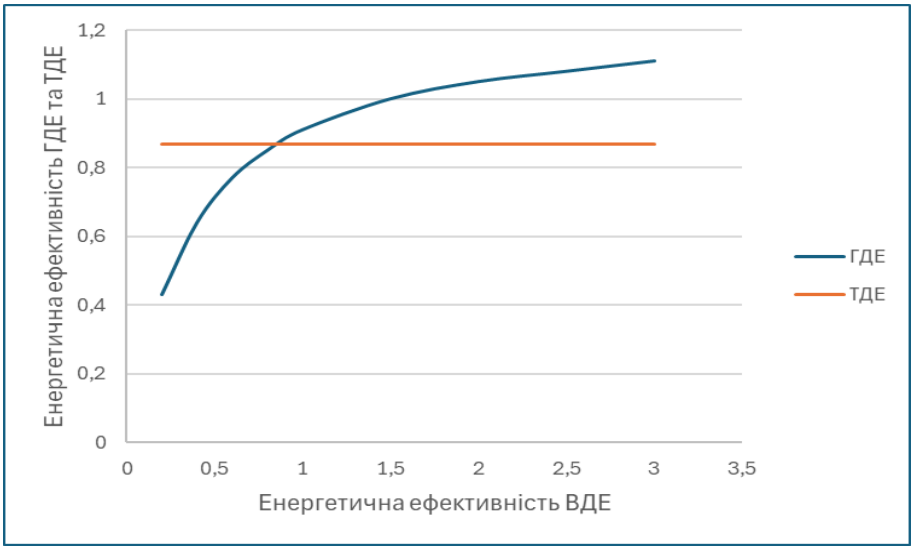


Рис. 8. Залежність показника енергетичної ефективності ГДЕ від енергетичної ефективності ВДЕ (η_0=0,87, n=0,3)

З врахуванням наведеного графіка (рис. 8), у рамках традиційного методу до енергетичної ефективності (співвідношення корисно використаної та первинної енергії) стосовно ГДЕ можна зробити такі висновки: функціонуючі газові котли в СЦТ України характеризуються фактичною середньою енергетичною ефективністю η_0=0,87. Таким чином зрозуміло, що такі ВДЕ, як ССТ, СЕС+ЕК, а навіть і СЕС+ТН, будуть знижувати енергетичну ефективність ТДЕ, а такі ВДЕ, як ТН, можуть її підвищувати.

Однак більш глибокий висновок полягає у тому, що традиційний метод до визначення енергетичної ефективності стосовно ВДЕ та ГДЕ не може бути об'єктивним критерієм прийняття рішень у процесі декарбонізації джерел енергії на природному газі, тому що у цьому процесі домінуючу роль відіграють техніко-економічні та екологічні фактори. Викопні палива, включно з природним газом, є дорогими ресурсами, а енергія від ВДЕ є безкоштовною і її використання пов'язано переважно з капітальними витратами. Тому у цьому дослідженні для порівняння альтернативних варіантів рекомендовано застосування МВВ і показника нормованої вартості енергії LCOE.

У дослідженні запропоновано алгоритм функціонування системи автоматичного регулювання теплотехнічних процесів, зокрема потужності гібридних джерел ТЕ та ЕЕ по критерію LCOE і МВВ в рамках тепло-гідравлічних кластерів, яка передбачає пріоритетне використання ВДЕ і СДЕ та залучення природного газу як балансуючого ресурсу з врахуванням змін теплового навантаження, наявності ЕЕ та режимів роботи ТМ. Загальна схема автоматизації технологічного процесу роботи ГДЕ представлена на рис. 9.

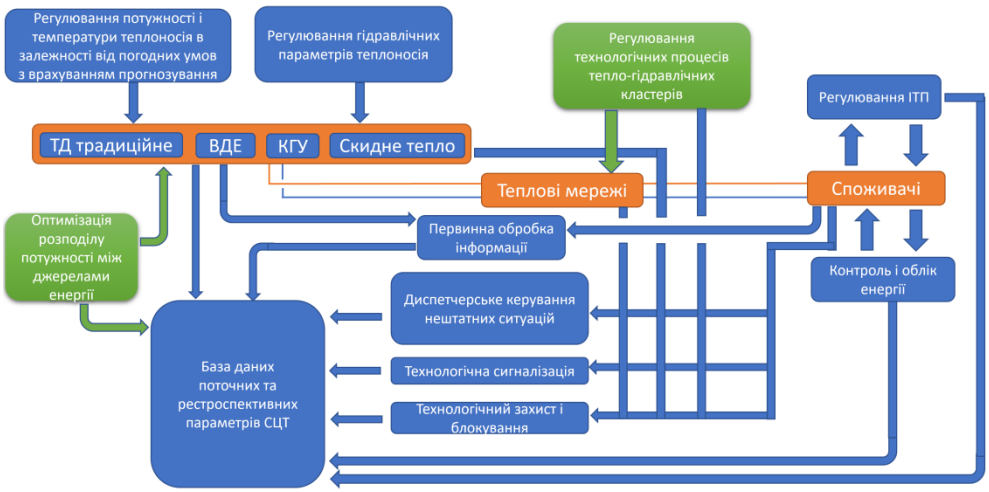


Рис. 9. Схема автоматизації технологічного процесу роботи ГДЕ у рамках тепло-гідравлічного кластеру

Такий метод забезпечує економічно обґрунтоване зниження споживання природного газу при збереженні надійності теплопостачання споживачів.

Запропоновано загальний алгоритм розподілу потужності ГДЕ між джерелами на природному газі та ВДЕ в залежності від впливових факторів (рис. 10), таких як: вартість природного газу та ЕЕ, інтенсивність сонячної

радіації, коефіцієнт перетворення (COP – Coefficient of Performance) ТН, стану теплового та електрично акумуляторів, температури зовнішнього повітря тощо.

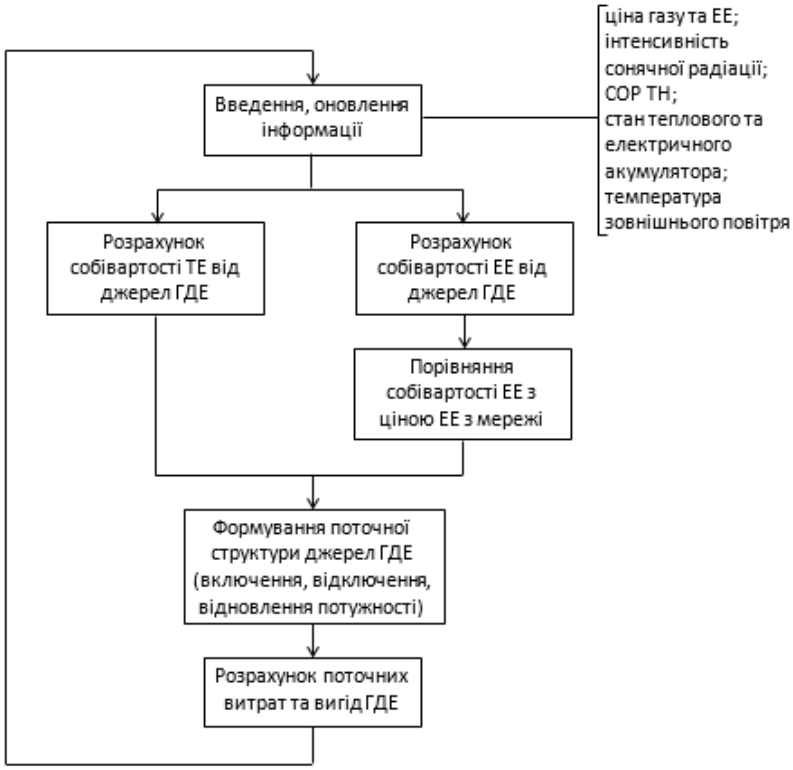


Рис. 10. Загальний алгоритм розподілу потужності ГДЕ

Зазначений метод реалізується із застосуванням комплексу розрахунків енергетичної ефективності, що використовується для обґрунтування доцільності вибору поточної потужності ТДЕ та ВДЕ.

В алгоритмі розподілу потужності ГДЕ використано МВВ в реальному часі за показником співвідношення витрат і вигід (СВВ):

$$СВВ = B_t / C_t \rightarrow max. \quad (6)$$

Запропонований алгоритм дозволяє автоматизувати функціонування гібридних джерел у процесі поетапної трансформації СЦТ.

У **четвертому розділі «Практичні аспекти інтеграції гібридних джерел енергії в СЦТ»** показано, що газові котли забезпечують високу керованість теплової потужності та ефективне покриття пікових навантажень, однак характеризуються низькою ексергетичною ефективністю використання природного газу. Це обумовлює необхідність пошуку більш раціональних способів використання природного газу в СЦТ.

Запропоновано декілька рішень інтеграції тепло-гідравлічних кластерів з ГДЕ для підвищення стійкості СЦТ, зокрема: застосування газових КГУ; котлів на гранулах з деревини; використання висушених мулів для виробництва ТЕ; застосування СЕС та ТН, а також сезонним акумулюванням ТЕ; використання геотермальних ТН; застосування ТН і КГУ на КОС.

Показано ефективність застосування газових КГУ, які забезпечують одночасне виробництво ТЕ та ЕЕ.

В результаті проведеного розрахункового дослідження визначено, що комплексне застосування КГУ і ТН підвищує кількість ТЕ, виробленої з одиниці природного газу, порівняно з газовими котлами в 1,5–2 рази.

Використання запропонованої схеми взаємодії КГУ і ТН у структурі ГДЕ дозволяє виробляти у ТН теплоносій з температурою нижче температурного графіка і догрівати її до розрахункової температури за допомогою більш гарячого теплоносія від КГУ. Це дозволяє використовувати ТН з більш високим СОР. Спільне функціонування КГУ та ТН у структурі газової котельні ЦТ суттєво покращує балансуючу спроможність КГУ для виробництва ЕЕ у певні періоди часу. При застосуванні ГДЕ у складі ГК, КГУ та ТН частка ВДЕ в залежності від температурного графіка та температури низькопотенційного теплового джерела складає 18–46 %. При переході на низькотемпературний графік частка декарбонізованої ТЕ від ГДЕ суттєво збільшуватиметься.

Доцільність впровадження КГУ підтверджується практичним прикладом модернізації СЦТ м. Чернігів в рамках міжнародного проєкту енергетичної безпеки (ESP) USAID «Розробка схеми теплопостачання міста Чернігів на період 2025–2034 роки».

Проєкт зі встановлення 11 газових КГУ є швидкоокупним – в межах 2,3 років. Обсяг інвестицій на впровадження проєкту – 1386 млн грн. Економія від впровадження КГУ – 609,9 млн грн.

Таблиця 6 – Енергетичні та екологічні показники проєкту встановлення 11 газових КГУ

Показники	Одиниці	Базовий сценарій	Проєктне значення	Зміна (вигоди і витрати)
Електрична потужність	МВт		22,47	22,47
Теплова потужність	МВт		24,2	24,2
Виробництво ТЕ (заміна палива газ-біомаса)	тис. Гкал/рік	89,6*	89,6	
Споживання газу	тис. $м^3$/рік		25242,3	-27844,8
Генерація ТЕ в режимі когенерації	МВт·год /рік		106187	106187
	Гкал/рік		91320	91320
Виробництво е.е.	тис. кВт·год/рік	0	95568	95568
Тривалість роботи	год/рік	4584	4584	
Споживання і економія ПЕР	МВт·год/рік	0	142290	142290
Викиди парникових газів	т CO_{2e}/рік	0	56105,2	-56105,2

* кількість ТЕ, яка буде вироблена КГУ, а раніше вироблялась водогрійними котлами;

Результати теоретичного аналізу та практичного впровадження в м. Чернігів свідчать про доцільність заміни частини газових котлів КГУ.

В рамках міжнародного проєкту GIZ ReWarm «Сприяння досягненню кліматичної нейтральності системи теплопостачання міста Чернігова» доведено ефективність встановлення СЕС та ТН на каналі скидної теплої води ТЕЦ у вигляді гібридного енергетичного комплексу на Чернігівської ТЕЦ (рис. 11).

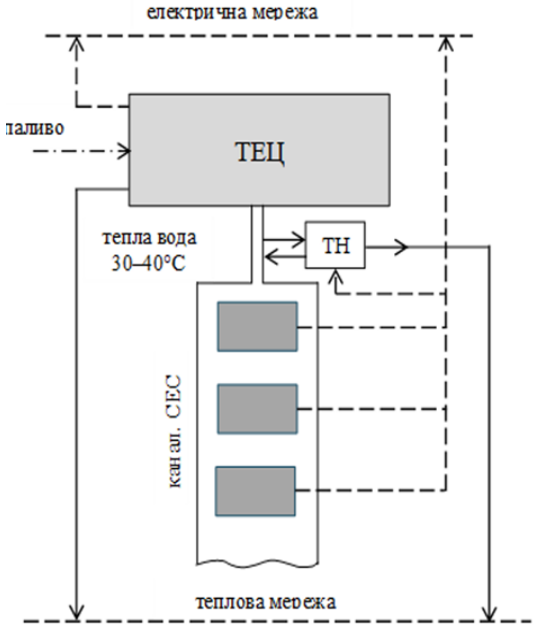


Рис. 11. Принципова схема інтеграції СЕС та ТН в СЦТ на базі ТЕЦ

На рисунку 11 представлено принципову схему інтеграції СЕС та ТН у СЦТ на базі ТЕЦ. Як джерело низькопотенційної енергії використовується канал скидної теплої води ТЕЦ із температурою 30–40 °С. Цей потік є стабільним за температурою протягом усього року та енергетично недовикористаним у традиційних схемах. ЕЕ від СЕС передається до ТН, який виробляє ТЕ, та(або) безпосередньо постачається в електричну мережу у певній пропорції в залежності від попиту на теплову та(або) ЕЕ.

Особливістю запропонованого рішення є використання водної поверхні каналу для розміщення фотоелектричних модулів, що дозволяє вирішити проблему дефіциту (раціонального використання) земельних ресурсів. Загальна площа каналу становить близько 6 га. Енергетичні та техніко-економічні характеристики проєкту надані у таблиці 7.

Таблиця 7 – Енергетичні та техніко-економічні характеристики проєкту

Назва параметра	Розмірність	Величина
Наявна площа для СЕС	$м^2$	50000
Необхідна питома площа для 1 кВт встановленої (пікової) потужності СЕС	$м^2$/кВт	7
Пікова потужність СЕС	кВт	7143
Питоме річне виробництво ЕЕ	кВт·год/кВт	1100
Річне виробництво ЕЕ	МВт·год	7857
Капітальні витрати на СЕС	тис. USD	2857
Річні експлуатаційні витрати	тис. USD	57,1
Коефіцієнт трансформації ТН		4,00

Назва параметра	Розмірність	Величина
Встановлена теплова потужність ТН	кВт	28571
Річне виробництво ТЕ ТН	МВт·год	31429
Капітальні витрати на ТН	тис. USD	8571,4
Ціна природного газу	грн/м^3	18,0
Калорійність природного газу	ккал/м^3	8100,0
Калорійність природного газу	кВт·год/м^3	9,40
ККД газового котла		0,87
Необхідна кількість природного газу	тис. м^3	3844,3
Вартість природного газу	тис. грн	69199,0
Сумарні капітальні витрати	тис. USD	11428,5
Термін окупності капітальних витрат	років	7,19

Наведені розрахунки показують, що проєкт встановлення енергетичного комплексу у складі СЕС та ТН на каналі СТЕ ТЕЦ є економічно доцільним. Термін окупності проєкту складає 7,2 роки, який розрахований для випадку, коли вся вироблена ЕЕ на СЕС використовується для живлення ТН. Капітальні витрати на реалізацію проєкту складають 11,4 млн USD.

Цей проєкт передбачає підвищення теплової потужності ТЕЦ на 29 МВт та відповідно додаткове виробництво «зеленої» ТЕ в обсязі 31 тис. МВТ·год, що потребує збільшення приєднаної теплової потужності для ЧеТЕЦ. Це досягається за рахунок інтеграції ТМ ТЕЦ та джерел енергії на природному газі, на яких потенціал декарбонізації відсутній або обмежений і «зелена» ТЕ буде подаватися споживачам цих котелень від ТЕЦ.

При необхідності ЕЕ від СЕС може постачатися не на ТН, а в електричну мережу у обсязі 7,9 тис. МВт·год/рік. Така можливість збільшує балансуючу спроможність ТЕЦ та міську СЦТ.

У виконаному досліджені доведено ефективність застосування сонячних станцій централізованого теплопостачання у комплексі із сезонним тепловим акумулятором. В рамках проєкту GIZ ReWarm запропоновано встановлення СЕС з СТА на котельню Інструментальна, яка має встановлену потужність 50 МВт, приєднану потужність 29 МВт, а річне виробництво ТЕ у базовому році 30 ГВт·год. Розроблено математичну модель, яка дозволяє визначити вплив потужності та інших факторів на техніко-економічні показники проєкту будівництва СЕС з СТА. В таблиці 8 надані енергетичні та техніко-економічні показники СЕС з СТА, яка заміщує 10 % ТЕ, виробленої в котельні Інструментальна в базовому році, а саме – 3 ГВт·год.

Таблиця 8 – Енергетичні та техніко-економічні показники СЕС з СТА

Назва параметру	Розмірність	Значення
Річне виробництво ТЕ в котельні у базовому році	тис. МВт·год	30,4
Частка заміщення природного газу сонячної енергією	%	10
Річне виробництво ТЕ в котельні за рахунок СЕС	тис. МВт·год	3,04

Назва параметру	Розмірність	Значення
Необхідна площа сонячних колекторів ССЦТ	$м^2$	4580
Об’єм води в ТА (Ø50 × 57м)	тис. $м^3$	112
Питома вартість будівництва ССЦТ	USD/$м^2$	300
Питома вартість ТА	USD/$м^3$	26
Капітальні витрати на ССЦТ	млн USD	1,37
Капітальні витрати на ТА	млн USD	2,94
Сумарні капітальні витрати на ССЦТ і ТА	млн USD	4,31

Запропонована ССТ має такі основні характеристики: площа сонячних колекторів – 4580 $м^2$, необхідний об’єм води в СТА – 112 тис. $м^3$, капітальні витрати на сонячні колекторі – 1,37 млн USD, капітальні витрати на сезонний теплової акумулятор – 2,94 млн USD, сумарні капітальних витрати – 4,31 млн USD, термін окупності капітальних витрат – 28 років.

Не зважаючи на великий термін окупності капітальних витрат цей проєкт включено до пакету запропонованих проєктів декарбонізації, оскільки він має такі позитивні риси: повна незалежність від викопного палива та його вартості, підвищення стійкості СЦТ та балансуючої спроможності за умови інтеграції ТМ.

В рамках міжнародного проєкту ESP USAID показано особливості практичного застосування ТН в складі ГДЕ на прикладі використання ТН і КГУ на КОС у м. Львові. Концепція проєкту полягає у використанні СТЕ очищених каналізаційних стоків КОС ЛМКП КП «Львівводоканал» в розташованій поруч СЦТ ЛМКП «Львівтеплоенерго» на основі застосування ТН. ТН застосовуються в комплексі з КГУ на природному газі (далі – ТНКС). КГУ забезпечують електроенергією ТН, а їх СТЕ використовується для додаткового підігріву теплоносія.

Висока техніко-економічна ефективність використання ТНКС досягається при цілорічній роботі обладнання. Тому потужність ТНКС підібрано таким чином, щоб цілорічно забезпечувати теплових споживачів гарячою водою.

Таким чином наведені дані щодо практичного впровадження різних варіантів застосування ГДЕ в існуючих схемах централізованого теплопостачання підтверджують актуальність та життєздатність запропонованих в дисертаційному дослідженні науково-практичних рекомендацій.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розроблено науково-практичні рекомендації щодо поступової трансформації джерел енергії на природному газі з метою їх декарбонізації, підвищення енергетичної ефективності та надійності, у рамках процесу перехідного періоду з врахуванням показників поточного стану та цільових показників трансформації. Основні результати дисертаційного дослідження полягають у такому:

1. Проведено комплексний аналіз поточного стану джерел енергії на природному газі України включно з показниками надійності, енергетичної ефективності та ступеня декарбонізації газових котелень і тепло-гідравлічних кластерів, які вони обслуговують. За результатами аналізу встановлено, що кількість потужних котелень ≥20 МВт відносно невелика – 381 од. (9,3 %), але вони виробляють 63 % ТЕ. Встановлено, що 83 % котлів цих котелень мають термін експлуатації >15 років. Саме ці котельні повинні бути стартовою платформою для трансформації застарілого ЦТ. Практично відсутнє використання сонячної енергії та скидного тепла.

2. Розроблено методику щодо наукового обґрунтування еколого-енергетичної трансформації систем централізованого теплопостачання, яка враховує послідовність впровадження інноваційних технологій та дозволяє розробити узагальнені напрями та основні етапи Дорожньої карти перспективного розвитку цих систем.

3. Вперше з використанням методичних рекомендацій, розроблених автором, обґрунтовано доцільність та зміст процесу поступового перетворення існуючих газових котелень в гібридні джерела енергії в рамках тепло-гідравлічних кластерів з визначенням потенціалу ВДЕ, скидного тепла для спільного виробництва теплової та електричної енергії з врахуванням показників ЛЩТ та ЩТН. Доведено, що застосування ГДЕ в СЦТ доцільно при ЩТН ≥ 50 МВт/км^2 та ЛЩТ ≥ 3 МВт·год/м.

4. Вперше з використанням методичних рекомендацій, розроблених автором, обґрунтовано необхідність процесу перехідного періоду трансформації джерел енергії на природному газі та впровадження ГДЕ, включно з часовими та структурними закономірностями, пріоритетністю та послідовністю процесу трансформації. Внаслідок зношеності обладнання і ТМ з часом відбувається нелінійне зростання пошкоджень ТМ, що ускладнює забезпечення стабільності теплопостачання споживачам, а також призводить до збільшення експлуатаційних витрат. Тому процес трансформації потребує поетапності впровадження. Визначено момент початку трансформації як мінімізацію сумарних витрат за період планування.

5. Вдосконалено обґрунтування доцільності використання природного газу як балансуючого палива перехідного періоду, що дає можливість компенсувати нестабільність енергопостачання від мінливих ВДЕ / СДЕ та поступово збільшувати їх частку у енергетичному балансі СЦТ. Це обумовлено нерівномірністю потреби ТЕ та нерівномірністю сонячної радіації протягом

року, так як майже 71 % сонячної інсоляції припадає на неопалювальний період, а водночас близько 93 % річної потреби в ТЕ припадає на опалювальний сезон.

6. Доведено, що комплексне застосування ГДЕ у складі газових КГУ і ТН більш ніж у 1,5 рази є енергетично ефективнішим порівняно з газовими водогрійними котлами, що зумовлює високу актуальність їх впровадження для трансформації та декарбонізації існуючих СЦТ.

7. Розроблено метод визначення енергетичної ефективності ГДЕ з врахуванням співвідношення відновлюваної енергії до загальної виробленої енергії. Показано, що традиційний метод визначення енергетичної ефективності ГДЕ доцільно застосовувати для вибору рекомендованого варіанту трансформації джерел енергії на природному газі у комплексі з енергетичними, техніко-економічними та експлуатаційними показниками на основі застосування методу витрат та вигід. При застосуванні ГДЕ у складі ГК, КГУ та ТН частка ВДЕ в залежності від температурного графіка та температури низькопотенційного ТД складає 18–46 %. При переході на низькотемпературний графік частка декарбонізованої ТЕ від ГДЕ суттєво збільшуватиметься.

8. Розроблено пакет розрахункових моделей для оцінки ефективності різних варіантів застосування ГДЕ для виробництва теплової та електричної енергії у газових котельнях.

9. Розроблено технологічні основи та алгоритм автоматизації регулювання теплотехнічних процесів ГДЕ по критерію питомої вартості енергії і методу витрат та вигід.

Запропоновані рекомендації застосовано при розробці схем теплопостачання населених пунктів України, муніципальних енергетичних планів та навчанні персоналу місцевих громад, який відповідає за питання енергетики та енергетичної ефективності.

Пропонується використання зазначених рекомендацій для доопрацювання та вдосконалення існуючої «Методики розроблення схем теплопостачання населених пунктів України».

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ

Монографії та посібники

1. Карп І.М., Нікітін Є.Є., П’яних К.Є., Сігал О.І., Дубовський С.В., Гелетуха Г.Г., Тарновський М.В., Дутка О.В., Зубенко В.І., Комков І.С., Олійник Є.М., Падерно Д.Ю., П’яних К.К., Силакін О.Е., Степанов М.В., Федоренко В.М. Стан та шляхи розвитку систем централізованого теплопостачання в Україні. Київ : Наукова думка, 2021. Т. 1. 264 с.
2. Карп І.М., Нікітін Є.Є., Басок Б.І., Дубовський С.В., Гелетуха Г.Г., Сігал О.І., Дутка О.В., Комков І.С., Тарновський М.В., Силакін О.Е., Бабін М.Є., Желєзна Т.А., Пастух А.В., Падерно Д.Ю., Плашихін С.В., Ніжник Н.А. Стан та шляхи розвитку систем централізованого теплопостачання в Україні. Київ : Наукова думка, 2022. Т. 2. 176 с.

3. Посібник з муніципального енергетичного менеджменту // Проєкт USAID "Муніципальна енергетична реформа в Україні" (співавтор), 2014

Статті у фахових закордонних виданнях та України

4. Нікітін Є.Є., Дутка О.В., Тарновський М.В., Аналіз структури та ефективності функціонування систем централізованого теплопостачання населених пунктів // Енерготехнології та ресурсозбереження, №2-2012;
5. Дутка О.В, Нікітін Є.Є, Вибір оптимального місця розташування газової котельні для новозбудованого житлового району // Енерготехнології та ресурсозбереження, №3-2012;
6. Нікітін Є.Є., Дутка О.В., Оцінка техніко-економічної ефективності комплексної термомодернізації системи центрального теплопостачання та будівель // Енергетика і ПЕК, №9-2013;
7. Дутка О.В., Нікітін Є.Є., Вплив щільності населення району на вибір джерела теплопостачання // Енергетика і ПЕК, №1-2014;
8. Нікітін Є.Є., Дутка О.В., Комплексний підхід до модернізації котелень, теплових мереж та приєднаних будівель. // Енерготехнології та ресурсозбереження, №2-2019, https://doi.org/10.33070/etars.2.2019.03
9. Нікітін Є.Є., Дутка О.В., Техніко-економічна ефективність комбінованих систем централізованого теплопостачання з локальним тепловим джерелом для гарячого водопостачання // Енерготехнології та ресурсозбереження, №1-2020, https://doi.org/10.33070/etars.1.2020.4
10. Нікітін Є.Є., Дутка О.В., Застосування методу витрат та вигід для визначення зон теплозабезпечення населених пунктів // Енерготехнології та ресурсозбереження, №1-2025, https://doi.org/10.33070/etars.1.2025.03
11. Nikitin Ye.Ye., Dutka O.V. Transformation of outdated district heating systems // Енерготехнології та ресурсозбереження, №3-2025, https://doi.org/10.33070/etars.3.2025.05
12. Нікітін Є.Є., Дутка О.В., П'яних К.Є., П'яних К.К., Декарбонізація систем централізованого теплопостачання. Планування для великого міста // Енерготехнології та ресурсозбереження, №4-2025, https://doi.org/10.33070/etars.4.2025.01
13. Дутка О.В., Нікітін Є.Є., П'яних К.Є.. Застосування гібридних джерел енергії на газових котельнях систем централізованого теплопостачання // Енерготехнології та ресурсозбереження, №3-2026, https://doi.org/10.33070/etars.3.2026.05

Публікації, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації. Тези і матеріали конференцій

14. Нікітін Є.Є., Дутка О.В., Стратегія комплексної термомодернізації будівель і централізованих систем теплопостачання // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність-2013», Інститут газу, Інститут загальної енергетики НАНУ, 2013;

15. Дутка О.В., Нікітін Є.Є., Основні напрямки підвищення енергетичної ефективності централізованих систем гарячого водопостачання// Відновлювана енергетика та енергоефективність у 21-му столітті. Матеріали 19-ї міжнародної науково-практичної конференції. – Київ, 2018;
16. Дутка О.В., Розроблення і дослідження методів декарбонізації та комбінованого виробництва теплової та електричної енергії застарілих газових систем централізованого теплопостачання // За матеріалами XXXV міжнародної конференції «Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики» , Київ: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2025. – С. 76–80;
17. Нікітін Є.Є., Дутка О. В. Трансформація застарілих газових котелень зі застосуванням теплових насосів, когенераційних установок та акумуляторів енергії // За матеріалами XXXV міжнародної конференції "Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики" , Київ: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2025. – С. 79–84.

Анотація

Дутка О.В. Підвищення енергетичної ефективності та декарбонізація джерел енергії на природному газі у системах централізованого теплопостачання – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – «технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» – Інститут газу НАН України, Київ, 2026 р.

Дисертаційна робота присвячена декарбонізації застарілих джерел енергії на природному газі з врахуванням особливостей поточного стану цих джерел в СЦТ України. Обґрунтовано доцільність процесу поступового перетворення газових котелень в малі розподілені енергетичні комплекси для вироблення ТЕ та ЕЕ.

Обґрунтовано необхідність та зміст планів перехідного періоду, досвід трансформації застарілих газових котелень в країнах ЄС, важливі методичні аспекти планів перехідного періоду, включно з часовими змінами, особливостями поточного стану та структури існуючих СЦТ, а також досліджено структуру ГДЕ у складі газових котелень.

Розроблено технологічні основи та алгоритм автоматизації регулювання теплотехнічних процесів гібридних джерел ТЕ та ЕЕ за критеріями мінімізації вартості життєвого циклу та терміну окупності капітальних витрат на енергетичне обладнання по критерію LCOE і MBB, а також пакет розрахункових моделей оцінки ефективності різних варіантів застосування гібридних систем теплозабезпечення в системах ЦТ.

Результати роботи впроваджено в системах централізованого теплопостачання при розробці схем теплопостачання міст: Львова, Чернігова, Олександрії, Кропивницького, Полтави тощо; а також муніципальних енергетичних планах територіальних громад: Івано-Франківська, Чернівців, Хотина, Миргорода та Конотопа, які затверджені органами місцевого самоврядування.

Ключові слова: процеси отримання, перетворення, передачі та комбінованого використання теплової енергії природного газу і відновлюваних джерел енергії, комбіноване виробництво теплової та електричної енергії, газові котли, теплові насоси, використання вторинних енергетичних ресурсів, енергетична ефективність, автоматизація теплотехнічних процесів, тепло-гідравлічні кластери, зони теплопостачання, системи централізованого теплопостачання.

Abstract

Dutka O.V. Improving Energy Efficiency and Decarbonizing Natural Gas-Fueled Energy Sources in District Heating Systems – Manuscript. – Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.14.06 – Technical Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering – The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the decarbonization of obsolete gas-fired energy sources, taking into account the specific characteristics of their current condition in Ukraine's district heating (DH) systems. The feasibility of the gradual transformation of gas-fired boiler houses into small-scale distributed energy systems for combined heat and electricity generation is substantiated. The necessity and content of transitional period plans are justified based on the experience of transforming obsolete gas-fired boiler houses in the EU countries. The dissertation also examines key methodological aspects of such plans, including the temporal evolution of district heating systems, the current condition and structure of existing DH systems, as well as the configuration of hybrid energy sources integrated into gas-fired boiler houses.

The technological foundations and an algorithm for the automated control of thermal processes in hybrid heat and power generation systems have been developed based on the criteria of minimizing life-cycle costs and the payback period of capital investments in energy equipment using the Levelized Cost of Energy (LCOE) and Cost-Benefit Analysis (CBA) methods. In addition, a set of computational models has been developed to evaluate the effectiveness of various hybrid heat supply solutions for district heating systems.

The research results have been implemented in district heating systems through the development of municipal heat supply schemes for the cities of Lviv, Chernihiv, Oleksandriia, Kropyvnytskyi, Poltava, and others, as well as municipal energy plans for the territorial communities of Ivano-Frankivsk, Chernivtsi, Khotyn, Myrhorod, and Konotop, which have been approved by the respective local self-government authorities.

Keywords: heat energy generation, conversion, transmission, and combined use of thermal energy from natural gas and renewable energy sources; combined heat and power generation; gas-fired boilers; heat pumps; the use of secondary energy resources; energy efficiency; automation of thermal engineering processes; thermal-hydraulic clusters; heat supply zones; centralized heat supply systems.