

Національна академія наук України
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного

КАЗАРОВА ІННА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 621.165 : 621.14

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ
ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ КОГЕНЕРАЦІЇ**

Спеціальність 05.14.06 – Технічна теплофізика
та промислова теплоенергетика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертація є рукописом

Робота виконана у Харківському національному університеті міського господарства ім. О.М. Бекетова Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: заслужений діяч науки і техніки України
доктор технічних наук, професор,
Маляренко Віталій Андрійович,
Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова,
професор кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Ганжа Антон Миколайович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій

доктор технічних наук, професор,
Редько Андрій Олександрович,
Харківський національний університет будівництва та архітектури,
професор кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплових вторинних енергоресурсів

Захист відбудеться «22» березня 2018 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02. в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського 2/10.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського 2/10.

Автореферат розіслано «20» лютого 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник

С.В. Альохіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Головною стратегією розвитку народного господарства передових країн світу стає забезпечення сталого та ефективного економічного зростання за рахунок зменшення енергоспоживання на одиницю продукції, що виробляється. Це досягається, в основному, за рахунок застосування новітніх енергозберігаючих технологій та раціонального управління енергогенеруючими об'єктами. Завдяки цій стратегії в розвинених країнах світу, в останнє двадцятиріччя, енергетична ефективність національного доходу зменшилася в середньому на 24 % і забезпечила близько 62,5 % їхнього економічного зростання.

Виходячи зі сказаного, підвищення енергоефективності економіки України є важливим народногосподарським завданням, рішення якого дозволить забезпечити стійке зростання економіки та підвищити енергетичну безпеку країни.

У комунальній енергетиці України знаходиться близько 35 тис. котелень, що укомплектовані 114 тис. котлами. Це значний потенціал впровадження енергозбереження на теплогенеруючих об'єктах, шляхом реконструкції котелень у міні-ТЕЦ при встановленні сучасних газопоршневих двигунів (ГПД), паротурбінних установок (ПТУ) та газотурбінних установок (ГТУ) малої потужності, а також використанні замкнених паротурбінних циклів на низькокиплячих робочих тілах (НРТ) (органічного циклу Ренкіна – organic Rankine cycle – ORC), з метою утилізації вторинних енергетичних ресурсів.

Переведення котелень у режим когенерації потребує вирішення наступних задач:

- аналіз технічного стану та режимів експлуатації устаткування котельні;
- вибір електрогенеруючого обладнання котелень, що знаходяться в межах міста;
- використання вторинних джерел теплової енергії малого потенціалу;
- проведення техніко-економічного обґрунтування доцільності реалізації когенерації та ін.

Проведення комплексного аналізу технічного стану та режимів експлуатації теплогенеруючого устаткування енергетичних об'єктів житлово-комунального господарства (ЖКГ) дозволяє оцінити доцільність подальших розрахункових досліджень та потенціал впровадження принципів когенерації.

При реконструкції котелень важливим є аналіз технічної можливості та економічних наслідків від реалізації ПТУ, ГТУ або ГПД, що дозволить обрати найбільш доцільне та раціональне рішення стосовно об'єкту дослідження.

Вельми актуальним питанням є також корисне використання вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) враховуючи, що більшість підприємств енергетичного сектору ЖКГ характеризуються наявністю скидів теплоти димових газів (ДГ) з температурою 90 – 150 °С. Ефективне використання ВЕР може бути здійснено шляхом впровадження турбін на НРТ, що дозволить виробляти електроенергію та покривати власні потреби без додаткового спалювання палива.

Таким чином, розробка комплексного підходу переведення котелень у міні-ТЕЦ з можливістю виробництва електроенергії для покриття власних потреб та поліпшення техніко-економічних показників котелень, в цілому, є вельми актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає Закону України № 74/94-ВР від 01.07.1994 р. (Закон України «Про енергозбереження»), пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки, а саме, ст. 8 «Нові технології і комплекси». Матеріали, що представлені у дисертаційній роботі є узагальненням наукових результатів, отриманих автором з 2011 по 2017 роки як одного з виконавців науково-дослідних робіт за плановими бюджетними темами і господарськими договорами кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. Автор був виконавцем окремих розділів:

- «Енергоефективність та надійність систем передачі та споживання електроенергії» (2013-2014 р., № ДР 0111U010507);
- «Дослідження можливості застосування та вибір найбільш енергоефективних когенераційних технологій на районних котельнях комунального підприємства «Харківські теплові мережі» на підставі техніко-економічних обґрунтувань» (Господарський договір № 2702/14 від 02.06.2014 р.);
- «Підвищення ефективності виробництва, передачі та використання електроенергії» (2015 р., № ДР 0115U001898).

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 тепlopостачаючих підприємств комунальної енергетики з метою впровадження когенераційних технологій;
- аналіз існуючих когенераційних технологій та можливості інтеграції їх до котелень ЖКГ;
- порівняльний аналіз впровадження ГТУ, ГПД надбудов і парових турбін малої потужності у комунальних котельнях з метою виробництва електричної енергії;
- обґрунтування доцільності 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 тепlopостачання у ЖКГ.

Об'єкт дослідження – теплові процеси у схемах комунальної теплоенергетики з електрогенеруючими установками малої потужності.

Предмет дослідження – проблеми енергозбереження при встановленні електрогенеруючого устаткування малої потужності на об'єктах комунальної теплоенергетики.

Методи дослідження: аналітичні та розрахункові методи дослідження теплових схем теплогенеруючих підприємств.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

– систематизовано підходи впровадження когенераційних технологій до об'єктів комунальної енергетики;

– виконано оцінку потенціалу та можливостей інтеграції існуючих когенераційних технологій до теплопостачальних підприємств комунальної енергетики;

– вперше (за результатами розрахункових досліджень) оцінено можливість впровадження замкнених паротурбінних циклів на різних робочих тілах з урахуванням фактичних режимів експлуатації комунальних котелень та обрано робоче тіло, що найбільш підходить;

– вперше здійснено узагальнення підходів до вибору електрогенеруючого устаткування при реалізації когенераційних установок на підставі проведення техніко-економічного обґрунтування щодо вдосконалення теплових схем котелень.

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 теплової схеми районної котельні, яке дозволило використовувати відхідні 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 учбовому 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.).

Особистий внесок здобувача полягає у наступному:

– участь у обґрунтуванні доцільності впровадження когенераційних технологій з метою вирішення задачі енергозбереження на об'єктах муніципальної енергетики [1 – 9, 11, 12, 17, 18];

– розв'язання задачі підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів на районних котельнях за рахунок використання теплоти

відхідних димових газів при впровадженні замкнених паротурбінних циклів на низькокиплячих робочих тілах [8, 10, 14, 16];

– аналіз особливостей підключення електрогенеруючих установок малої потужності до існуючої електричної мережі на енергогенеруючих об'єктах комунальних підприємств [7, 15];

– оцінка можливості підвищення ефективності парових котелень шляхом переведення у міні-ТЕЦ при впровадженні протитискових турбін [4, 13, 18];

– порівняльний аналіз та розрахункові дослідження щодо доцільності впровадження ГТУ та ГПД надбудов для комунальних котелень. Вибір технічного рішення на основі визначення техніко-економічних показників реалізації проекту [2].

Апробація результатів дослідження. Матеріали дисертаційної роботи доповідались і обговорювалися на наукових конференціях: I Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы электроэнергетики» (2013 р., г. Алтай); конференції молодих учених та спеціалістів «Сучасні проблеми машинобудування» (2014 р., м. Харків); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (2014 р., м. Харків); XI Международная научно-техническая конференция «Проблемы энергосбережения и пути их решения» (2015 р., м. Харків); XV та XVI Международная научно-техническая конференция «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования» (2015 р., 2017 р., м. Харків); V Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція «Новітні технології в енергетиці» (2015 р., м. Харків).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 18 друкованих робіт, з них 7 статей у спеціалізованих наукових виданнях, затверджених МОН України (1 стаття в журналі, що входить до наукометричної бази Scopus), 1 стаття в іноземному журналі і 6 робіт – матеріали конференцій; додатково результати викладено у 4 роботах (2 – конспекти лекцій та методичні вказівки для підготовки бакалаврів, спеціалістів та магістрів за відповідною тематикою й 2 статті у наукових виданнях).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації складає 194 сторінки, серед них: 134 сторінок основного тексту, 41 рисунок, 19 таблиць, 5 додатків на 25 сторінках, 142 найменування літературних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ включає: обґрунтування актуальності 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 підчас 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. Обґрунтовано розв'язання задачі енергозбереження на теплоенергетичних об'єктах при комбінованому виробництві теплової та електричної енергії із застосуванням ГПД, ПТУ, ГТУ та ORC контуру як сучасних напрямів економії паливно-енергетичних ресурсів у комунальній енергетиці.

Проаналізовано сучасні підходи до підвищення ефективності технологічних процесів виробництва теплової енергії за рахунок утилізації теплоти димових газів. Це дозволить конденсувати частину водяної пари з метою корисного використання як фізичної теплоти димових газів, так і прихованої теплоти конденсації частини водяної пари. Технологія охолодження здійснюється таким чином, щоб температура димових газів перед димососом не була меншою ніж $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. У якості середовища, що нагрівається у теплоутилізаторі може використовуватися вода для потреб хімводопідготовки, повітря, що надходить потім на горіння, або низькокипляче робоче тіло для ORC контуру.

Виконано аналіз літературних джерел з математичного моделювання теплових схем енергетичних установок. Аналіз показав, що ключовим питанням у разі визначення ефективності роботи устаткування і пошуку ефективних компоновок теплової схеми є вдосконалення існуючої математичної моделі енергоустановки, орієнтованої на розв'язання задач вдосконалення структур теплових схем енергоустановок, при врахуванні всіх факторів, що впливають на показники енергоефективності.

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 ІПМаш 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. За результатами проведеного аналізу великої кількості рівнянь стану, обрано

рівняння стану Пенга-Робинсона. Це рівняння є модифікованим рівнянням Ван-дер-Ваальса та має вигляд

$$P = \frac{R \cdot T}{v - b} - \frac{a \cdot \alpha}{v^2 + 2 \cdot b \cdot v - b^2},$$

$$\text{де } a = \frac{0,457235 \cdot R^2 \cdot T_c^2}{P_c};$$

$$b = \frac{0,077796 \cdot R \cdot T_c}{P_c};$$

$$\alpha = \left(1 + m \cdot \left(1 - \sqrt{T/T_c}\right)\right)^2;$$

$$m = 0,37464 + 1,54226 \cdot \omega - 0,26992 \cdot \omega^2,$$

де a , b – деякі константи (тяжіння і відштовхування), що залежать від обраної речовини; P – тиск, Па; v – питомий об'єм, м³/кг; R – газова постійна, Дж/(кг·К);

T – температура, К; α – універсальна функція, що залежить від двох індивідуальних параметрів, що характеризують властивості конкретної рідини: критичної температури T_c і, так званого, ацентричного фактору Пітцера ω .

Врахування термодинамічних властивостей робочих тіл при розрахункових дослідженнях теплових схем енергетичних установок дозволяє моделювати фізичні процеси, що відбуваються у тепловій схемі енергогенеруючого підприємства та її окремих елементах.

В реалізованій математичній моделі енергетичних установок передбачається спосіб внутрішнього опису у вигляді інформаційної моделі (ІМ), що базується на складових об'єктах. В основі ІМ лежить структурний опис енергоустановки, тобто уявлення її у вигляді компонент та зв'язків між ними

$$\bar{G} = (G, P_n),$$

де $G = \langle U, V \rangle$ – складовий об'єкт; $U = \{\alpha_j, j = 1, 2, \dots, n\}$ – безліч інформаційних моделей компонент; $V \subset U \times U$ – зв'язки між інформаційними моделями компонент; P_n – зв'язки між складовими об'єктами.

Математична модель складається з безлічі підмоделей

$$\alpha_j = \langle k_j, B_j, Y_j, \Gamma_j \rangle,$$

де $k_j \in K$ – умовне ім'я компоненти; K – безліч кодів елементів; $B_j = \langle X_1, \dots, X_n \rangle$ – впорядкована безліч фізичних властивостей; $\Gamma_j = \langle P_1, \dots, P_n \rangle$ – впорядкована безліч геометричних властивостей; $Y_j = \langle H_1, \dots, H_n \rangle$ – впорядкована безліч полюсів елемента.

З метою визначення доцільності впровадження енергозберігаючих заходів на об'єктах комунальної енергетики виконується техніко-економічне обґрунтування, 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

$$\tau_{ок} = c_N \cdot N'_e / (\tau \cdot \Delta B_{год}),$$

де N'_e – номінальна електрична потужність;

c_N – питома вартість встановленої електричної потужності;

τ – річне напрацювання установки;

$\Delta B_{год}$ – зміна витрат на ТЕЦ за годину після встановлення установки, яка розраховувалася таким чином

$$\Delta B_{год} = \sum_{j=1}^2 (\tau_j / (\tau_1 + \tau_2)) \{ (c_{e.m} - c_{e.T}) [N_{e.j} + (N_{e.T.j} - N_{e.j}) (1 - \Delta c_m)] + Q_{T.j} (1 - \Delta C_{Q.j}) c_{Q.j} \},$$

де j – індекс сезону (літо $j = 1$; зима $j = 2$);

$c_{e.m}$ – ціна електроенергії 2 класу в мережі без ПДВ;

$c_{e.T}$ – собівартість виробництва електроенергії на ТЕЦ;

$N_{e.T.j}$ – генерація електричної потужності турбіною в обраний сезон за вирахуванням власних потреб турбіни;

$N_{e.j}$ – потреби на котельні в електричній потужності в обраний сезон;

Δc_m – частка ціни електроенергії, що дістається електромережі за послуги;

$\Delta C_{Q.j}$ – частка підвищення витрат на виробництво теплоти після встановлення турбіни;

$c_{Q.j}$ – собівартість виробництва теплоти на ТЕЦ з використанням турбіни в обраний сезон;

$Q_{T.1} = Q_{T.2} = 27$ Гкал/год – кількість теплоти, що отримується з вихлопу турбіни.

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 (рис. 1, 2).

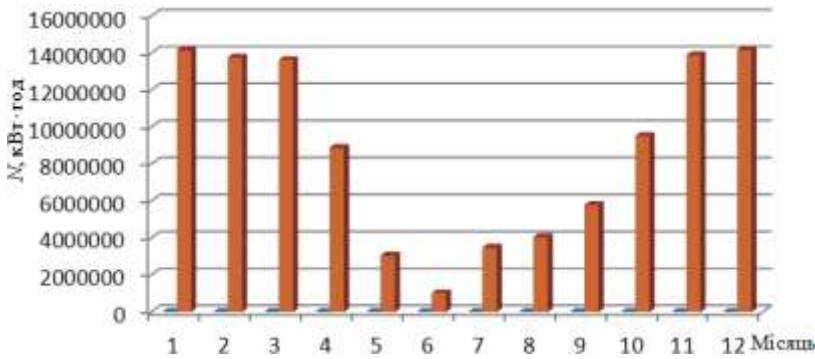


Рис. 1. Динаміка помісячного споживання електроенергії

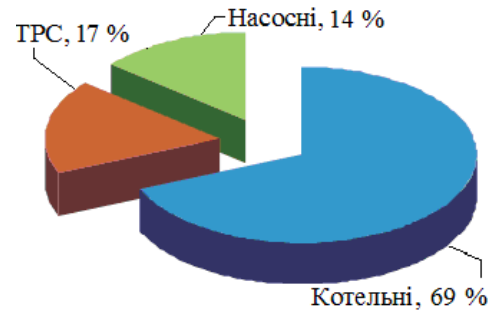


Рис. 2. Розподіл споживання електроенергії

З представленої діаграми видно, що найбільшими споживачами електроенергії є котельні. Саме тому необхідно розглядати насамперед їх.

Слід зазначити, що в загальній сумі спожитої електроенергії понад 100 млн кВт·год на рік, частка великих котельень: по вул. Шекспіра, 17, вул. Проскури, 1, вул. Костичева, 2/1, пр-т Московський, 275 (ТЕЦ-4) та вул. Жовтневої революції, 99 складає більше 40 % (рис. 3).

На підставі викладеного, найбільш доцільним є вирішення задачі енергозбереження при впровадженні принципів когенерації на найбільш великих (потужних) котельнях. На основі отриманих даних від КП «ХТМ» проведено аналіз технічного стану та режимів роботи енергетичного обладнання індивідуально кожної котельні.

У якості прикладу наведено показники роботи котельні Комінтернівського району по вул. Костичева, 2/1, яка відноситься до КП «ХТМ».

На котельні Комінтернівського району по вул. Костичева, 2/1 встановлено 4 котли ПТВМ-100 з ККД – 91 %. Питомі норми витрати енергоносіїв:

- паливо – фактичний – 155,91 кг у.п./Гкал при затвердженому 159,5 кг у.п./Гкал;
- електроенергія – фактичний – 24,0 кВт/Гкал при затвердженої 29,3 кВт/Гкал.

В даний час сумарне приєднане навантаження складає 277,392 Гкал/год, у тому числі: опалення та вентиляція – 161,566 та гаряче водопостачання (ГВП) – 115,828 Гкал/год. Основним споживачем є населення, частка якого становить 83 % в опаленні та 94 % в гарячому водопостачанні.

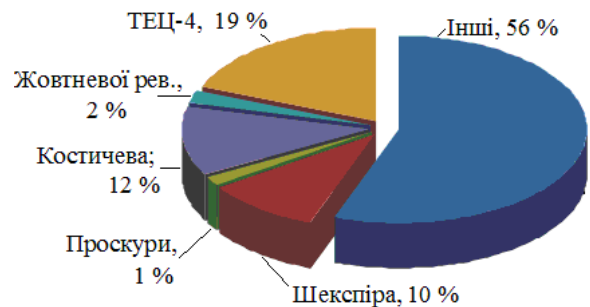


Рис. 3. Діаграма співвідношення споживання електроенергії котельнями КП «ХТМ»

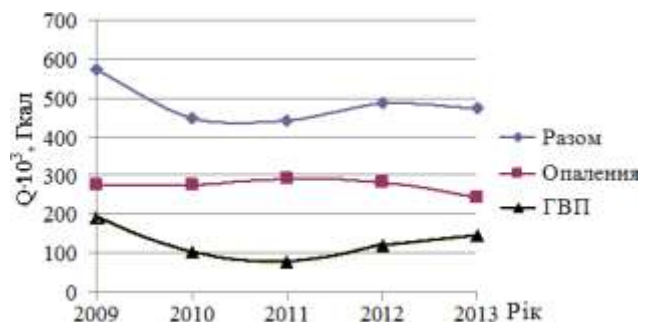


Рис. 4. Динаміка виробництва теплоенергії за видами

На підставі поданих підприємством даних проведено аналіз динаміки виробництва теплоенергії за період 2009 – 2013 роки (рис. 4). Як видно з графіка (рис. 4), в останні роки має міст тенденція зниження обсягів виробництва, що в першу чергу, пов'язано зі зростанням середньої температури опалювального періоду та скороченням кількості діб. Слід також зазначити, що обсяг з ГВП знижується в порівнянні з 2009 р. Це пов'язане з підвищенням цін і встановленням лічильників у споживачів.

Зв'язок між обсягом виробництва теплоенергії та температурою зовнішнього повітря можна простежити на підставі середньомісячних значень температур. Як приклад, взято дані виробництва теплоенергії на опалення в залежності від градусоднів за січень-квітень 2014 року (рис. 5).

З графіку видно, що має місце пряма залежність виробництва теплоенергії від температури навколишнього середовища при порівнянні місячних показників.

Ефективність роботи енергетичного устаткування оцінюється значенням питомої витрати електроенергії на котельні при виробництві теплоти (рис. 6).

Питома витрата електроенергії розраховується на відпущену теплоенергію і залежить від втрат у мережах, стану обладнання та ін. Як видно з графіку (рис. 6), в літній період, незважаючи на зниження вироблення теплоенергії (забезпечення ГВП), питома витрата електроенергії збільшилася.

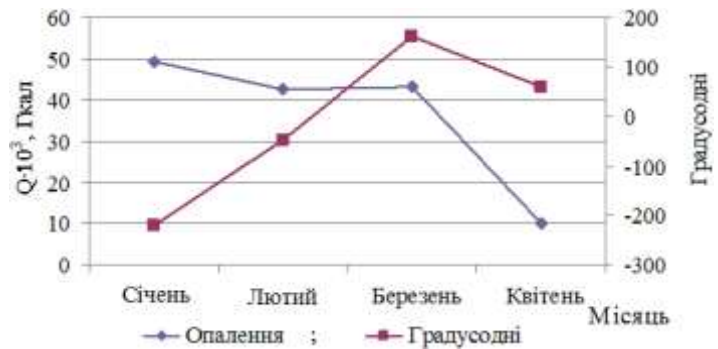


Рис. 5. Зв'язок між градусоднями та виробленням теплоти на опалення

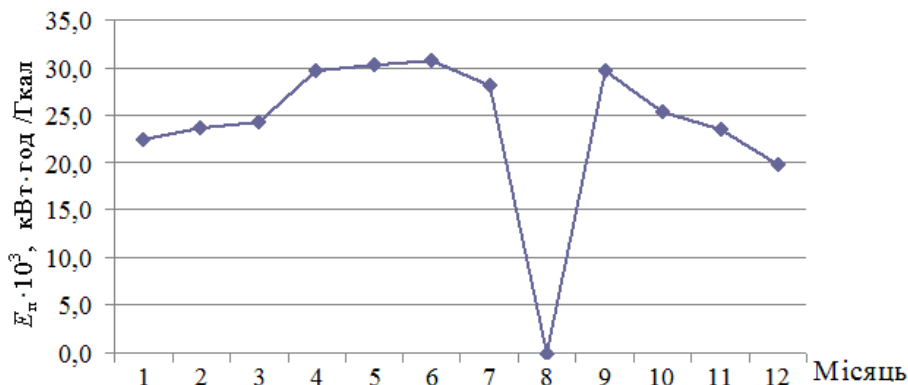


Рис. 6. Динаміка питомої витрати електроенергії за рік

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 ГТУ та ГПД 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. Фактичні ж умови роботи двигунів можуть істотно відрізнятись від стандартних. Порівняння ГТУ та ГПД у складі міні-ТЕЦ показали, що встановлення газових турбін можливе на об'єктах, які мають електричні навантаження більше 14 – 15 МВт. Але через високі витрати газу, турбіни, що рекомендуються для електростанцій, набагато більшої потужності (від 50 МВт) зі стаціонарним електричним та тепловим навантаженням.

Переведення котельні у міні-ТЕЦ дозволяє повністю відмовитися від зовнішнього електропостачання, але необхідно зважувати всі ризики, що виникають при цьому (аварійні ситуації, відсутність палива та ін.).

Для ЖКГ важливим фактором при виборі електрогенеруючих установок служить ступень завантаженості протягом року, яке змінюється залежно від пори року.

В результаті аналізу п'яти котелень м. Харкова бачимо, що споживання електроенергії в літній та зимовий періоди відрізняється у 2 – 2,5 рази, що говорить про доцільність встановлення двох електрогенеруючих установок. Це дасть можливість працювати двом установкам у зимову пору року, а в літній період (при найменшому навантаженні) один з агрегатів зупинити, що забезпечить максимальну економічність двигуна. Виходячи зі сказаного, найбільш раціональним для котелень, що розглядаються, доцільно використовувати ГПД.

Для оцінки економічної доцільності переведення котельні в розряд міні-ТЕЦ шляхом впровадження ГТУ, 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 ГПД 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. Для двигуна «MWM» термін роботи до капітального

ремонту складає 80 тис. годин та списання – 240 тис. годин, у той час як для установок «Caterpillar» і «MAN Diesel & Turbo» – 45 тис. годин і 50 тис. годин, 180 тис. годин і 200 тис. годин, відповідно. Причому вартості розглянутих комплексів ГПД та капіталовкладення в проект розширення ТЕЦ близькі і становлять: «MWM» – 10040 тис. грн, «Caterpillar» – 10100 тис. грн, «MAN Diesel & Turbo» – 10300 тис. грн. Для енергетичних установок цих виробників проведено розрахункові дослідження з визначення термінів окупності реалізації проекту (табл. 1).

Таблиця 1. Розрахунок техніко-економічних показників проекту розширення котельні (вул. Академіка Проскури, 1) з установкою ГПД надбудови

Режим роботи котельні	До розширення котельні		Після розширення котельні					
			"MWM"		"MAN"		"Caterpillar"	
	На гаряче водопостачання	На опалення та гаряче водопостачання	На гаряче водопостачання	На опалення та гаряче водопостачання	На гаряче водопостачання	На опалення та гаряче водопостачання	На гаряче водопостачання	На опалення та гаряче водопостачання
Пора року	літо	зима	літо	зима	літо	зима	літо	зима
Природний газ	Параметри палива							
Середня ціна газу, грн/тис. м ³ (без ПДВ)	1387	1387	1387	1387	1387	1387	1387	1387
Електрична потужність споживання, кВт	800	800	250	800	250	800	250	800
Сумарне вироблення теплоти на котельні (відпуск споживачам), Гкал/год	4,2	33,9	4,2	33,9	4,2	33,9	4,2	33,9
Відпускна ціна теплоти без ПДВ для населення, грн/Гкал	312,08	312,08	312,08	312,08	312,08	312,08	312,08	312,08
Відпускна ціна теплоти без ПДВ для бізнесу, грн/Гкал	965,5	965,5	965,5	965,5	965,5	965,5	965,5	965,5
Ціна купівлі електроенергії 2 кл. з мережі без ПДВ, грн/(кВт·год)	1,1861	1,1861	1,1861	1,1861	1,1861	1,1861	1,1861	1,1861
Електрична потужність ГПД станції, кВт	–	–	250	800	250	800	250	790
Собівартість електроенергії, грн/(кВт·год)	0,0	0,0	0,374	0,231	0,337	0,218	0,346	0,225
Сумарні витрати на ГПД станції, тис. грн/міс	–	–	141,5	280,5	152,2	314,7	153,0	314,3
Собівартість теплоти від ГПД, грн/Гкал	–	–	507,0	314,1	457,0	295,3	469,1	305,0
Середня сума щомісячних витрат по котельному цеху, тис. грн/міс	261	1255	210	697	210	697	210	697
Витрати на паливо в місяць, тис. грн/міс	563,1	4526,3	534,5	4434,9	522,9	4397,9	525,1	4406,4
Собівартість теплоти від котлів, грн/Гкал	196,2	170,4	209,3	159,7	208,3	159,4	208,6	159,5
Місячні витрати на котельні, тис. грн/міс	823,7	5781,3	838	5318	817	5269	821	5281
Фінансові показники котельні за місяць, тис. грн/міс	334	3575	266	3865	264	3843	264	3847
Собівартість теплоти на ТЕЦ, грн/Гкал	196	170	223	163	225	163	225	163
Наведена відпускна ціна теплоти, грн/Гкал	377	377	377	377	377	377	377	377
Прибуток за сезон від виробітку електроенергії власного споживання, тис. грн	0	0	839	3536	877	3587	868	3561
Прибуток за сезон від продажу теплоти, тис. грн	2634	28490	2092	29902	2064	29819	2060	29805
Прибуток за рік, тис. грн	31124		36470		36448		36379	
Капіталовкладення, тис. грн	–		10040		10100		10300	
Простий термін окупності, рік	–		1,9		1,9		2,0	

Розрахунки виконано за умови, що 90 % природного газу закуповується згідно тарифів для населення. Різниця у собівартості електроенергії незначна

та визначається економічною ефективністю теплових процесів, а також співвідношенням розподілу витрат на виробництво електроенергії та теплоти.

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

- загальні інвестиції на реалізацію проекту на базі двох ГПД складають в середньому $\sim 10,2$ млн грн (~ 1000 дол. США за встановлений 1 кВт), що пов'язано з наближено однаковою потужністю розглянутих установок;

- економічна ефективність роботи міні-ТЕЦ в цілому залежить від завантаженості в літній період, що визначається тепловим навантаження та вартістю теплоносіїв.

При існуючих цінах: «промисловий» природний газ 5005 грн/тис. м³, електроенергія в мережі 1,1861 грн/(кВт·год), «для населення» природний газ 985 грн/тис. м³, ПГУ на базі двох TCG 2016 V08 C в зимовий період дозволить на реалізованій міні-ТЕЦ покривати потужність ~ 800 кВт електричної енергії при собівартості 0,231 грн/(кВт·год) і отримати прибуток за зимовий сезон від виробництва електроенергії власного споживання в розмірі 3586 тис. грн. Термін окупності при цьому складе 1,9 року.

Таким чином, за результатами проведених розрахункових досліджень показано, що ефективність роботи створеної міні-ТЕЦ з надбудовами ГПД фірм «MWM», «MAN» та «Caterpillar» відрізняється не істотно.

В п'ятому розділі представлено результати дослідження доцільності 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 редуційно-охолоджувальній 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 витрат 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. Загальний обсяг пари, що виробляється 3-ма паровими котлами – до 200 т/год (два НЛЗ 60/85 по 60 т/год, один ДЕМ-105 до 80 т/год), з параметрами $P_0 = 1,6$ МПа, $t_0 = 350$ °С. На котельні також встановлено водогрійні котли: один ПТВ-100, два ПТВМ-100 та два ПТВМ-180. Електрична потужність власних потреб котельні $\sim 4,07$ МВт в опалювальний період (максимальна добова витрата електроенергії в січні 2013 р. 97654 кВт·год); влітку 1,77 МВт (максимальна добова витрата електроенергії в цей період у 2013 р. ~ 42541 кВт·год).

Результати розрахунку характеристик варіантів оцінки можливості встановлення у котельні парових турбін (в залежності від вартості палива) з протитиском наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Результати розрахунку технічних показників парової турбіни з протитиском, що може бути встановлено на ТЕЦ-4 (м. Харків)

Варіанти	1		2	3	
	Літо	Зима мах	Літо	Літо	Зима мах
Навантаження на турбіну	73%	100%	100%	41%	100%
Параметри пари на вході турбіни:					
- тиск, МПа	1,6				
- температура, °С	350				
Витрати пари через турбіну, кг/с	5,00	6,88	15,88	16,03	38,89
Частка електроенергії на власні потреби	0,03				
Електрична потужність турбіни, що відпускається, МВт	1,77	4,07	5,48	3,74	13,22
Електричний ККД циклу	0,125	0,126	0,126	0,122	0,128
Температура зворотної води, °С	50				
Тепломіст конденсату, що потрапляє у деаератор, кДж/кг	180,1				
Параметри живильної води:					
- тиск, МПа	0,7				
- температура, °С	165				
Кількість теплоти, що отримана з вихлопу турбіни, Гкал/год	9,58	12,73	29,36	20,84	70,09
Втрати теплоти	0,05				
Кількість теплоти, що відпущена споживачам, Гкал/год	8,81	20,19	27,00	19,17	64,49
Питома витрата умовного палива:					
- на відпущення теплоти бруто, кг у.т./Гкал	244,9	244,9	244,9	245,0	244,9
- на виробництво електроенергії бруто, г у.п./кВт	193,8	193,7	193,7	193,8	193,7

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 ГВП 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. Принципову теплову схему підключення парової турбіни з протитиском наведено на рис. 7.

За результатами розрахункових досліджень отримано:

– перший варіант забезпечення турбіною Р-4-1,6/0,2 електричною потужністю 4 МВт з параметрами пари на вході 1,6 МПа, 350 °С з протитиском 0,2 МПа. В зимовий період турбіна працює на повному навантаженні, а влітку з частковим навантаженням (73 % номіналу) забезпечити власні потреби котельні в електричній потужності (1,77 МВт) проблематично, тому що мінімальний режим ефективної роботи котла зазвичай складає 30 % витрат, тобто 18 т/год для котла НЛЗ. При витраті пари на турбіну 19,6 т/год генерується 1,81 МВт електричної потужності, та споживачам відпускається 8,81 Гкал/год теплоти на ГВП. Необхідний(до 27 Гкал/год) доробок теплоти на ГВП при цьому складає 18,19 Гкал/год він менше ніж мінімальне припустиме навантаження котла ПТВМ-100 (25 % потужності складе 25 Гкал/год). Таким чином, варіант 1 встановлення турбіни на котельні, що розглядається, хоча і потребує, відносно варіантів 2 та 3, менших інвестицій, але недоцільний до реалізації;

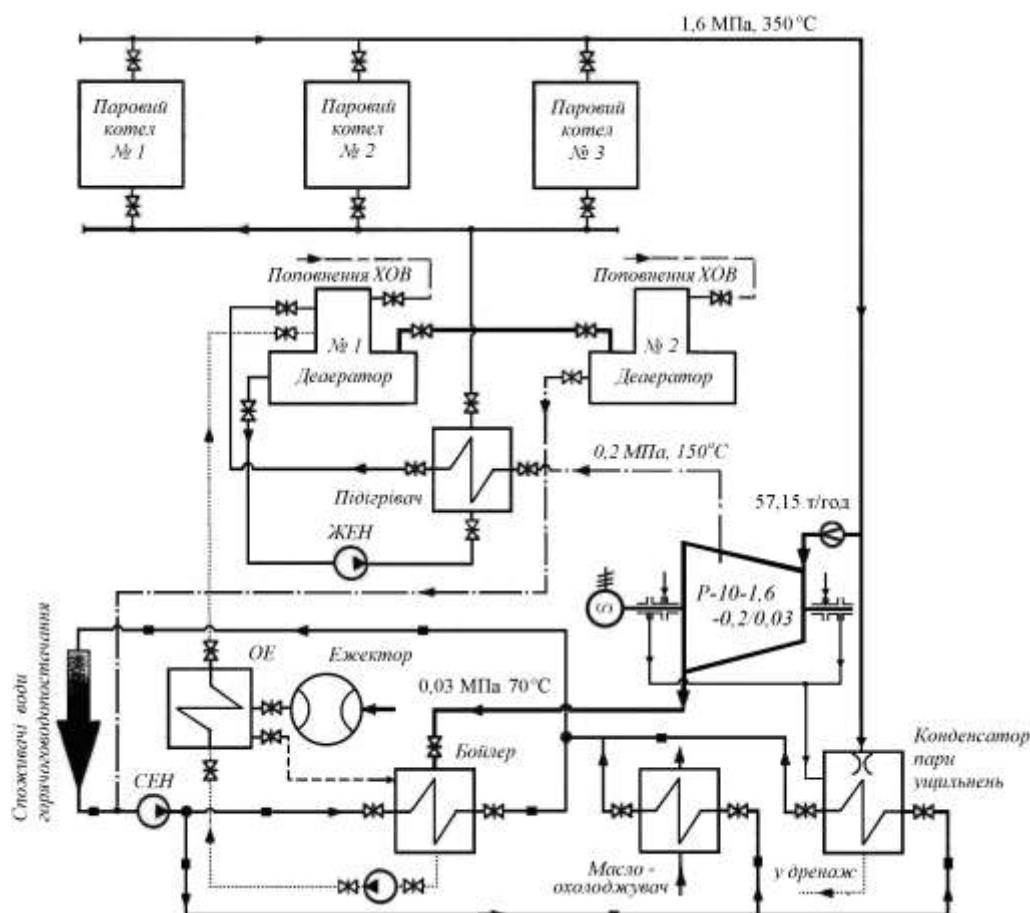


Рис. 7. Принципова тепла схема включення на котельні парової турбіни з протитиском 0,03 МПа: СЕН – сільовий електричний насос; ЖЕН – живильний електричний насос; ОЕ – охолоджувач ежектора; ХОВ – хімічно очищена вода

– другий варіант реалізація турбіни Р-6-1,6/0,2 номінальною електричною потужністю 6 МВт з такими ж параметрами, як і перший. Номінальна витрата пари 62 т/год. Витрата пари на вході в турбіну 58,55 т/год забезпечує відправлення з котельні влітку 27 Гкал/год води на ГВП з температурою 68 °С (витрата пара 11,39 т/год у відбір забезпечує підігрів живильної води до 165 °С), при цьому генерується 5,65 МВт електричної потужності. Необхідна витрата пари на турбіну влітку забезпечується будь-яким з котлів котельні (або котел НЛЗ 60/85 працює з навантаженням близьким до номінального, або котел ДЕМ-105 з 72 % навантаженням). В опалювальний період турбіна Р-6-1,6/0,2 може працювати з таким же навантаженням, як і влітку. Надлишки електроенергії (взимку ~1,4 МВт, влітку ~3,7 МВт) можливо продавати в мережу, або, користуючись послугами мережі, направляти їх своїм користувачам – тепловим пунктам (іншим філіям);

– третій варіант – встановлення турбіни Р-14-1,6/0,2 електричною потужністю 14 МВт с протитиском 0,2 МПа. Витрата пари на вході в турбіну 140 т/год (працюють два котли) з параметрами 1,6 МПа, 350 °С. Турбіна Р-14-1,6/0,2 влітку працює на частковому навантаженні (43 % витрати), забезпечує відправлення з котельні у літній період 27 Гкал/год води з температурою 68 °С на ГВП (витрата пари 11,26 т/год у відбір забезпечує підігрів живильної води котла до 165 °С), при цьому генерується 5,44 МВт електричної потужності.

Генерація електричної потужності, у цьому разі, менша ніж у аналогічному випадку 2 варіанту за рахунок того, що турбіна Р-14-1,6/0,2 влітку працює на навантаженні 43 % з меншим внутрішнім ККД. В опалювальний період турбіна Р-14-1,6/0,2 працює з витратою до 140 т/год пари при цьому генерується до 13,6 МВт електричної потужності. В бойлері до оборотної води підводиться 66,1 Гкал/год теплоти. Оскільки влітку турбіна Р-14-1,6/0,2 працює з частковою генерацією, то термін окупності відповідного проекту буде досить великий.

За результатами проведених розрахункових досліджень та аналізу отриманих результатів виявлено, що найбільш раціональним буде варіант встановлення турбіни Р-6-1,6/0,2, для якого представлені результати розрахунку техніко-економічних показників у табл. 3.

Таблиця 3. Результати розрахунку ТЕП парової турбіни Р-6-1,6/0,2 (варіант 2), що може бути встановлена на ТЕЦ-4 (м. Харків, КП «ХТМ»)

Параметри	1 варіант	2 варіант	3 варіант
Номинальна потужність турбіни, кВт	6000		
Теплотворна здатність природного газу, кДж/м ³	34408,8(8219 ккал/м ³)		
Витрата природного газу, тис.м ³ /год	5,252		
Кількість теплоти, яка підведена в котлі, кВт	44677		
Витрата умовного палива, т у.п./год	7708,2		
Питома витрата умовного палива	7523,3		
- на виробіток електроенергії бруто, г у.п./(кВт·год)	193,7		
Витрата пари, кг/с	16,26		
Комерційна ціна природного газу без ПДВ, грн/тис. м ³	6160		
Ціна природного газу для населення з ПДВ, грн/тис.м ³	1182	2383	3840
Середня ціна природного газу без ПДВ, грн/тис.м ³	1761	2612	3644
Середня ціна умовного палива, грн/тис.м ³	1200	1779,7	2483
Вартість природного газу, грн/год	9250	13718	19138
Сумарні витрати за годину на ТЕЦ, грн/год	11563	17148	22516
Собівартість електроенергії, грн/кВт·год	0,341	0,505	0,663
Кількість теплоти, що відпускається з турбіни, Гкал/год	27		
Собівартість теплоти від турбіни, грн/Гкал	359,2	532,7	699,4
Сумарна річна зміна витрат, тис. грн/рік	28450	23412	14843
- зміна витрат за літо, тис. грн	17275	13915	10685
- зміна витрат за опалювальний сезон, тис. грн	18932	15250	11711
- зміна витрат від подорожання теплоти влітку, тис. грн	-3879	-5753	-7553
- зміна витрат від подорожання теплоти взимку, тис. грн	-3879	-5753	-7553
Сумарні інвестиції, тис. грн	86400		
Простий термін окупності, год	3,0	3,7	5,8

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновки, що питома витрата умовного палива на вироблення теплоти бруто в розглянутому випадку через більш низькі параметри пари, виробленої котлами на ТЕЦ-4, і низького ККД парових котлів порівняно з водогрійними становить ~244,9 кг у.п./Гкал (хоча він достатньо сильно відрізняється від даних ТЕЦ-4 до установки турбіни 156 кг у.п./Гкал). Питома ж витрата умовного палива на вироблення електроенергії ~193,7 г у.п./(кВт·год) відчутно менше ніж 320 г у.п./(кВт·год) – показник, який досягається при генерації з використанням

турбін К-300-240. Це свідчить про високу ефективність процесу вироблення електричної енергії з природного газу, який запропоновано.

Розрахунки показали, що надлишок електричної потужності, що буде генеруватися на ТЕЦ-4 після встановлення турбіни Р-6-1,6/0,2, складе взимку ~1,4 МВт, влітку ~3,7 МВт. Його можливо продавати до мережі, або, користуючись послугами мережі, направляти своїм користувачам – тепловим пунктам (іншим філіям). Турбіна влітку і взимку може працювати в одному режимі.

Предметом розгляду в шостому розділі є оцінка можливості реалізації турбоустановок на низькокиплячих робочих тілах (НРТ) при використанні теплоти димових газів, що дозволить виробляти електричну енергію без додаткового палива.

Проведено аналіз НРТ та обрано з них, які найбільш повно відповідають термодинамічним, експлуатаційним, економічним та екологічним вимогам (табл. 4).

Таблиця 4. Основні властивості хладонів

Хладон	Формула	Молярна маса, г/моль	$T_{\text{кип}}^1$, °C	$T_{\text{кр}}^2$, °C	$P_{\text{кр}}^2$, МПа	ОРП ³⁾ (ODP)	ППП ⁴⁾ (GWP)	Вартість за 1 кг, грн
R134a	CF ₂ HCHF ₂	102,03	-22,5	101,10	4,07	0	1300	145
R142b	CH ₃ -CClF ₂	100,5	-10,01	137,05	4,12	0,06	2000	100
R600	C ₄ H ₁₀	58,12	-0,51	152,0	3,8	0	3	147
R600a	C ₄ H ₁₀	58,12	-11,79	134,83	3,65	0	3	165

1) Температура кипіння.

2) Значення параметрів в критичній точці.

3) ОРП – озоноруйнуючий потенціал.

4) ППП – потенціал глобального потепління.

Проведено розрахункові дослідження з визначення потужності паротурбінного циклу для обраних робочих тіл на прикладі утилізації теплоти димових газів котельного агрегату ПТВМ-100. Згідно паспортних даних навантаження котла змінюється у широкому діапазоні (табл. 5). В залежності від температури відхідних газів на рис. 8 та 9 наведено показники ефективності установки на НРТ.

Таблиця 5. Константи при розрахунку теплової схеми ORC контуру

Параметр	Навантаження котла, %					
	25	30	40	60	80	100
Температура димових газів до НРТ ТВ ¹⁾ , °C	90	94	102	119	135	150
Витрата димових газів, м ³ /с	15,37	19,27	23,28	32,45	50,66	70,03
Температура робочого тіла на вході в турбіну, °C	85	90	98	115	125-130	125-145
Температура охолоджуючої води на вході в ТК ²⁾ НРТ, °C	40	40	40	40	40	40

1) ТВ – теплообмінник-випарник.

2) ТК – теплообмінник-конденсатор.

З результатів представлених на рис. 8 і 9 видно, що при збільшенні початкових параметрів робочого тіла збільшується ККД ORC циклу. Проведені

розрахункові дослідження показали, що при однаковій кількості підведеної теплоти електрична потужність установки в залежності від застосовуваного робочого тіла і кількості скидної теплоти в середньому відрізняється на 10 %.

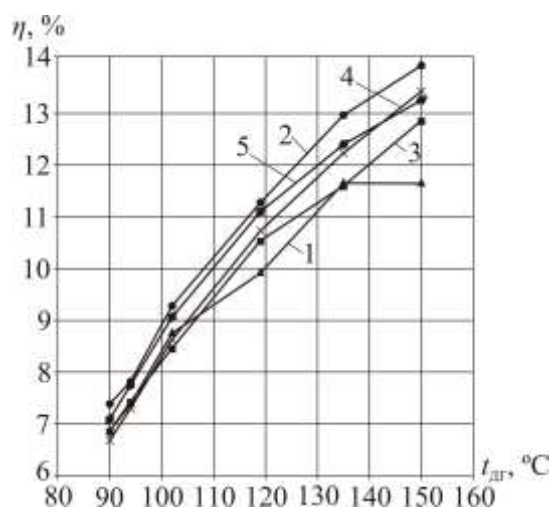


Рис. 8. Електричний ККД ORC циклу в залежності від ступеня завантаженості котла (без обліку наявності парів води в ДГ): 1 – R134a; 2 – R142b; 3 – R152a; 4 – R600; 5 – R600a

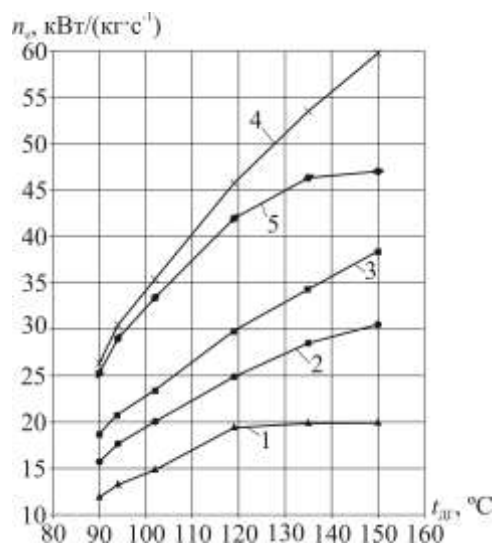


Рис. 9. Питома електрична потужність ORC циклу (без обліку наявності парів води в ДГ): 1 – R134a; 2 – R142b; 3 – R152a; 4 – R600; 5 – R600a

Отримані результати (рис. 8 та 9) є універсальними та можуть бути використані для інших джерел теплоти малого потенціалу.

Також виконано дослідження впровадження ORC технології на водогрійній котельні з урахуванням режимних карт експлуатації котельного устаткування. У якості прикладу наведено котельню Комінтернівського району КП «ХТМ» (вул. Костичева, 2/1, м. Харків).

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 відхідних газів не вище 117 °C. 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 відхідних димових газів, температура яких становить 100 – 105 °C. Реалізація ORC контуру може дозволити отримати ~600 кВт корисної електричної потужності;

- використання частини теплоти від сітьової води. Температура сітьової води на опалення в зимовий період становить 100 °C. Реалізація ORC контуру в цьому випадку дозволить отримати ~730 кВт (30 % власних потреб котельні у зимовий період) корисної електричної потужності шляхом використання

частини теплоти нагрітої сітьової води, при цьому частина теплоти НРТ повертається зворотній сітьовій воді.

– комплексне використання теплоти відхідних газів та сітьової води. Це може дозволити отримати електричну потужність установки близько 1900 кВт, що значно більше, ніж при окремому використанні теплоти димових газів або сітьової води та дозволить покрити більше 70 % власних потреб (рис. 10).

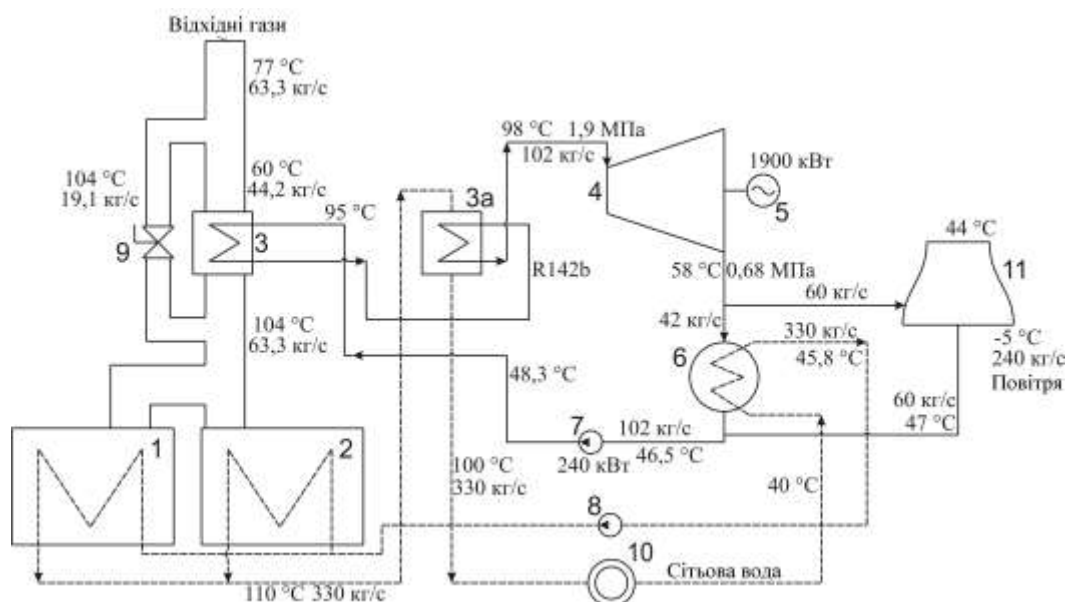


Рис. 10. Теплова схема ОРС циклу при нагріванні НРТ сітьовою водою та димовими газами: 1 – котел № 1; 2 – котел № 2; 3 – теплообмінник-випарник НРТ (відхідні гази – НРТ); 3а – теплообмінник-випарник НРТ (сітьова вода – НРТ); 4 – турбіна НРТ; 5 – електричний генератор; 6 – теплообмінник-конденсатор НРТ; 7 – конденсаційний насос; 8 – циркуляційний насос; 9 – регулюючий шибер димових газів; 10 – споживач теплоти; 11 – градирня

Також проведено розрахункові дослідження та аналіз можливої отримуваної електричної потужності при роботі котельні у літній період. Теплове навантаження котельні, що розглядається, у літній період становить 25 Гкал/год (гаряче водопостачання), при цьому електрична потужність і ККД НРТ турбіни складуть 85 кВт та ~6,5 %, відповідно. Але при цьому паротурбінний цикл працюватиме на протязі усього року, що підвищить його економічну ефективність.

ВИСНОВКИ

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

2. Пропонується такий підхід вдосконалення теплогенеруючих підприємств, як реконструкція котельень у міні-ТЕЦ при встановленні сучасних ГПД, ГТУ та ПТУ малої потужності, а також використанні замкнених паротурбінних циклів на НРТ. Виконано аналіз технічної можливості

та економічної доцільності реалізації ПТУ, ГТУ або ГПД, що дозволило обрати найбільш доцільне та раціональне рішення.

3. Виконано порівняльний аналіз впровадження ГПД та ГТУ при переведенні котелень у режим когенерації. Визначено, що найбільш доцільним для об'єктів комунальної енергетики України є використання газопоршневих двигунів. На підставі цього проаналізовано ряд ГПД різних виробників. Рішення задачі виробництва власної електричної енергії на котельнях з підвищенням їх техніко-економічних показників передбачає здійснення організації надбудови у вигляді декількох енергетичних газопоршневих двигунів сумарною потужністю $\sim 0,8 - 4,0$ МВт. Така міні-ТЕЦ зможе ефективно працювати у широкому діапазоні змінних режимів з незначною зміною теплового ККД.

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

Проведені розрахунки підтвердили доцільність встановлення на котельнях (на прикладі ТЕЦ-4, КП «ХТМ», м. Харкова), які у своєму складі мають парові котли парової турбіни з протитиском для когенерації. При ціні газу для населення 2383 грн/тис.м³ термін окупності складе 3,7 року. Надлишок електричної потужності, що буде генеруватися на ТЕЦ-4 після впровадження когенерації, складе взимку $\sim 1,4$ МВт, влітку $\sim 3,7$ МВт та може реалізовуватися до електричної мережі, або, направлятися своїм користувачам – тепловим пунктам (іншим філіям).

5. Вирішено задачу підвищення ефективності використання теплоти димових газів для виробництва електричної енергії на основі реалізації замкнених паротурбінних циклів на НРТ. Проведено оцінку теплової потужності та параметрів скидної теплоти при виробництві теплової енергії на об'єктах комунальної енергетики. Виконано вибір найбільш раціонального низькокиплячого робочого тіла. Визначено параметри та режими роботи замкненого паротурбінного циклу. Отримано, що при максимальному навантаженні водогрійного котла ПТВМ-100, та повному використанні теплоти димових газів, електрична потужність установки на НРТ може сягати ~ 2900 кВт. Результати розрахункових досліджень показали, що найбільш доцільним буде впровадження замкненого паротурбінного циклу на НРТ електричною потужністю ~ 100 кВт. На сучасному етапі розвитку таких циклів доцільним є вибір варіанту, який дозволить покривати власні потреби котельні у електричній енергії на рівні 5 – 10 % без додаткового спалювання палива.

6. Подані в дисертаційній роботі рекомендації щодо енергозбереження на об'єктах комунальної енергетики передані підприємству КП «Харківські теплові мережі». Результати дисертаційної роботи використані в учбовому 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.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Малярєнко В.А., Шубєнко А.Л., Сенєцький А.В., Темнохуд І.А. (Казарова І.А.) Потєнциал интеграції когенєраційних систем в малу енергетику України // Інтегровані технології та енергозбереження. НТУ «ХПІ»: сб. наук. пр. Харків: НТУ «ХПІ», 2012. № 4. С. 11-17. ISSN 2078-5364.
2. Малярєнко В.А., Шубєнко А.Л., Сенєцький А.В., Темнохуд І.А. (Казарова І.А.). Тєнденції модернізації об'єктів малої енергетики на базє когенєрації // Ползуновський вєстник, 2013. № 43. С. 131-137. ISSN 2072-8921.
3. Малярєнко В.А., Темнохуд І.А. (Казарова І.А.), Сенєцький А.В., Петров А.Ю. Перевод котельних в режим когенєрації путем вєдрєння турбін малої потєнності // Проблєми енергозабезпєчення та енергозбереження в АПК України. Технічні науки. Вісник НТУСГ. Харків: ХНТУСГ, 2014. № 153. С. 110-111. ISBN 5-7987-0176X.
4. Андрєєв С.Ю., Малярєнко В.А., Темнохуд І.О. (Казарова І.О.), Немировський І.А. Когенєрація у муніципальній енергетиці // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит, 2015. № 2(133). С. 15-24. ISSN 2218-1849.
5. Андрєєв С.Ю., Малярєнко В.А., Темнохуд І.О. (Казарова І.О.), Шубєнко О.Л., Бабак М.Ю., Сенєцький О.В. Дослідження перспектив впровадження когенєраційних технологій в комунальній енергетиці України // Східно-Європейський журнал передових технологій, 2015. № 8 (74). Т. 2. С. 11-17. ISSN 1729-3774.
6. Андрєєв С.Ю., Малярєнко В.А., Темнохуд І.О. (Казарова І.О.), Сенєцький О.В. Можливості підвищення енергоефективності теплових мереж шляхом впровадження когенєрації // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ»: Зб. наук. праць. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. № 17(1126). С. 147-155. ISSN 2078-774X.
7. Темнохуд І.О. (Казарова І.О.). Електротехнічна структура перетворєння котельні в Міні-ТЕЦ // Комунальне господарство міст, 2015. № 121. С. 90-94. ISSN 0869-1231.
8. Андрєєв С.Ю., Малярєнко В.А., Шубєнко О.Л., Бабак М.Ю., Сенєцький О.В., Темнохуд І.О. (Казарова І.О.). Когенєрація у водогрійних котельнях з котлами ПТВМ-100 при використанні органічного циклу Рєнкіна // Інтегровані технології та енергозбереження. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 2. С. 48-60. ISSN 2078-5364.
9. Малярєнко В.А., Темнохуд І.О. (Казарова І.О.), Темнохуд О.О. Комунальна енергетика України: проблемі, шляхи розвитку // Проблєми енергозабезпєчення та енергозбереження в АПК України. Технічні науки. Вісник НТУСГ. Харків: ХНТУСГ, 2015. № 164. С. 138-140. ISBN 5-7987-0176X.
10. Андрєєв С.Ю., Малярєнко В.А., Шубєнко А.Л., Бабак Н.Ю., Сенєцький А.В., Темнохуд І.А. (Казарова І.А.). Когенєрація в котельних на основє органічного циклу Рєнкіна // Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура. Харків: ХНУМГ, 2016. № 130. С. 55-64. ISSN 0869-1231.
11. Малярєнко В.А., Галєтич І.К., Темнохуд І.О. (Казарова І.О.). Нетрадиційні джерела енергії Харківщини: стан, проблемі, перспективи //

Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Міжнародна наук.-техн. конф., СевНТУ, 2012. С. 178-179.

12. Маляренко В.А., Шубенко А.Л., Сенецкий А.В., Темнохуд И.А. (Казарова И.А.). Когенерация – реальный путь повышения энергоэффективности малой энергетики // Современные проблемы электроэнергетики. Алтай-2013: I Междунар. науч.-технич. конф., 28 ноября 2013 г.: Сб. статей. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. С. 76-78. ISBN 978-5-7568-1013-4.

13. Темнохуд И.А. (Казарова И.А.), Сенецкий А.В. Эффективность модернизации паровых котелен в мини-ТЭЦ путем реализации когенерационных технологий В 5 ч. Ч. 1. Проблемы энергообеспечения и энергосбережения // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: 9-я Международная науч.-технич. конф., 21-22 мая 2014 г.: Труды. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2014. С 221-225. ISBN 978-5-903413-13-3.

14. Маляренко В.А., Шубенко А.Л., Сенецкий А.В., Темнохуд І.О. (Казарова І.О.). Развитие электротехнических систем энергопотребления на основе когенерации // Новітні технології в електроенергетиці: V Міжнародна наук.-техніч. інтернет-конф. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. С. 27-32. ISBN 978-5-903413-13-3.

15. Маляренко В.А., Темнохуд І.О. (Казарова І.О.). Перспективи підвищення енергоефективності теплових мереж шляхом впровадження когенерації [Електронний ресурс] // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: XV междунар. науч.-техн. конф. 14-17 сент. 2015 г. Сб. докл. Электрон. дан. Харьков, ИПМаш НАН Украины, 2015 г. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). Загл. с экрана. 7 с.

16. Маляренко В.А., Андреев С.Ю., Сенецкий О.В., Казарова І.О. Підвищення енергоефективності об'єктів комунальної енергетики шляхом впровадження ORC технології [Електронний ресурс] // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: XVI междунар. науч.-техн. конф. 11-15 сент. 2017 г. Тез. докл. Электрон. дан. Харьков, ИПМаш НАН Украины, 2017 г. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). Загл. с экрана. 1 с.

17. Маляренко В.А., Темнохуд І.О. (Казарова І.О.). Енергетичні установки: Методичні вказівки до практичних занять для студентів 2 курсу денної, 3 курсу заочної форм навчання та слухачів другої вищої освіти за напрямом підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» зі спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання». Харків: ХНАМГ, 2012. 80 с.

18. Маляренко В.А., Доценко С. І., Темнохуд І.О. (Казарова І.О.). Технологія виробництва електроенергії: Конспект лекцій для студентів 1, 2 курсу денної, 2 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» зі спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання». – Харків: ХНУМГ, 2014. 168 с.

АНОТАЦІЯ

Казарова І. О. Підвищення ефективності систем енергопостачання за рахунок впровадження когенерації. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, Харків, 2018.

Дисертацію присвячено актуальній проблемі наукового обґрунтування та розробки ефективних заходів щодо енергозбереження і підвищення техніко-економічних показників об'єктів комунальної енергетики шляхом впровадження когенерації. Виконано узагальнення вибору та оцінки існуючих підходів вирішення задач енергозбереження при використанні когенераційних технологій у муніципальній енергетиці. Проведено аналіз опублікованих робіт з розрахунку теплових схем енергогенеруючих установок і визначення техніко-економічної доцільності впровадження когенерації на теплогенеруючих об'єктах.

На базі енергогенеруючих джерел КП «Харківські теплові мережі», які є типовими для більшості регіонів України, проведено комплексний аналіз технічного стану, режимів експлуатації теплогенеруючого устаткування, оцінка доцільності подальших розрахункових досліджень та потенціалу впровадження принципів когенерації.

Проведені дослідження з оцінки можливості підвищення ефективності котелень при їх розширенні на базі газопоршневих двигунів або газотурбінних надбудов. За результатами порівняльного аналізу впровадження ГПД та ГТУ здійснено техніко-економічні обґрунтування обраних рішень впровадження когенерації.

Розглянуто можливості впровадження когенерації за рахунок реалізації парових протитискових турбін на котельнях з паровими котлами. За результатами проведених розрахункових досліджень обрано парову протитискову турбіну з найбільшим терміном напрацювання на протязі року, що дозволить зменшити термін її окупності.

Вирішено задачі енергозбереження шляхом утилізації скидної теплоти малого потенціалу теплогенеруючого устаткування. Обґрунтовано техніко-економічну доцільність використання замкнених паротурбінних циклів на НРТ при виробництві електричної енергії для покриття власних потреб без додаткового спалювання палива.

Ключові слова: енергозбереження, комунальна енергетика, житлово-комунальне господарство, газопоршневий двигун, парова та газова турбіни, низькопотенційне джерело тепла, турбіна на низькокиплячому робочому тілі, ОРС-цикл, техніко-економічний показник.

АННОТАЦИЯ

Казарова И. А. Повышение эффективности систем энергоснабжения за счет внедрения когенерации. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена актуальной проблеме научного обоснования и разработки эффективных мероприятий по энергосбережению и повышению технико-экономических показателей объектов коммунальной энергетики путем внедрения когенерации. Выполнено обобщение выбора и оценки существующих подходов к решению задач энергосбережения при использовании когенерационных технологий в муниципальной энергетике. Проведен анализ опубликованных работ по расчету тепловых схем энергогенерирующих установок и определению технико-экономической целесообразности внедрения когенерации на теплогенерирующих объектах.

На базе энергогенерирующих источников КП «Харьковские тепловые сети», которые являются типовыми для большинства регионов Украины, проведен комплексный анализ технического состояния, режимов эксплуатации теплогенерирующего оборудования, оценка целесообразности дальнейших расчетных исследований и потенциала внедрения принципов когенерации.

Проведены исследования по оценке возможности повышения эффективности котельных при их расширении на базе газопоршневых двигателей или газотурбинных надстроек. По результатам сравнительного анализа внедрения ГПД и ГТУ выполнены технико-экономические обоснования выбранных решений внедрения когенерации.

Рассмотрены возможности внедрения когенерации за счет реализации паровых противодавленческих турбин на котельных с паровыми котлами. По результатам проведенных расчетных исследований выбрана паровая противодавленческая турбина с наибольшим сроком наработки на протяжении года, что позволит уменьшить срок ее окупаемости.

Решены задачи энергосбережения путем утилизации сбросной теплоты малого потенциала теплогенерирующего оборудования. Обосновано технико-экономическую целесообразность использования замкнутых паротурбинных циклов на НРТ при производстве электрической энергии для покрытия собственных нужд без дополнительного сжигания топлива.

Ключевые слова: энергосбережение, коммунальная энергетика, жилищно-коммунальное хозяйство, газопоршневой двигатель, паровая и газовая турбины, низкопотенциальный источник теплоты, турбина на низкокипящем рабочем теле, ORC-цикл, технико-экономический показатель.

ABSTRACT

Kazarova I.O. Increase of the energy supply systems efficiency at the expense of implementation of cogeneration. – On rights of a manuscript.

Dissertation for the Candidate of Technical Science degree by specialty 05.14.06 – Technical thermal physics and industrial heat-power engineering. – A. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine. – Kharkiv, 2018.

The dissertation is devoted to the actual problem of scientific substantiation and development of effective measures for energy saving and improvement of technical and economic indicators of communal energy facilities through the introduction of cogeneration. A generalization of the choice and assessment of existing approaches to the solution of energy-saving problems when using cogeneration technologies in municipal energy were performed. The analysis of published works on the calculation of thermal schemes of power generating units and the determination of the feasibility of the introduction of cogeneration at heat-generating facilities were performed.

On the basis of power generating sources of CE "Kharkiv thermal networks", which are typical for most regions of Ukraine, the complex analysis of the technical condition, operating modes of heat generating equipment, assessment of the feasibility of further design studies and the potential introducing were performed for the implementation of principles of cogeneration.

Researches to assess the possibility of improving the efficiency of boiler houses when they expand on the basis of gas piston engines or gas turbine superstructures were carried out. Based on the results of a comparative analysis of the implementation of the gas piston engine and gas-turbine installation feasibility studies of the selected solutions for the implementation of cogeneration were implemented.

The possibilities of introducing cogeneration through the implementation of steam backpressure turbines on boiler houses with steam boilers have been considered. Steam backpressure turbine with the largest period of operating time during the year to reduce the term of its recoupment is selected from the results of computational research.

The problems of energy saving by utilizing the waste heat of a small potential of heat-generating equipment are solved. The technical and economic feasibility of using closed steam-turbine cycles on the low-boiling working fluid in the production of electrical energy to cover its own needs without additional burning of fuel is justified.

Key words: energy saving, municipal energy, housing and utilities sector, gas piston engine, steam and gas turbines, low-potential heat source, turbine on a low-boiling working fluid, ORC-cycle, technical and economic indicator.

Підписано до друку 05.02.2018 р.
Формат 60×84^{1/16}. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Друк ксерографічний. Ум. друк. арк. 0,9.
Наклад 100 прим. Зам. №02-18

Надруковано ТОВ «Видавництво «Форт»
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців
ДК №333 від 09.02.2001 р.
61023, м. Харків, а/с 10325. Тел. (057)714-09-08