

**Відгук**  
офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Казарової Інни Олексandrівни  
**«Підвищення ефективності систем енергопостачання**  
**за рахунок впровадження когенерації»,**

що подана в спеціалізовану вчену раду Д 64.180.02 на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

### **1. Актуальність дослідження**

Невпинне зростання цін на енергоносії в Україні, витрати енергії на одиницю продукції, що виробляється, в 2-3 рази більш ніж в розвинутих країнах ставлять завдання з енергозбереження в ряд головних, тому вирішення завдань з енергозбереження в системах теплопостачання є досить важливим. У дисертаційній роботі Казарової І.О. запропоновано та досліджено комплексний підхід переведення котелень у міні-ТЕЦ з можливістю виробництва електроенергії для покриття власних потреб та поліпшення техніко-економічних показників котелень, що в цілому, є вельми актуальну задачею, а одержані результати мають практичне значення.

На відгук представлені дисертаційна робота, автореферат та копії публікацій у періодичних виданнях.

### **2. Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є підвищення техніко-економічних показників об'єктів комунальної енергетики на основі впровадження когенераційних технологій при використанні електрогенеруючих установок малої потужності та вдосконаленні їх теплових схем і режимів експлуатації.

Для реалізації поставленої мети були сформульовані такі задачі:

- аналіз характеристик, експлуатаційних режимів та енергоефективності теплопостачаючих підприємств комунальної енергетики з метою впровадження когенераційних технологій;
- аналіз існуючих когенераційних технологій та можливості інтеграції їх до котелень житлово-комунального господарства;
- порівняльний аналіз впровадження газотурбінних установок, газопоршневих двигунів надбудов і парових турбін малої потужності у комунальних котельнях з метою виробництва електричної енергії;
- обґрунтування доцільність впровадження замкнених паротурбінних циклів на джерелах теплоти малого потенціалу, аналіз низькокиплячих робочих тіл;
- узагальнення підходів до вибору електрогенеруючого устаткування при реалізації когенераційних установок на об'єктах комунальної енергетики;
- рекомендації щодо впровадження когенерації на об'єктах централізованого теплопостачання у житлово-комунальному господарстві.

### **3. Основні теоретичні і наукові результати та їх значимість**

1. За результатами комплексного аналізу структури енергетичного обладнання, технічного стану та режимів експлуатації об'єктів централізованого енергопостачання України визначено шляхи підвищення ефективності використання паливно-

РХ 52116 від 12.03.2018

енергетичних ресурсів та систематизовано підходи впровадження когенераційних технологій до об'єктів комунальної енергетики;

2. Пропонується такий підхід вдосконалення теплогенеруючих підприємств, як реконструкція котелень у міні-ТЕЦ при встановленні сучасних газопоршневих двигунів, газотурбінних установок та паротурбінних установок малої потужності, а також використанні замкнених паротурбінних циклів на НРТ;

3. Виконано порівняльний аналіз впровадження газопоршневого двигуна та газотурбінної установки при переведенні котелень у режим когенерації. Визначено, що найбільш доцільним для об'єктів комунальної енергетики України є використання газопоршневих двигунів;

4. Отримано, що для комунальних енергогенеруючих підприємств, до складу яких входять парові котли, ефективним енергозберігаючим рішенням є встановлення парових протитискових турбін;

5. Вирішено задачу підвищення ефективності використання теплоти димових газів для виробництва електричної енергії на основі реалізації замкнених паротурбінних циклів на низькотемпературних робочих тілах та вибору електрогенеруючого устаткування при реалізації когенераційних установок на підставі проведення техніко-економічного обґрунтування щодо вдосконалення теплових схем котелень.

#### **4. Практичне значення отриманих результатів.**

Вдосконалені методи та підходи дозволяють виконувати розрахункові дослідження і комплексно підходити до вирішення задач енергозбереження на об'єктах комунальної енергетики при впровадженні принципів когенерації. Запропоновано технічне рішення щодо вдосконалення тепової схеми районної котельні, яке дозволило використовувати відходні димові гази для виробництва електричної енергії.

Одержані в дисертаційній роботі результати досліджень передані КП «Харківські теплові мережі» для подальшого використання енергозберігаючих технологій при переведенні котелень у режим когенерації (м. Харків, акт впровадження від 07 червня 2017 р.).

Вдосконалені моделі та підходи застосовуються при виконанні наукових досліджень у відділі оптимізації процесів і конструкції турбомашин Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України (м. Харків, акт впровадження від 17 травня 2017 р.) і в учебному процесі при підготовці бакалаврів, спеціалістів і магістрів кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова (м. Харків, акт впровадження від 25 жовтня 2017 р.).

#### **5. Загальна характеристика дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота складається з вступу, 6 розділів, загальних висновків, включає список використаних джерел та додатки.

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовану мету і задачі дослідження, висвітлення наукової новизни отриманих результатів, їх практичне значення, наведення даних про зв'язок з науковими програмами і темами, апробацію роботи, публікації та особистий внесок здобувача.

У першому розділі за результатами проведеного огляду літературних джерел виконано аналіз проблеми енергозбереження у різних сферах народного господарства, зокрема на об'єктах комунальної енергетики України та при утилізації скидної теплоти малого потенціалу під час генерації теплової енергії.

Проведено оцінку потенціалу впровадження когенераційних технологій на районних котельнях при наявності діючого теплогенеруючого устаткування, що дозволить вдосконалити існуючі теплові схеми з мінімальними капітальними вкладеннями при незначних змінах існуючого технологічного процесу.

Проведено порівняльний аналіз реалізації централізованого та децентралізованого виробництва теплової та електричної енергії.

За результатами виконаного аналізу сформульовано мету і задачі дослідження, які полягають у науковому обґрунтуванні і розробці ефективних заходів щодо підвищення техніко-економічних показників теплоенергетичного устаткування підприємств комунальної енергетики на основі встановлення електрогенеруючого обладнання малої потужності та вдосконалення процесів їх експлуатації.

У другому розділі наведено структуру математичної моделі енергоустановки, розробленої в ПМаш НАН України і адаптованої для розв'язання задач енергозбереження на теплоенергетичних об'єктах комунальної енергетики.

Розрахунок фізичних процесів у теплових схемах енергетичних установок виконується з урахуванням термодинамічних властивостей робочих тіл. З метою визначення доцільності впровадження енергозберігаючих заходів на об'єктах комунальної енергетики виконується техніко-економічне обґрунтuvання, у якому у якості критеріїв можуть виступати: максимальний обсяг електроенергії, що виробляється, мінімальні капітальні вкладення, мінімальний термін окупності проекту розширення ТЕЦ та ін. При вдосконаленні існуючого теплогенеруючого об'єкту основним показником обрано термін окупності проекту.

В процесі дослідження за допомогою техніко-економічної моделі визначаються шляхи підвищення ефективності роботи теплоенергетичного підприємства і оцінюється доцільність впровадження енергозберігаючих заходів на основі реалізації когенерації.

Вдосконалена в роботі економічна модель дає можливість з врахуванням вартісних показників енергетичного устаткування та глибоко змінних режимів експлуатації об'єктів комунальної енергетики визначати терміни окупності реалізації принципів комбінованого виробництва теплової та електричної енергії.

У третьому розділі наведені передумови впровадження когенераційних технологій до житлово-комунального господарства України. Виконаний аналіз комунальної енергетики України показав, що для більшості регіонів держави саме котельні є типовими джерелами теплоти. У зв'язку з цим, в якості об'єкту дослідження обрано комунальне підприємство «Харківські теплові мережі» (КП «ХТМ»).

Комплексний аналіз показав, що споживання електроенергії та фінансові витрати на її придбання займають друге місце у формуванні собівартості продукції. При цьому слід зазначити, що в зимовий період платежі за електроенергію по відношенню до

палива становлять 10 – 12 %, а в літній період 22 – 25 %. Тому питання зниження витрат на електроенергію є досить актуальним.

Проведений на прикладі комунального підприємства «Харківські теплові мережі» аналіз показав, в цілому, що усі котельні знаходяться в рівних кліматичних умовах. Тому основними показниками їх переведення у міні-ТЕЦ шляхом встановлення електрогенеруючого обладнання є:

- кількість грошових коштів, наявних на вдосконалення теплової схеми;
- наявність вільних площ для встановлення електрогенеруючого устаткування;
- ступень завантаженості устаткування протягом року.

Ці показники, що впливають на економічну доцільність вирішення задачі енергозбереження на об'єктах комунальної енергетики при реалізації електрогенеруючого устаткування, дозволили обрати районні котельні для подальших розрахункових досліджень впровадження принципів когенерації.

Четвертий розділ присвячено аналізу та розрахунковим дослідженням перспектив впровадження газотурбінних установок та газопоршневих двигунів на котельнях при переведенні їх у міні-ТЕЦ, що дозволить підвищити ефективність виробництва теплової енергії, а також виробляти електроенергію на власні потреби.

З метою реалізації поставленої задачі проаналізовано цілий ряд виробників енергетичного устаткування зазначеного типу та переваги й недоліки електрогенеруючих установок.

Для оцінки економічної доцільноті переведення котельні в розряд міні-ТЕЦ шляхом впровадження газотурбінної установки, проведено техніко-економічне обґрунтування з визначенням кількості капітальних вкладень та термінів окупності проекту. Для теплового розрахунку техніко-економічних показників (ТЕП), варіантів, що порівнюються було обрано газопоршневі двигуни трьох провідних світових виробників: два «Caterpillar» CAT-400 (по 395 кВт), два «MWM» TCG 2016 V08 C (по 400 кВт), два «MAN Diesel & Turbo» MAN-404N (по 404 кВт). Необхідно забезпечити режими роботи міні-ТЕЦ, що дозволяють виробляти ~ 800 кВт електричної енергії для забезпечення максимуму власного електричного навантаження на прикладі котельні КП «ХТМ» (вул. Академіка Проскури, 1).

Значущою характеристикою є довговічність і витривалість двигуна в процесі експлуатації.

Аналіз ТЕП на прикладі розширення котельні по вул. Академіка Проскури, 1 на базі газопоршневих двигунів виробників «MWM», «MAN» та «Caterpillar» при встановленій електричній потужності ~ 0,8 МВт дозволив встановити:

– загальні інвестиції завантаженості в літній період, що визначається тепловим навантаженням та вартістю теплоносіїв.

Паротурбінні газові установки на базі двох TCG 2016 V08 C в зимовий період дозволить на реалізованій міні-ТЕЦ покривати потужність ~ 800 кВт електричної енергії і отримати прибуток за зимовий сезон від виробництва електроенергії власного споживання. Термін окупності при цьому складе 1,9 року.

В п'ятому розділі представлено результати дослідження доцільноті реалізації принципів когенерації при впровадженні турбін на водяній парі. З метою мінімізації

капітальних вкладень таку можливість розглянуто на котельних, які мають у своєму складі парові котли з відповідними параметрами. У більшості випадків пара, що виробляється такими котлами дроселюється з 1,6 – 3,0 МПа до 0,2 – 0,5 МПа у редукційно-охолоджувальної установці (РОУ) для подачі у бойлери. Встановлення парової турбіни з протитиском замість РОУ дозволить виробляти власну електроенергію за умови забезпечення тепловою енергією та гарячою водою споживачів. В роботі розглянуто можливість реалізації паротурбінного циклу на районних котельнях, провівши оцінку балансів витрати палива, електроенергії, потоків теплоти і витрати води.

У якості прикладу наведено реалізацію принципів когенерації на котельні КП «ХТМ» (пр-т Московський, 275 (ТЕЦ-4)), яка має у своєму складі парові котли.

Розрахунки проведено для трьох перспективних варіантів реалізації на ТЕЦ-4 парових турбін з протитиском різної електричної потужності: для забезпечення тільки власних потреб (взимку ~4,07 МВт, влітку 1,77 МВт, варіант 1); в масштабах виробітку, що забезпечує теплове навантаження влітку на гаряче водопостачання 27 Гкал/год (варіант 2, взимку – навантаження аналогічне); варіант 3 – взимку на тепловому навантаженні в об'ємах, що відповідають максимальному використанню пари, яка може бути вироблена 2-ма котлами: НЛЗ 60/85 і ДЕМ (один у резерві), влітку мінімальне навантаження турбіни.

За результатами проведених розрахункових досліджень та аналізу отриманих результатів виявлено, що найбільш раціональним буде варіант встановлення турбіни Р-6-1,6/0,2.

**В шостому** розділі оцінена можливості реалізації турбоустановок на низькокиплячих робочих тілах при використанні теплоти димових газів, що дозволить виробляти електричну енергію без додаткового палива.

Виконано дослідження впровадження ORC (Organic Rankine Cycle) технології на водогрійні котельні з урахуванням режимних карт експлуатації котельного устаткування. У якості прикладу наведено котельню району КП «ХТМ».

Аналіз режимів роботи теплогенеруючого устаткування показав, що з метою підвищення ефективності роботи котлів і котельні в цілому, котли навантажуються не більше ніж на 60 %, при температурі відходів газів не вище 117 °С. З урахуванням цього обмеження підібрані робочі тіла, запропоновано теплову схему та проведені розрахункові дослідження, за умови, що у зимовий період (6 місяців) в роботі знаходиться 2 котла (котел № 1 та 2), які в результаті дають в середньому 87 Гкал/год, котел № 1 навантажений на 40 %, а котел № 2 на 47 %. Запропоновано такі рішення:

- використання теплоти відходів димових газів, температура яких становить 100 – 105 °С. Реалізація ORC-контуру може дозволити отримати ~600 кВт корисної електричної потужності;
- використання частини теплоти від сільової води;
- комплексне використання теплоти відходів газів та сільової води. Це може дозволити отримати електричну потужність установки близько 1900 кВт, що значно більше, ніж при окремому використанні теплоти димових газів або сільової води та дозволить покрити більше 70 % власних потреб

## **6. Повнота висвітлення матеріалів дисертації**

Основний матеріал дисертації викладено у 18 наукових роботах, з них 7 статей у спеціалізованих наукових виданнях, затверджено МОН України (1 стаття в журналі, що входить до наукометричної бази Scopus), 1 стаття у іноземному журналі і 6 робіт – матеріали конференцій.

## **7. Обґрунтованість і достовірність результатів та висновків**

Результати дисертаційної роботи Казарової І.О. та висновки в цілому обґрунтовані й достовірні, що визначається використанням у дослідженнях апробованих чисельних методів розрахунків, використанням математичних моделей, які базуються на фундаментальних рівняннях термодинаміки та газодинаміки, та використанням методів математичної статистики для обробки результатів чисельних експериментів та оптимізації.

## **8. Рекомендації з використання наукових і практичних результатів**

Результати дисертаційної роботи та подані в дисертаційній роботі рекомендації щодо енергозбереження на об'єктах комунальної енергетики передані підприємству КП «Харківські теплові мережі». Результати дисертаційної роботи використані в учебному процесі кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківському національному університеті міського господарства ім. О.М. Бекетова та в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України при вирішенні задач енергозбереження на основі впровадження когенераційних технологій.

## **9. Зауваження по дисертаційній роботі і автореферату**

Незважаючи на загальну високу оцінку виконаної дисертаційної роботи, вважаю за необхідне зробити деякі зауваження, що не знижує рівень виконаного науково-технічного дослідження. До них відносяться:

1. Огляд досягнень, виконаний у дисертаційній роботі, по технології утилізації теплоти відходних газів котлів з використанням ORC циклу складає біля 60 сторінок, що є багато. При загальному обсязі 150 сторінок. Також кількість посилань на іноземні джерела складає 18 з 142 загальних.

2. Не наведено методики рішення задачі, немає нумерації наведених формул (розділ 2), що ускладнює їх аналіз.

3. Одним із завдань дослідження було «узагальнення підходів до вибору електрогенеруючого устаткування для когенерації», а в дисертації і загальних висновках ці результати не наведені.

4. На стор. 42 з питання глибокого охолодження продуктів згоряння вказується на охолодження газів до 40 °C, при точці роси  $t=51-53$  °C, як це можливо?

5. На рис. 5 автореферату зображені залежності навантаження від градусо-діб опалювального періоду, які мають негативні значення. Згідно ДСТУ – Н Б В.1.1 – 27:2010 (стор. 10), градусо-діб не може мати від'ємних значень.

6. При розрахунку техніко-економічного ефекту від впровадження поршневих когенераційних установок приймалися заниженні мінімальні вартості: енергетична

установка (1000 \$), при середній вартості 2000 \$; ціна на природний газ приймалася 1387 грн /1000 м<sup>3</sup>, замість 8899.60 грн /1000 м<sup>3</sup>. Тому при низьких інвестиційних витратах, термін окупності склав 23-24 місяці. Реальні терміни окупності становлять 3-5 років і більше. При цьому потрібно використання природного газу високого тиску, якого в газових мережах недостатньо.

7. Не має обґрунтування вибору робочого тіла R142b, яке містить шкідливі атоми хлору.

8. Питома електрична потужність, що виробляється для ORC-циклу з робочим тілом R142b становить 20 кВт/(кг·с<sup>-1</sup>). При витраті 10-15 кг/с (25% навантаження) потужність, що виробляється становить 200-300 кВт. На стор. 140 вказується, що при мінімальному навантаженні котла потужність, що виробляється складає 34 кВт?

9. На рис. 6.3 зображене лінійну залежність потужності, що виробляється, від теплового навантаження котлів. Однак витрата продуктів згоряння змінюється нелінійно при різних навантаженнях різних котлів.

10. Електрична потужність, що виробляється у розмірі 650-700 (кВт·рік) становить 100 % споживної потужності в липні, і 35 % – в січні (табл. 6.6). Рекомендована потужність, виробляється у розмірі 100 кВт вартістю в 200 тис. \$ дозволяє покривати всього 5-10% власних потреб. Термін окупності складатиме багато років. Дешевше купити енергію. Так, у чому інновації?

При тому, що експлуатація котлів в режимі неповного навантаження (менше 50%) призводить до зниження ККД (Коефіцієнт корисної дії) котлів, невиконання температурного графіка 95/70 °С. Найефективніше вивести один котел з експлуатації, забезпечити нормальнє навантаження іншого котла, при цьому знизиться електроспоживання котельні, та температура відходів газів підвищиться до (150-180 °С), і є можливість підвищити питоме вироблення електроенергії в ORC-циклі.

11. Сформульовані положення наукової новизни вимагають уточнення:

- п.1 та п.2 вимагають уточнення новизни роботи;
- п. 3 «Вперше» – автором перебільшено, тому що є опубліковані праці з цієї теми, тому краще – «отримано подальший розвиток», а далі по тексту;
- п. 4 «Вперше здійснено узагальнення підходів до вибору ...» – обґрунтування в роботі не наводяться взагалі.

12. Зауваження з оформлення дисертаційної роботи: анотація англійською мовою написана з помилками, зокрема, КП «ХТМ»; в назвах вулиць, районів міста Харкова використовуються старі назви; наводяться скановані малюнки.

## 10. Оцінка роботи в цілому

Розглянувши дисертаційну роботу і автореферат Казарової І.О. необхідно визначити наступне:

10.1 Зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, яка є завершеним науково-практичним дослідженням. Зміст автореферату повністю відображає основні положення дисертації.

10.2 У дисертації сформульовано та вирішено завдання, спрямоване на підвищення енергоефективності джерела теплоти на основі котлів, що спалюють природний газ, та широко використовуються у різних галузях господарства України, зокрема у комунальному секторі, шляхом розробки силового когенераційного контуру раціональної конфігурації, аналізом теплових схем теплоутілізаційних енергетичних установок, оцінкою впливу характеристик елементів схеми на техніко-економічні показники.

10.3 Дисертаційна робота виконана на високому теоретичному рівні із застосуванням для чисельних досліджень сучасних програмних продуктів та аналітичних підходів моделювання теплових схем енергетичних установок.

10.4 Дисертаційна робота і автореферат оформлені з дотриманням вимог, що ставляться до дисертації.

За своєю актуальністю, науковою та практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота «Підвищення ефективності систем енергопостачання за рахунок впровадження когенерації» відповідає п. 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника; затвердженого Постановою КМ України №423 від 07.04.2007 (зі змінами), а її автор – Казарова Інна Олександровна – заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Професор кафедри теплогазопостачання,  
вентиляції та використання теплових  
вторинних енергоресурсів

Харківського національного університету  
будівництва та архітектури

доктор технічних наук, професор

Учений секретар



А.О. Редько

Ю.В. Коломієць