ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.438, 621.181.27, 631.544.41

Раціональне використання енергоресурсів компресорних станцій через утилізацію тепла вихлопних газів у тепличних комплексах

Т. А. Ашик [1]✉***, Н. О. Біленко***[2]***, В. В. Сагала***[3]
[1-3]Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна
✉ e-mail: [1]taniashik.official@gmail.com
ORCID: [1]https://orcid.org/0000-0003-3569-7920; [2]http://orcid.org/0000-0003-2401-3685;
[3]https://orcid.org/0009-0008-1344-8011

У статті досліджено можливості підвищення раціонального використання ресурсів на компресорних станціях магістральних газопроводів шляхом утилізації тепла, що виводиться з вихлопних газів газотурбінних двигунів (ГТД). Продукти згоряння цих двигунів містять значну кількість теплової енергії, яка зазвичай втрачається у навколишнє середовище, тому питання раціонального використання цього тепла як вторинного енергетичного ресурсу є надзвичайно актуальним. У роботі розглянуто сучасні технології утилізації тепла, зокрема використання котлів-утилізаторів, парових турбін та абсорбційних холодильних машин для виробництва тепла, електричної енергії та холоду. Особливу увагу приділено інтеграції цих технологій у системи когенерації, які дозволяють одночасно отримувати електричну та теплову енергію, що підвищує загальний рівень раціонального використання ресурсів. Такий підхід створює синергетичний ефект, поєднуючи потреби енергетичної та аграрної галузей. Зокрема, в статті представлено приклад реалізації системи утилізації тепла на компресорній станції, де після конденсації пари з парової турбіни теплову енергію використовують для обігріву теплиці, розташованої неподалік. Детально розглянуто параметри температурних режимів, необхідних для вирощування сільськогосподарських культур, а також технічні характеристики конструкції теплиці та її опалювальної системи. Пропонована система використовує тепло для підтримки оптимальної температури в тепличному господарстві, що дозволяє значно скоротити витрати на опалення. Крім того, стаття містить теплотехнічні розрахунки для визначення теплового навантаження теплиці, параметрів опалювальної системи та температурних режимів теплообмінника-конденсатора. Доведено доцільність впровадження системи, зокрема з урахуванням витрат природного газу та економії на енергоносіях. Розрахунки показали, що впровадження запропонованої системи утилізації тепла дозволяє підвищити рівень раціонального використання енергоресурсів газотранспортної інфраструктури, зокрема для забезпечення сталого розвитку енергетичного сектору України.

Ключові слова: *Газотурбінний двигун; Компресорна станція; Утилізація тепла; Котел-утилізатор; Когенерація; Раціональне використання ресурсів; Теплиця; Економія газу; Енергетичний сектор*

doi: https://doi.org/10.15673/ret.v61i3.3279

© The Author(s) 2025. This article is an open access publication
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. Вступ

Основним методом транспортування природного газу є трубопровідний транспорт. Компресорні станції магістральних газопроводів є невід'ємною частиною газотранспортної системи та призначені для підвищення тиску газу в трубопроводі шляхом його стиснення за допомогою

компресорів газоперкачувальних агрегатів. Найпоширенішими типами газоперкачувальних агрегатів є ті, що приводяться в дію газотурбінними двигунами, на які припадає понад 85% від загальної встановленої потужності компресорних станцій. Частина природного газу, що транспортується трубопроводом, використовується як паливо для цих агрегатів. Під час згоряння природного газу в камерах згоряння утворюються продукти згоряння, які служать робочим тілом для турбіни. Після проходження через турбіну ці гази викидаються в атмосферу. Температура вихлопних газів на таких компресорних станціях зазвичай коливається від 380 до 420 °C, з максимальним значенням, що досягає 450 °C. У цій статті розглядається використання тепла вихлопних газів від газотурбінних двигунів на компресорних станціях, тобто використання цього тепла як вторинного енергетичного ресурсу. Це питання є актуальним для сучасної економіки України, оскільки воно сприяє підвищенню енергоефективності паливно-енергетичного сектору та покращує загальну енергетичну ситуацію.

2. Аналіз літератури

Огляд літератури щодо використання тепла вихлопних газів на компресорних станціях показує, що основними підходами є використання тепла для виробництва електроенергії та теплової енергії, а також охолодження газів перед стисненням. Усі ці методи сприяють раціональному використанню енергетичних ресурсів та зниженню енерговтрат в газотранспортних системах [8, 9, 10, 11, 12, 13. 14].

В огляді конструкцій котлів-утилізаторів висвітлено різні підходи до їх проектування, включаючи використання змійовиків, різні схеми розташування труб (наприклад, шахове або коридорне розташування), а також такі міркування, як температура вихлопних газів та типи теплообміну. Конструкції котлів-утилізаторів спрямовані на максимізацію використання енергії вихлопних газів для забезпечення ефективного процесу теплообміну та мінімізації втрат енергії [2, 4, 6].

3. Мета, об’єкт, предмет та методи дослідження

Метою цієї роботи є впровадження заходів з раціонального енергоспоживання шляхом використання тепла вихлопних газів ГТД на КС.

Основні задачі наступні:

- огляд поточного стану енергетичної стратегії України, визначення проблемних питань та дослідження напрямків раціонального енергоспоживання в газовій промисловості та паливно-енергетичному секторах;
- визначення основних характеристик вихлопних газів газових турбін;
- розробка рекомендацій щодо напрямку утилізації теплоти вихлопних газів;
- оцінка ефективності використання тепла вихлопних газів для одного із запропонованих підходів утилізації.

Об'єктом дослідження є компресорна станція магістрального газопроводу та її теплові процеси.

Предметом дослідження є методи утилізації тепла вихлопних газів для підвищення ефективності використання паливного газу на КС.

Методи дослідження, застосовані в цій роботі, аналітичні та обчислювальні.

4. Результати дослідження

4.1 Напрями використання тепла вихлопних газів ГТД на КС

Після аналізу публікацій та сучасних підходів до утилізації тепла вихлопних газів ГТД було визначено три основні напрямки.

Перший напрямок – використання тепла вихлопних газів для виробництва теплової енергії, зокрема для систем опалення та гарячого водопостачання (рис. 1А). Для реалізації цього підходу на вихлопі ГТД встановлюється котел-утилізатор, де шляхом охолодження вихлопних газів утворюється насичена пара або гаряча вода, що є проміжним теплоносієм, передаючи тепло системі опалення та гарячого водопостачання споживачів.

Другий напрямок передбачає виробництво електроенергії (рис. 1В). У цій схемі утилізації пара, що утворюється в котлі-утилізаторі, подається до парової турбіни, яка приводить в дію електрогенератор, що призводить до додаткового виробництва електроенергії. Примітно, що ця схема виробництва електроенергії має один з найвищих показників ефективності серед існуючих технологій.

Також можливе використання схеми когенерації, тобто виробництво теплової та електричної енергії одночасно.

Третій напрямок – це виробництво холоду

тепловикористовуючими холодильними машинами, такими як адсорбційні або пароежекторні холодильні машини. Можливі шляхи застосування отриманого холоду включають охолодження природного газу після стиснення або попереднє охолодження природного газу перед стисненням на КС.

Вибір конкретного напрямку утилізації теплоти вихлопних газів від ГТД КС залежить від умов експлуатації станції, доступних технологій та економічної доцільності.

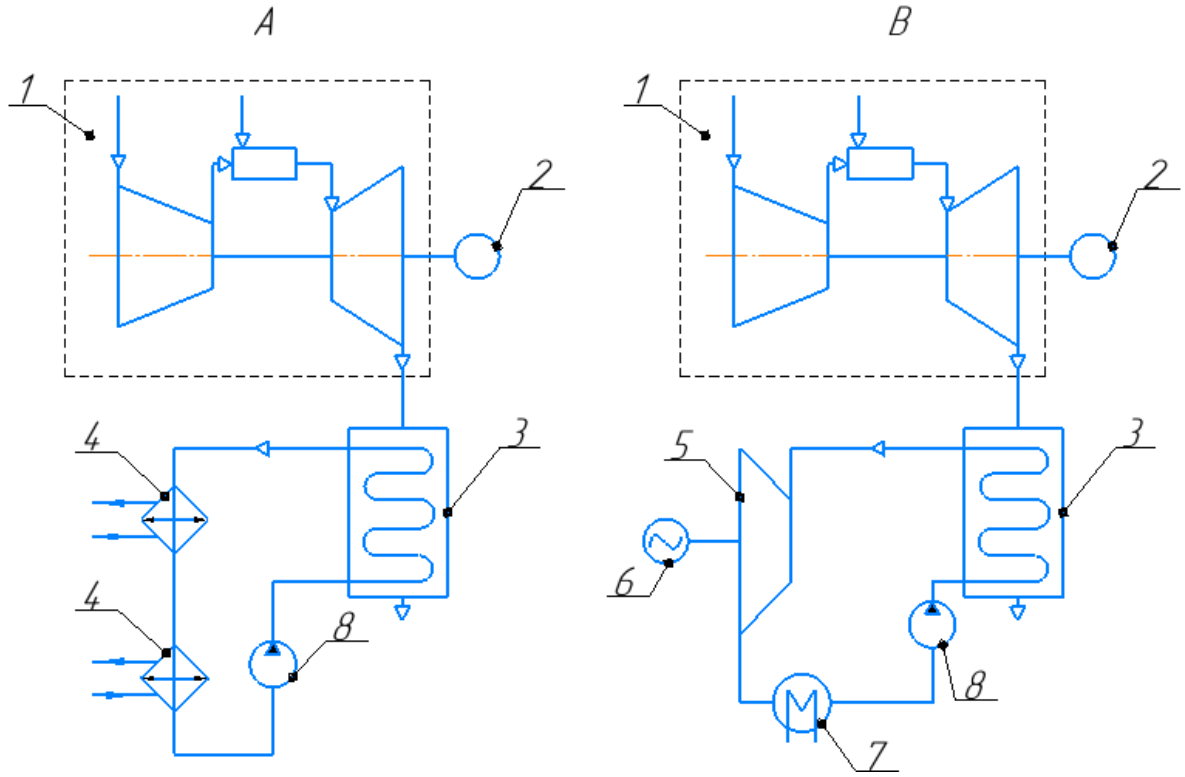

***Рисунок 1** – Схеми утилізації теплоти вихлопних газів газотурбінних двигунів компресорних станцій (А – схема виробництва теплової енергії; В – схема виробництва електричної енергії): 1 – газотурбінна установка; 2 – споживач потужності; 3 – котел-утилізатор; 4 – водопідігрівач; 5 – парова турбіна; 6 – електрогенератор; 7 – конденсатор; 8 – циркуляційний насос*

4.2 Схема утилізації тепла на компресорній станції

При використанні тепла вихлопних газів для систем опалення та гарячого водопостачання виникає суттєвий недолік: високотемпературні вихлопні гази (приблизно 400 – 450 °С) використовуються для виробництва низькопотенційної теплової енергії. Тому доцільно поєднати перший та другий підходи, описані раніше, що дозволить одночасно генерувати як електричну, так і теплову енергію.

Запропонована система (рис. 2) передбачає використання теплової енергії для виробництва електроенергії та для опалення. В даній статті приділена увага використанню теплової енергії для опалення тепличного господарства, розташованого поблизу компресорної станції.

Установка працює наступним чином. Паливний газ (II) та повітря (I) під тиском подаються в камеру згорання (3) ГТД. При згоранні газу утворюються продукти згорання (III) з температурою від 900 до 1200 °С, залежно від потужності ГТД. Ці гази надходять у газові турбіни (4, 5, 6), які приводять у дію ступені повітряного осьового компресора (1, 2) та відцентровий нагнітач природного газу (7). Відпрацьовані гази (IV) з ГТД прямують до котла-утилізатора (8), а потім або викидаються в атмосферу, або направляються на наступний ступінь системи утилізації.

Отримана в пароперегрівачі котла-утилізатора (8) перегріта пара (VI) використовується для виробництва електроенергії за допомогою парової турбіни (9), підключеної до електричного генератора (10). Далі пара (VII) прямує до конденсатора (11), де вона повністю конденсується. Теплота від конденсації пари використовується для підігріву циркуляційної води (IX) системи опалення тепличного господарства (12). Насос (13) використо-

вується для підвищення тиску води (VIII) до тиску перегрітої пари та для подачі її до котла-утилізатора (8), де знов буде вироблятись перегріта пара (VI). Таким чином цикл замикається.

4.3 Температурні режими тепличного господарства

Температура повітря в теплиці залежить від вирощуваних культур і стадії їх розвитку. Ось основні оптимальні діапазони:

- для теплолюбних культур (помідори, огірки, перець) вдень: 22…28 °С та вночі: 16… 18 °С;
- для менш теплолюбних культур (салат, зелена цибуля, шпинат) вдень: 18…22°С та вночі 12…16 °С;
- для розсади (на стадії пророщування): 22…25 °С протягом дня, вночі – трохи нижче, до 18…20 °С.

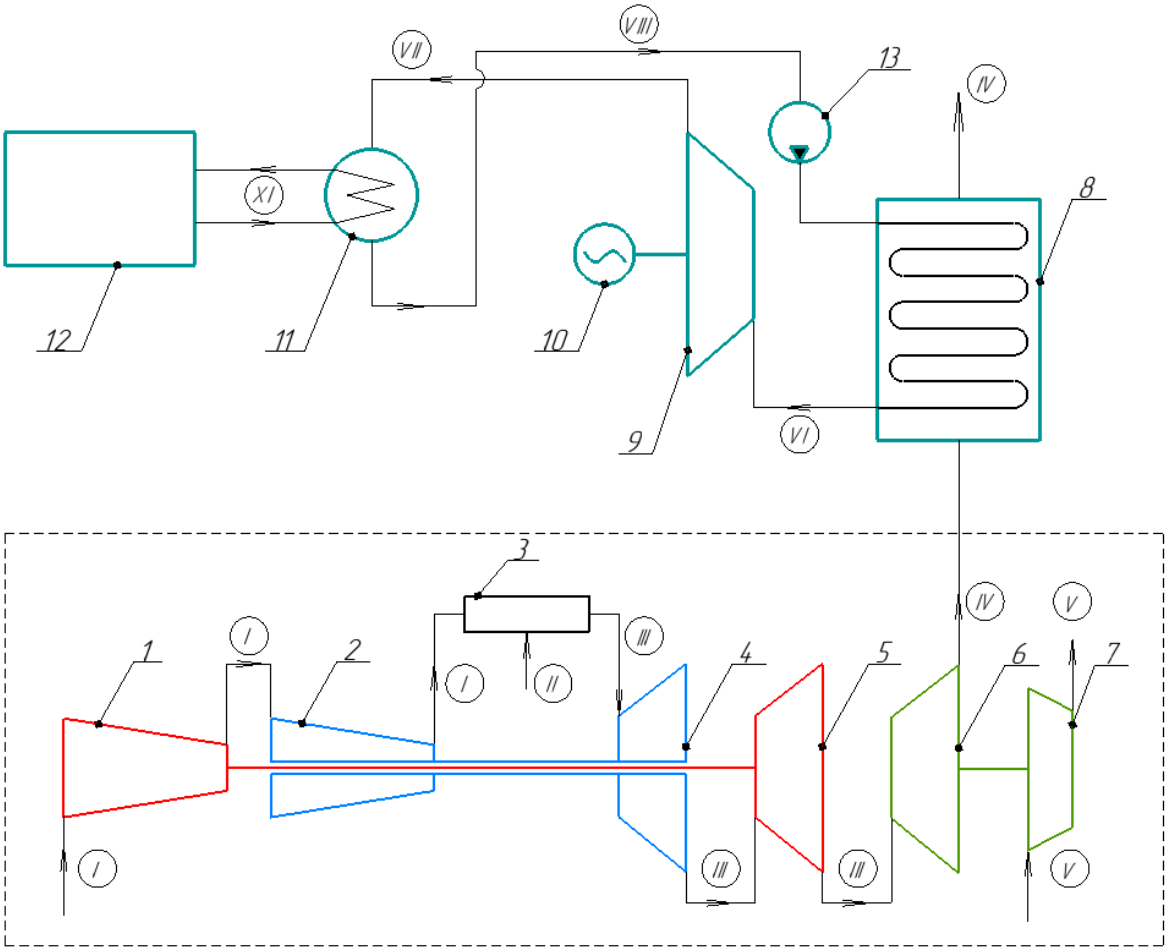

***Рисунок 2** – Принципова схема газотурбінної установки з системою утилізації тепла вихлопних газів: 1 – осьовий повітряний компресор низького тиску; 2 – осьовий повітряний компресор високого тиску; 3 – камера згорання; 4 – газова турбіна високого тиску; 5 – газова турбіна низького тиску; 6 – силова турбіна; 7 – нагнітач природного газу; 8 – котел-утилізатор; 9 – парова турбіна; 10 – електрогенератор; 11 – конденсатор; 12 – система опалення тепличного господарства; 13 – насос; I – повітря; II – паливний газ; III – продукти згорання; IV – вихлопні гази; V – природний газ; VI – перегріта пара; VII – насичена пара; VIII – конденсат; IX – циркуляційна вода системи опалення*

Взимку температура в теплиці часто підтримується на нижчому рівні, але важливо, щоб вона не падала нижче 10…12 °С для основних овочевих культур, оскільки надмірний холод може спричинити уповільнення росту і розвиток захворювань.

Середня температура ґрунту, яку необхідно підтримувати в теплиці, залежить від виду вирощуваних культур. Загалом для більшості овочевих і зелених культур оптимальною є температура ґрунту в межах 18…24 °С для теплолюбних культур, таких як помідори, огірки, перець та 16…20 °С для менш теплолюбних культур, як салат, шпинат, зелена цибуля.

Для пророщування насіння та розвитку розсади часто підтримують вищу температуру ґрунту

до 25…28°С. Взимку температура може бути трохи нижчою, але все ж важливо уникати падіння нижче 15 °С, оскільки це може сповільнити ріст рослин і знизити врожайність.

4.4 Конструктивні характеристики тепличного господарства

Розглянемо тепличне господарство розташоване на земельній ділянці площею 4,7 га (рис. 3). Теплиця складаються з 4 блоків по 8 секцій в кожному та призначається для вирощування овочів і розсади. За геометричними показниками один блок теплиці має розміри 122 х 92 х 4,5 м (рис. 4). За об'ємно-планувальних рішень або кількості прольотів і окатів теплиця – ангарна. За типом огороджувальних конструкцій – полікарбонатна. Товщина покриття 8 мм.

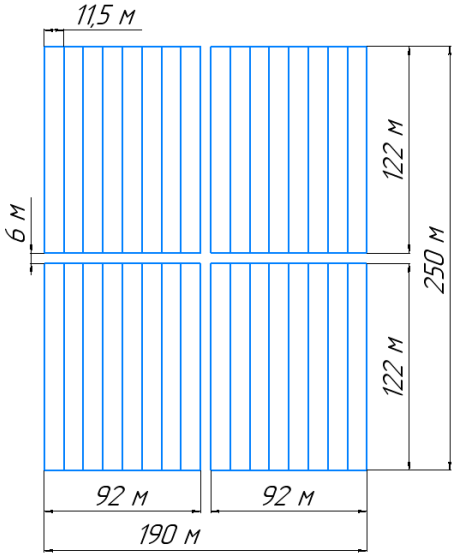

Рисунок 3 *– Схема розташування блоків тепличного господарства*

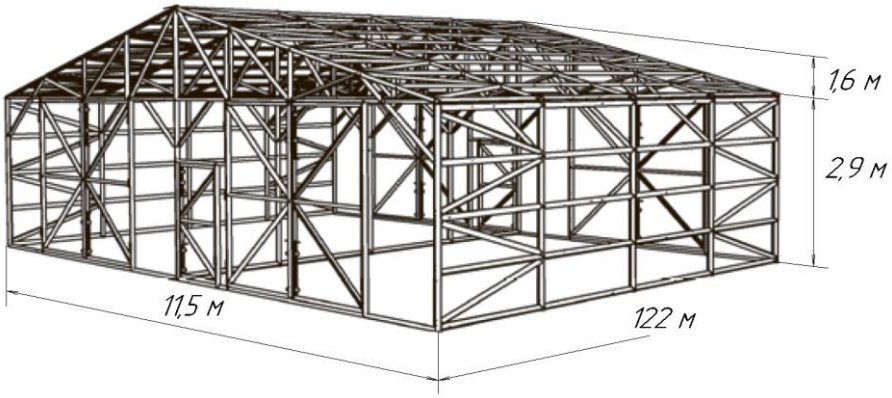

Рисунок 4 *– Конструктивні розміри одної секції блоку теплиці*

4.5 Теплове навантаження теплиці

Для опалення теплиці планується використовувати теплоту конденсації пари після парової турбіни, що працює на перегрітому парі від котла-утилізатора (рис.2). Для визначення режиму роботи компресорної станції та витрати паливного газу використана рекомендована методика [15], для визначення складу і кількості та температури продуктів згорання використані методики [2, 3, 16].

Для розрахунку системи опалення теплиці необхідно мати інформацію про її теплове навантаження. Для розрахунків в інженерній практиці застосовують спрощений спосіб розрахунку потужності системи опалення. Нехтуючи тепловим потоком через ґрунт, потужність системи опалення теплиць знаходять за формулою:

$$Q_{\text{Р}}^{\text{Т}} = KF_0\left(t_{\text{п}} - t_{\text{зп}}\right)\eta_{\text{інф}}, \qquad (1)$$

де $Q_{\text{р}}^{T}$ – розрахункова потужність системи опалення, Вт; K – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м^2·°С); F_0 – сумарна площа поверхні огородження, м^2; $t_{\text{п}}$ – температура повітря в приміщенні, °С; $t_{\text{зп}}$ – розрахункова температура зовнішнього повітря, °С,

[7, 9]; $\eta_{інф}$ – коефіцієнт інфільтрації.

Витрата теплоти на опалення в різні періоди часу пов'язана з температурою зовнішнього повітря залежністю:

$$Q^{\text{Т}} = Q_{\text{Р}}^{\text{Т}} \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{з}}}{t_{\text{п}} - t_{\text{зп}}}, \qquad (2)$$

де $t_{\text{з}}$ – температура зовнішнього повітря, °С.

У разі опалення з використанням гарячої води відпуск теплоти регулюють шляхом зміни температури теплоносія (води) при незмінній його витраті. Постійна витрата забезпечуватися циркуляційними насосами.

Розрахунок якісного регулювання системи зводиться до визначення температур «прямої» і «зворотньої» води в опалювальній мережі в залежності від необхідного в даних умовах теплового навантаження. Це дозволяє підтримувати на необхідному рівні внутрішню температуру в опалювальних приміщеннях. Температуру «прямої» і «зворотної» води рекомендується визначати за рівняннями:

$$t_W^{\text{ПР}} = t_{\text{п}} + \Delta t' \bar{Q}^{0,8} + \bar{Q}\theta'/2; \qquad (3)$$

$$t_W^{\text{ЗВ}} = t_{\text{п}} + \Delta t' \bar{Q}^{0,8} - \bar{Q}\theta'/2; \qquad (4)$$

$$\Delta t' = \frac{t_{WP}^{\text{ПР}} + t_{WP}^{\text{ЗВ}}}{2} - t_{\text{п}}; \qquad (5)$$

$$\bar{Q} = \frac{Q^{\text{Т}}}{Q_{\text{Р}}^{\text{Т}}} = \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{з}}}{t_{\text{п}} - t_{\text{зп}}}; \qquad (6)$$

$$\theta' = t_{WP}^{\text{ПР}} - t_{WP}^{\text{ЗВ}} \qquad (7)$$

де $t_{\text{WP}}^{\text{ПР}}$, $t_{\text{WP}}^{\text{ЗВ}}$ – розрахункова температура «прямої» та «зворотної» води відповідно, °С.

Маса води, що циркулює в системі опалення при якісному регулюванні, визначається розрахунковою теплопродуктивністю теплообмінника- конденсатора і різницею температур води в системі при розрахунковій температурі зовнішнього повітря:

$$G_W^K = \frac{Q_{\text{Р}}^{\text{Т}}}{C_W \left(t_{WP}^{\text{ПР}} - t_{WP}^{\text{ЗВ}} \right)} \qquad (8)$$

де C_W – теплоємніть води, кДж/(кг·К).

Для того, щоб виконати розрахунок системи опалення та оцінити його роботу в різні місяці опалювального сезону, необхідно розрахувати температуру води на вході в опалювальні прилади. В теплообмінник-конденсатор надходить «зворотна» вода з температурою $t_{\text{WP}}^{\text{ЗВі}}$ виходить «пряма» вода з температурою $t_{\text{WP}}^{\text{ПР}}$, нагріваючись при цьому за рахунок тепла циркуляційного теплоносія (конденсату). У відповідність з цим, температура «прямої» води буде залежати від температури зовнішнього повітря. При цьому витрата води, що циркулює в системі опалення, залишатиметься постійною. Цей спосіб регулювання теплопродуктивності системи опалення більш доцільний (порівняно з варіантом зі змінною витратою). Розрахункові значення теплопродуктивності теплообмінника-конденсатора, температур «прямої», «зворотної» води для кліматичних умов Одеської області для різних місяців наведено в табл. 1.

Таблиця 1 *– Розрахункові значення теплопродуктивності системи опалення, температур «прямої», «зворотної» води при різних температурах зовнішнього повітря*

	Температура зовнішнього повітря $t_з$, в С							
Величини	Розрах. режим	жовтень	листопад	грудень	січень	лютий	березень	квітень
$t_з$, °С	-15,0	11,2	5,7	0,7	-1,3	0,2	4,3	10,6
Q^T, МВт	6,6	1,68	2,72	3,67	4.05	3,77	2,99	1,79
$t_{\text{WP}}^{\text{ПР}}$, °С	70,0	29,5	35,9	42,7	45,7	43,4	37,7	30,1
$t_{\text{WP}}^{\text{ЗВ}}$ °С	40,0	21,9	23,7	26,2	27,4	26,5	24,3	22,1

5. Висновки

У статті розглянуто актуальну проблему раціонального використання енергоресурсів на компресорних станціях шляхом утилізації теплової енергії вихлопних газів газотурбінних двигунів. Запропонована утилізаційна система дозволяє не лише підвищити коефіцієнт корисної дії використання паливного газу, але й забезпечити синергічне поєднання енергетичних і аграрних потреб – виробництво електроенергії та теплопостачання тепличних комплексів

Проведені розрахунки включали:

• розрахунок режиму роботи компресорної

станції та витрати паливного газу;

• визначення складу і кількості продуктів згоряння, що утворюються в камері згоряння газотурбінного двигуна;

• конструктивний розрахунок котла-утилізатора (пароперегрівача, випарного теплообмінника, економайзера);

• теплове навантаження теплиць;

• економію витрат на природний газ в порівнянні з випадком використання власної котельні господарством.

Було проведено оцінку доцільності використання тепла відхідних газів від газотурбінної системи компресорної станції для опалення теплиці для вирощування овочів загальною площею 5 га, розташованої в Одеській області. Оцінка базувалася на розрахунку економії коштів у разі використання власного котла. Економія витрат на природний газ становить від 1,8 до 4,4 млн гривень на місяць.

Проведений аналіз підтвердив ефективність та економічну доцільність впровадження такої системи. Реалізація проєкту сприятиме зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню енергоефективності та загальної продуктивності об'єктів газотранспортної інфраструктури.

Особистий внесок авторів CRediT

Ашик Т.А.: методичне забезпечення, планування роботи. **Біленко Н.О.:** аналіз даних; формулювання висновків. **Сагала В.В.:** інформаційний пошук, аналіз даних

Література

1. **Розгонюк В.В., Хачикян Л.А., Григіль М.А. та ін.** Експлуатаційникові газонафтового комплексу: довідник. – К.: «РОСТОК», 1998. – 431 с.
2. **Кологривов М.М., Сагала Т.А., Бузовський В.П.** Котли-утилізатори: Навчальний посібник. – Одеса: Апрель, 2015. – 83 с.
3. **Кологривов М.М., Притула В.В.** Розрахунок характеристик палив і продуктів їх сгоряння: посібник для самостійної роботи. – Одеса: Видавн. центр ОДАХ, 2008. – 22 с.
4. **Гічов Ю.О., Бойко В.М., Адаменко Д.С.** Котли-утилізатори та їх тепловий розрахунок: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2004. – 46. с.
5. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія [Чинний від 2011-11-01]. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с. Режим доступу: dbn.co.ua
6. **Мисак, Й. С., Гнатишин, Я. М., Близнюк, В. Ф., Крук, В. Ю.** Пристрої для утилізації теплової енергії. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2006. – 152 с.
7. ДБН В.2.2-2:2024. Будівлі та споруди. Теплиці і парники. [Чинний від 01.11.2024]
8. **Білека Б.Д., Васильєв С.П., Клименко В.М. та ін.** Комплексне використання утилізаційних енергоустановок на КС для підвищення ефективності ГПА // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 4. – С. 40-43.
9. **Чалаєв Д.М.** Раціональне використання газоперекачувальних агрегатів // Трубопровідний транспорт. – 2013. – № 1. – С. 28-29.
10. **Білека Б., Сергієнко Р.** (2010). The heatutilizing power and the power refrigerating machinery for compressor stations of the main gas pipelines // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2010. – № 3(2(45). – С. 32-35
11. **Тітлов О., Бошкова І., Дорошенко В., Світлицький В., Сагала Т., Морозов О.** Аналіз енергетичних перспектив охолодження природного газу в магістральних газопроводах за допомогою абсорбційних холодильних машин // Холодильна техніка та технологія. – 2021. – Т. 57(3). – С. 147-157.
12. **Titlov, O., Vasyliv, O., Sahala, T., & Bilenko, N.** Evaluation of the Prospects for Preliminary Cooling of Natural Gas on Main Pipelines before Compression through the Discharge of Exhaust Heat of Gas-Turbine Units // EUREKA: Physics and Engineering. – 2019. – Vol. (5). – P. 47-55.
13. **Тітлов О.С., Сагала Т.А., Артюх В.Н., Дьяченко Т.В.** Аналіз перспектив використання пароежекторної та абсорбційної холодильних установок для охолодження технологічного газу та одержання рідкого вуглеводневого палива // Холодильна техніка та технологія. – 2017. – Т. 53(6). – С. 11-18.
14. **Сагала Т.А., Платонов С.П.** Перспективи використання холодильних машин для охолодження газу перед стисненням на компресорних станціях // Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу PGE – 2018: зб. наукових праць міжнародної науково-технічної конференції. – Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 2018. – С. 349-351.
15. ОНТП 51-1-85. Загальносоюзні норми технологічного проектування. Магістральні трубопроводі. Частина 1. Газопроводи. [Чинний від 1986-01-01]. – 221 с.
16. **Лісафін В.П.** Газотурбінні установки: навчальний посібник. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ,2013. – 192 с.

Отримана в редакції 11.08.2025, прийнята до друку 29.08.2025

Rational use of energy resources at compressor stations through waste heat recovery in greenhouse complexes

Tetiana Ashyk[1]✉, Nataliia Bilenko[2], Violeta Sahala[3]
[1-3]Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine
✉ e-mail: [1]taniashik.official@gmail.com
ORCID: [1]https://orcid.org/0000-0003-3569-7920; [2]http://orcid.org/0000-0003-2401-3685;
[3]https://orcid.org/0009-0008-1344-8011

This article examines the possibilities of improving the rational use of resources at compressor stations of main gas pipelines through the utilization of heat extracted from the exhaust gases of gas turbine engines (GTE). The combustion products of these engines contain a significant amount of thermal energy, which is usually lost to the environment. Therefore, the issue of rational use of this heat as a secondary energy resource is extremely relevant. The study reviews modern heat recovery technologies, including the use of waste heat boilers, steam turbines, and absorption chillers for the production of heat, electricity, and cooling. Special attention is given to the integration of these technologies into cogeneration systems, which enable the simultaneous generation of electrical and thermal energy, thereby increasing the overall level of rational resource use. This approach creates a synergistic effect by combining the needs of both the energy and agricultural sectors. In particular, the article presents an example of implementing a heat recovery system at a compressor station, where thermal energy from the condensation of steam in a steam turbine is used to heat a nearby greenhouse. The parameters of temperature regimes necessary for growing agricultural crops are examined in detail, along with the technical characteristics of the greenhouse design and its heating system. The proposed system uses heat to maintain an optimal temperature in the greenhouse, which significantly reduces heating costs. Furthermore, the article includes thermal calculations to determine the greenhouse's heat load, heating system parameters, and temperature regimes of the heat exchanger-condenser. The feasibility of implementing the system is demonstrated, particularly considering natural gas consumption and energy savings. The calculations show that the proposed heat recovery system can improve the rational use of energy resources in gas transportation infrastructure, contributing to the sustainable development of Ukraine's energy sector.
Keywords: *Gas turbine engine; Compressor station; Heat recovery; Waste heat boiler; Cogeneration; Rational use of resources; Greenhouse; Gas savings; Energy sector*

References

1. **Rozhoniuk, V. V., Khachikian, L. A., Hryhil, M. A., et al.** (1998). Handbook for Operators of the Oil and Gas Industry. *Kyiv: "ROSTOK", 431.*
2. **Kologryvov, M. M., Sahala, T. A., & Buzovskyi, V. P.** (2015). Waste Heat Boilers: A Textbook. *Odesa: April, 83.*
3. **Kologryvov, M. M., & Prytula, V. V.** (2008). Calculation of Fuel Characteristics and Their Combustion Products: A Guide for Independent Study. *Odesa: Publishing Center of OSAR, 22.*
4. **Hichov, Yu. O., Boiko, V. M., & Adamienko, D. S.** (2004). Waste Heat Boilers and Their Thermal Calculation: A Textbook. *Dnipropetrovsk: NMetAU, 46.*
5. DSTU-N B V.1.1-27:2010. (2011). Building Climatology [Valid from 2011-11-01]. *Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 123.*
6. **Mysak, Y. S., Hnatyshyn, Ya. M., Blyzniuk, V. F., & Kruk, V. Yu.** (2006). Devices for Waste Heat Recovery. *Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 152.*
7. DBN V.2.2-2:2024. (2024). Buildings and Structures. Greenhouses and Hothouses [Valid from 2024-11-01].
8. **Bileka, B. D., Vasyliev, S. P., Klymenko, V. M., et al.** (2000). Integrated use of waste heat recovery units at compressor stations to improve the efficiency of gas compressor units. *Oil and Gas Industry, (4), 40-43.*
9. **Chalayev, D. M.** (2013). Rational use of gas compressor units. *Pipeline Transport, (1), 28-29.*
10. **Bileka, B., & Sergienko, R.** (2010). The heat-utilizing power and the power refrigerating machinery for compressor stations of the main gas pipelines.

Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(2(45), 32–35.

11. **Titlov, O., Boshkova, I., Doroshenko, V., Svitlytskyi, V., Sahala, T., & Morozov, O.** (2021). Analysis of energy prospects for natural gas cooling in main pipelines using absorption refrigeration systems. *Refrigeration Engineering and Technology, 57(3), 147–157.*

12. **Titlov, O., Vasyliv, O., Sahala, T., & Bilenko, N.** (2019). Evaluation of the prospects for preliminary cooling of natural gas on main pipelines before compression through the discharge of exhaust heat of gas-turbine units. *EUREKA: Physics and Engineering, (5), 47-55.*

13. **Titlov, A. S., Sahala, T. A., Artyukh, V. N., & Dyachenko, T. V.** (2017). Analysis of the prospects for using steam-ejector and absorption refrigeration units for cooling process gas and producing liquid hydrocarbon fuel. *Refrigeration Engineering and Technology, 53(6), 11–18.*

14. **Sahala, T. A., & Platonov, S. P.** (2018). Prospects for the use of refrigeration units for gas cooling before compression at compressor stations. In Machines, Equipment and Materials for Increasing Domestic Oil and Gas Production. *PGE 2018: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference Ivano-Frankivsk: IFNTUOG, 349–351.*

15. ОНТП 51-1-85. (1986). All-Union Standards of Technological Design. Main Pipelines. Part 1. Gas Pipelines [Valid from 1986-01-01]. 221 p.

16. **Lisafin, V. P.** (2013). Gas Turbine Units: A Textbook. *Ivano-Frankivsk: IFNTUOG, 192.*

Received 11 August 2025
Approved 29 August 2025
Available in Internet 30 September 2025