

ЕФЕКТИВНІСТЬ ГАЗОПОРШНЕВИХ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

¹Вінницький національний технічний університет

Процес одночасного вироблення теплової та електричної енергії має більшу енергоефективність порівняно з роздільною схемою енергопостачання, коли тепла енергія виробляється на парових або водогрійних котельнях, а електрична енергія постачається з централізованих джерел — теплових електричних станцій, що сприяє декарбонізації енергетичної галузі та сповільненню процесів глобального потепління.

Впровадження комбінованого енергопостачання в системах централізованого теплопостачання надає переваги щодо диверсифікації та надійності постачання теплової та електричної енергії, зменшення навантаження на об'єднану електромережу, зменшення нерівномірності завантаження електроенергетичної системи, посилення енергонезалежності країни.

Як об'єкт дослідження вибрано водогрійну котельню системи централізованого теплопостачання. Визначено економію умовного палива в разі встановлення на базі опалювальної водогрійної котельні газопоршневого двигуна Jenbacher. Показано, що економія умовного палива становить 1,7...7,3 % для когенераційної системи в порівнянні з роздільною схемою енергопостачання, де за основу взяті показники ефективності вугільних теплових електричних станцій. Визначено річне зменшення валових викидів оксидів вуглецю, оксидів сірки та оксидів азоту в навколишнє середовище в разі впровадження децентралізованої когенерації.

Визначено вплив співвідношення цін на газ та електричну енергію на економічну ефективність комбінованого вироблення теплової та електричної енергії з використанням природного газу. Показано, що використання когенераційної установки для покриття власних електричних потреб є економічно доцільним у разі співвідношення цін на електричну енергію та природний газ більше ніж 2,4. Підтверджено, що когенерація є економічно доцільною, але має значні терміни окупності інвестицій.

Ключові слова: когенерація, електрична енергія, тепла енергія, газопоршневий двигун, декарбонізація, водогрійна котельня, енергетична ефективність

Вступ

Загальновідомо, що когенераційні установки забезпечують високий ступінь енергоефективності у порівнянні з енергетичними установками, що виробляють електричну енергію некомбінованим способом. Підвищення енергоефективності зі свого боку сприяє декарбонізації енергетичної галузі та сповільненню процесів глобального потепління [1]—[3].

Україна має значний потенціал для виробництва теплової та електричної енергії з використанням когенерації як за електрогенерувальним, так і за теплогенерувальним напрямом [4]—[8]. У системах централізованого теплопостачання значний потенціал мають когенераційні установки газопоршневого або газотурбінного типу. Впровадження когенераційних установок (КГУ) на базі джерел систем теплопостачання додатково створює такі переваги: 1) диверсифікація та незалежність електропостачання, що дає можливість надійно працювати незалежно від стану енергосистеми міста, зменшити ризики відключень електроенергії, вимушені простої і пов'язані з цим перевищеннями витрат палива; 2) зменшення навантаження на об'єднану електромережу міста і всієї країни, що дозволить рідше використовувати планові та аварійні відключення населення та підприємств; 3) зменшення річної нерівномірності завантаження електроенергетичної системи країни, що дозволить підвищити енергоефективність великої енергетики в зимовий період року; 4) посилити енергонезалежність країни.

В Україні ухвалено низку законодавчих актів в напрямку когенерації, які роблять її пріоритет-

ною та законодавчо врегульованою сферою діяльності [9]—[11], але надмірне регулювання ринку енергетики, впровадження субсидій та пільг на ціну одиниці теплової та електричної енергії; недостатнє використання закордонного досвіду економічного стимулювання розвитку когенерації призводить до низької частки тепло- і електроенергії, виробленої на електростанціях з комбінованим циклом виробництва.

Мета роботи — оцінити енергетичну, економічну та екологічну ефективність комбінованої генерації теплової і електричної енергії в системі централізованого тепlopостачання.

Результати дослідження

Під енергетичною ефективністю розуміємо витрату умовного палива на виробництво енергії. Для визначення ефективності використання когенерації на базі водогрійної котельні розроблено математичну модель та проведено числові дослідження за умов встановлення газопоршневої установки для часткового або повного забезпечення власних електричних потреб котельні. Розрахунки теплової схеми котельні та комбінованої установки виконувалися за відомими методиками [12], [13].

Витрата умовного палива в разі роздільної схеми вироблення теплової енергії Q_{bh} і електричної енергії для власних потреб котельні Ne визначається за рівнянням

$$B_c = \frac{Q_{bh}}{Q_{lhw} \eta_{bh}} + \frac{Ne}{Q_{lhw} \eta_{ps} \eta_{eg}}, \quad (1)$$

де Q_{lhw} — теплота згорання умовного палива, МДж/кг; η_{bh} — ККД котлів; η_{ps} , η_{eg} — ККД конденсаційних електростанцій та ККД розподілу та транспортування електроенергії в електричних мережах відповідно.

В разі використання газопоршневої когенераційної установки для повного покриття власних потреб котельні в електричній енергії витрата умовного палива визначається

$$B_c^{chp} = \frac{Q_{bh} - Q_{chp}}{Q_{lhw} \cdot \eta_{bh}} + \frac{Ne}{Q_{lhw} \cdot \eta_{chp}}. \quad (2)$$

Тоді економія умовного палива порівняно з роздільною схемою енергопостачання

$$\Delta B_c = B_c - B_c^{chp}. \quad (3)$$

Величина економії умовного палива характеризує перевагу комбінованої схеми енергопостачання над роздільною з погляду енергетики.

Підвищення енергоефективності вироблення теплової енергії на котельні за рахунок встановлення когенераційної установки визначається зміною питомої витрати умовного палива

$$\Delta b_c = \frac{B_c}{Q_{bh}} - \frac{B_c^{chp}}{Q_{bh}}. \quad (4)$$

Вважатимемо, що показником економічної ефективності зазначених систем енергопостачання є собівартість виробництва теплової енергії та термін окупності інвестицій у встановлення когенераційної установки для забезпечення власних потреб котельні у електричній енергії.

Собівартість виробництва теплоти за умов роздільного та комбінованого вироблення електричної енергії на забезпечення власних потреб котельні визначається як сума прямих матеріальних витрат, зокрема на паливо, прямих витрат на оплату праці, загальновиробничих витрат та інших витрат [14].

Термін окупності інвестицій у встановлення когенераційної установки

$$T = \frac{K_{chp}}{C_v - C_v^{chp}}, \quad (5)$$

де K_{chp} — капітальні вкладення в будівництво когенераційної установки; C_v , C_v^{chp} — собівартість вироблення теплоти в котельні за роздільною та комбінованою схемою енергопостачання.

Для порівняльного аналізу роздільного і комбінованого енергопостачання розглянемо приклад впровадження когенерації на базі опалювальної водогрійної котельні з приєднаним тепловим навантаженням 53,2 МВт і власними потребами в електричній енергії в розрахунковому максимальному режимі 1070 кВт. Часткове або повне забезпечення власних електричних потреб котельні

здійснюється на базі когенераційних установок Jenbacher (табл. 1), які працюють на природному газі з викидами $\text{NO}_x = 250 \text{ мг/м}^3$. В розрахунках взято, що ККД вугільної теплової електростанції 35 %, а втрати електроенергії на транспортування від електростанції до споживача 13 %. Результати розрахунків показані на рис. 1 та рис. 2.

Таблиця 1

Технічні характеристики когенераційних установок на базі двигунів Jenbacher [15]

Марка	Jenbacher J208	Jenbacher J312	Jenbacher J412	Jenbacher J320	Jenbacher J416
Електрична потужність, кВт	294	635	851	1067	1141
Електричний ККД, %	37,6	39,5	40,3	39,9	41,2
Теплова потужність, кВт	410	766	979	1293	1362
Тепловий ККД, %	52,4	47,6	48,1	48,4	47,4

Для повного забезпечення власних потреб котельні в електричній енергії достатньо встановити когенераційну установку Jenbacher J320 з електричною потужністю 1067 кВт. За умов впровадження такої установки можна досягти зменшення питомої витрати умовного палива на вироблення теплоти з $b_c = 47,1 \text{ кг/ГДж}$ до $b_c^{chp} = 40,7 \text{ кг/ГДж}$.

На рис. 1 показані результати визначення економії умовного палива в разі встановлення когенераційних установок різних електричних потужностей (див. табл. 1) в порівнянні з роздільною схемою енергопостачання.

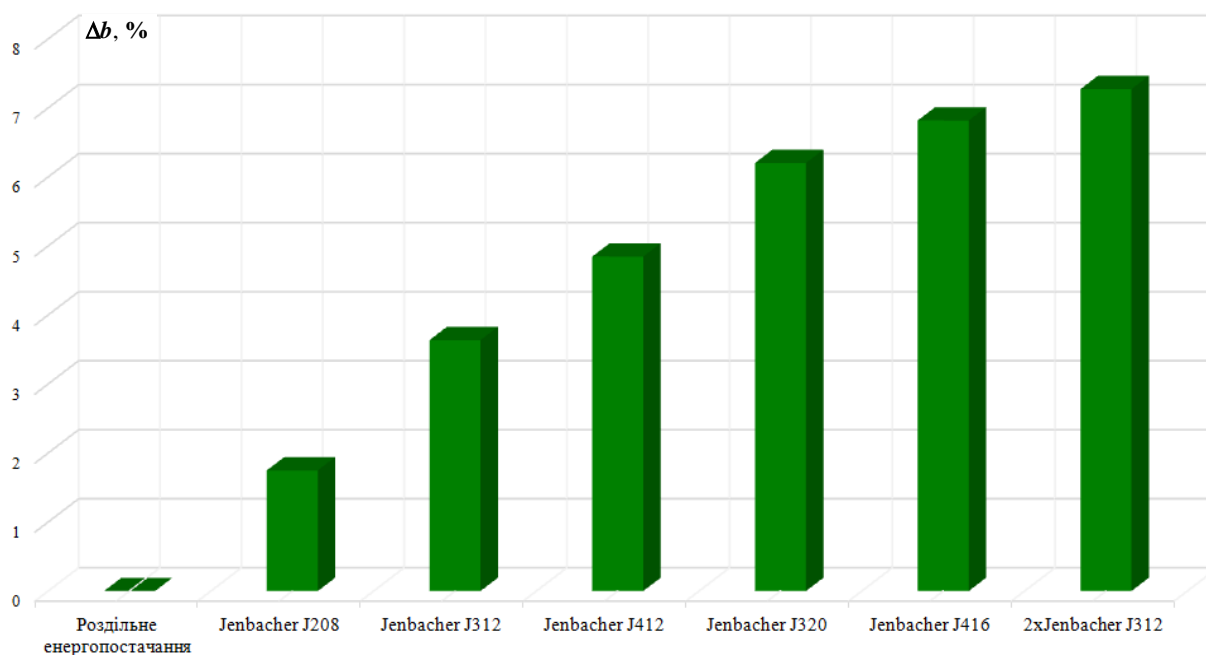


Рис. 1. Зменшення витрати умовного палива, Δb , %, під час роботи когенераційної установки, порівнюючи з роздільною схемою енергопостачання

З рис. 1 видно, що економія палива складає 1,7...7,3 % і буде тим більша, чим більша потужність когенераційної установки. Слід зазначити, що економія умовного палива викликає пропорційне зменшення викидів таких шкідливих речовин, як діоксид вуглецю, оксид сірки, оксиди азоту тощо, в процесі вироблення енергії.

Визначено річне зменшення валових викидів забруднювальних речовин і парникових газів в разі застосування газопоршневих двигунів в котельні за методиками [5], [16]. Результати розрахунків подані в табл. 2.

На рис. 2 показані результати визначення собівартості виробленої теплової енергії від котельні в разі роздільного та комбінованого енергопостачання, а також терміни окупності капіталовкладень на встановлення когенераційних установок різної потужності. Очевидно, що для середньозваженої ціни природного газу для вироблення теплоти 9 грн/м³ і ціни газу для вироблення електроенергії 24 грн/м³ використання газопоршневої когенераційної установки є економічно доцільним, незважаючи на те, що прості терміни окупності інвестицій досить високі.

Річне зменшення валових викидів забруднювальних речовин

Показники	Тип двигуна					
	Jenbacher J208	Jenbacher J312	Jenbacher J412	Jenbacher J320	Jenbacher J416	2 x Jenbacher J312
Діоксид вуглецю, т/рік	884,68	1840,56	2453,25	3139,45	3451,15	3681,12
Оксиди сірки, т/рік	26,92	56,00	74,64	95,52	105,01	112,00
Оксиди азоту, т/рік	0,873	1,82	2,42	3,10	3,40	3,63

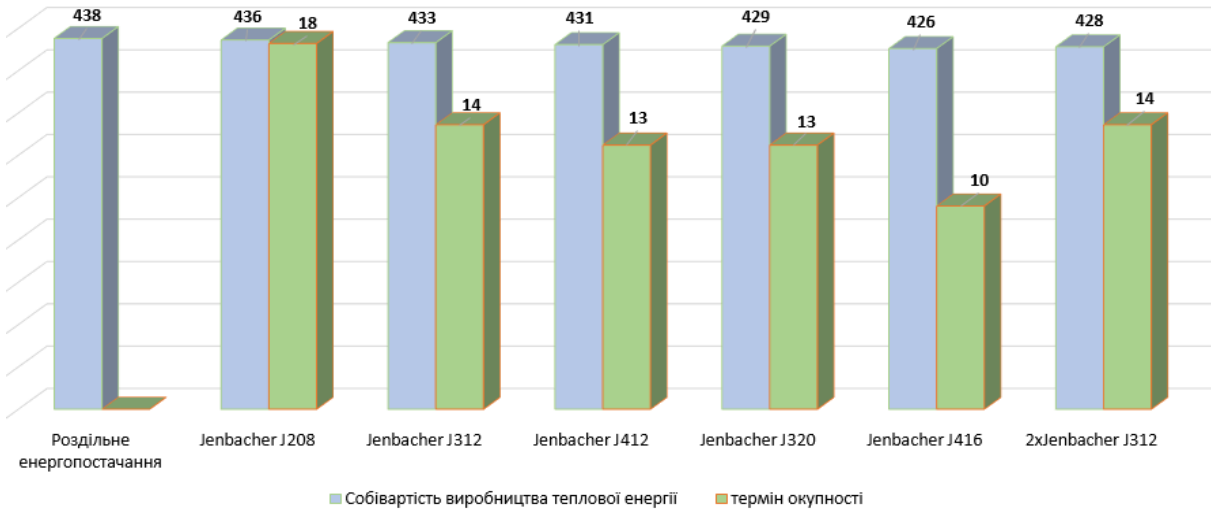


Рис. 2. Собівартість виробленої теплової енергії (грн/ГДж) від котельні з КГУ та термін окупності капіталовкладень на встановлення когенераційних установок у водогрійній котельні

На економічну доцільність впровадження газопоршневих когенераційних установок в системах централізованого тепlopостачання суттєвий впливає співвідношення цін на електричну енергію та на природний газ. В розрахунках котельні взято, що ціна електроенергії $V_{ee} = 6,84$ грн/(кВт·год), а середньозважений тариф на природний газ $V_g = 9$ грн/м³. З урахуванням теплоти згорання природного газу 34 МДж/м³ співвідношення цін 1 кВт·год електроенергії та газу становить $V_{ee}/V_g = 6,84/(9/(34000/3600)) = 7,18$, тобто для цього підприємства електроенергія в 7,18 рази дорожча ніж природний газ. Водночас комерційна ціна газу становить 24 грн/м³, тоді співвідношення цін електроенергії та природного газу дорівнює 2,7.

Проведено дослідження техніко-економічних показників водогрійної котельні централізованого тепlopостачання зі встановленням когенераційної установки Jenbacher J320 для різних співвідношень ціни на електроенергію та на комерційний природний газ. Результати числових досліджень показані на рис. 3.

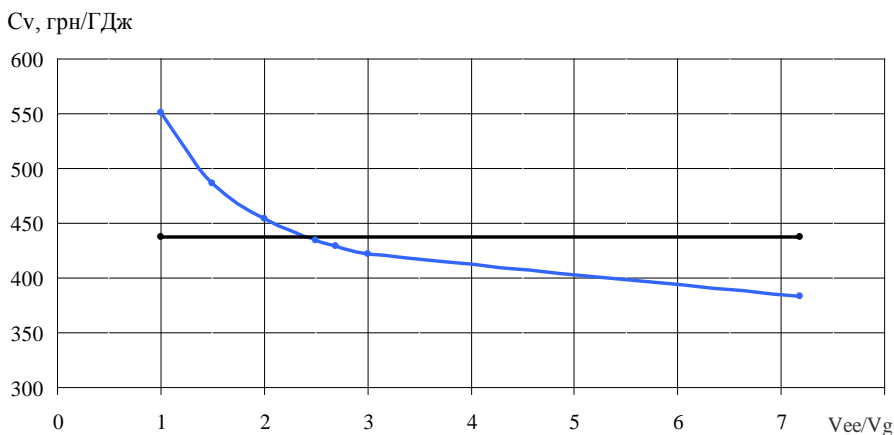


Рис. 3. Результати дослідження впливу співвідношення цін електроенергії та комерційного природного газу на собівартість вироблення теплоти котельнею з когенераційною установкою

Отже, використання газопоршневої когенераційної установки для покриття власних потреб в електроенергії джерела системи централізованого тепlopостачання, стає економічно доцільним у разі співвідношення ціни 1 кВт·год електроенергії та природного газу більше ніж 2,4.

Використання когенераційних установок для забезпечення власних електричних потреб котельні зумовлює економію умовного палива, відповідне зменшення шкідливих викидів в порівнянні з роздільною схемою енергопостачання, стабілізацію роботи та зменшення навантаження на енергосистему країни. Прогнозовано, що зі збільшенням частки відновлюваних джерел енергії в енергосистемі потреба у надійних високоманеврених когенераційних станціях зростатиме.

Висновки

Показано, що сучасні когенераційні установки забезпечують економію палива в масштабах держави, підвищують енергоефективність великої енергетики в зимовий період року, що зі свого боку сприяє декарбонізації енергетичної галузі та сповільненню процесів глобального потепління, забезпечують енергонезалежність країни і є важливими джерелами маневреної потужності для балансування енергосистеми.

Проведено числові дослідження ефективності встановлення когенераційної газопоршневої установки на базі двигунів Jenbacher для часткового або повного забезпечення власних електричних потреб водогрійної котельні. Визначено, що економія умовного палива становить 1,7...7,3 % для когенераційної системи в порівнянні з роздільною схемою енергопостачання, де за основу взяті показники ефективності вугільних теплових електричних станцій. При цьому річне зменшення валових викидів діоксиду вуглецю, оксидів сірки та оксидів азоту в разі встановлення двигуна Jenbacher J320 на базі опалювальної водогрійної котельні становитиме 3139,45 т/рік, 95,52 т/рік та 3,10 т/рік відповідно.

Досліджено вплив співвідношення цін електроенергії та комерційного природного газу на техніко-економічні показники котельні з когенераційною установкою Jenbacher J320. Визначено, що використання когенераційної установки для покриття власних електричних потреб економічно доцільно у разі співвідношення цін електроенергії та природного газу більше ніж 2,4.

За результатами досліджень виявлено, що за середньозваженої ціни природного газу для вироблення теплоти 9 грн/м³ і ціни газу для вироблення електроенергії 24 грн/м³ використання газопоршневої когенераційної установки економічно доцільно, але має великий терміни окупності інвестицій. За рахунок роботи КГУ можна отримати низку переваг, які не враховані на цьому етапі моделювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] International Energy Agency (IEA), *Energy Efficiency*. [Electronic resource]. Available: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency>.
- [2] S. Kusch, *Cogeneration (combined heat and power production) in Europe*. [Electronic resource]. Available: http://www.sigrid.de/mediapool/55/553823/data/Cogeneration_combined_he.pdf.
- [3] *Цілі сталого розвитку: Україна* (Національна Доповідь 2017). [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf>.
- [4] *Теоретико-прикладні аспекти декарбонізації та розвитку розподіленої електроенергетики України*, кол. моногр., М. О. Кизим, Ред. Харків: ФОП Лібуркіна Л. М., 2020, 344 с.
- [5] Г. Б. Варламов, Г. М. Любчик, і В. А. Маляренко, *Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії*, підруч. Київ, Україна: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2003, 232 с.
- [6] Г. Г. Півняк, і Ф. П. Шкрабець, *Альтернативна енергетика в Україні*. Дніпропетровськ, Україна: НГУ, 2013, 109 с.
- [7] Т. І. Скібіна, «Організаційно-економічний механізм стимулювання розвитку когенераційного виробництва енергії в Україні», *Економіка та держава*, № 2, с. 136-140, 2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.economy.in.ua/pdf/2_2015/31.pdf.
- [8] І. О. Казарова, «Підвищення ефективності систем енергопостачання за рахунок впровадження когенерації.» дис. канд. техн. наук., Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Харків, 2018.
- [9] Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу» зі змінами, внесеними Законом України від 21.10.2021. *N 1818-IX*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2509-15#Text>.
- [10] *Енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text>.
- [11] Закон України «Про енергетичну ефективність» зі змінами, внесеними Законом України від 03.11.2022 *№ 2710-IX*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>.
- [12] С. Й. Ткаченко, М. М. Чепурний, і Д. В. Степанов, *Розрахунки теплових схем і основи проектування джерел тепlopостачання*, навч. посіб. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2005, 137с.

[13] М. М. Чепурний, і С. Й. Ткаченко, *Енергозбережні технології в теплоенергетиці*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2009, 114 с.

[14] О. Г. Лялюк, *Економіка енергетики : практикум*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2009, 118 с.

[15] *Когенераційні установки JENBACHER*. Технічні характеристики. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.kts-eng.com/product/jenbacher-j-412-b09/>. Дата звернення 10.02.2023.

[16] ГКД 34.02.305-2002. *Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення*. Чинний від 2002-07-01. Київ, 2002.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 10.04.2023

Степанов Дмитро Вікторович — канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри теплоенергетики, stepanovdv@ukr.net ;

Резидент Наталія Володимирівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, rezidentnv1@ukr.net .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

D. V. Stepanov¹
N. V. Rezydent¹

Efficiency of Gas-Piston Cogeneration Facilities in the Systems of Centralized Heat Supply

¹Vinnitsia National Technical University

The process of simultaneous production of thermal and electric energy has greater energy efficiency compared to a separate energy supply scheme, when thermal energy is produced in steam or water-heating boiler houses, and electric energy is supplied from centralized sources — thermal power stations, that contributes to the decarbonization of the energy industry and the slowing down of global warming processes.

The implementation of combined energy supply in centralized heat supply systems provides advantages in terms of diversification and reliability of heat and electric energy supply, reducing the load on the combined power grid, reducing nonuniform loading of the electric power system, and strengthening the country's energy independence.

Water-heating boiler house of a centralized heat supply system was chosen as the object of the study. Conventional fuel saving in case of installation of Jenbacher gas-piston engines on the base of the heating water boiler house was determined. It is shown that the conventional fuel economy is 1.7 %...7.3 % for the cogeneration system in comparison with the separate power supply scheme, which is based on the efficiency indicators of coal-fired thermal power stations. The annual reduction of gross emissions of carbon oxides, sulfur oxides and nitrogen oxides into the environment in case of implementation of decentralized cogeneration was determined.

The effect of the ratio of prices for gas and electricity on the economic efficiency of combined production of heat and electricity using natural gas is determined. It is shown that the use of a cogeneration plant to cover own electrical needs is economically feasible for a price ratio of electric energy and natural gas greater than 2.4. It has been confirmed that cogeneration is economically feasible, but has significant investment payback periods.

Keywords: cogeneration, electric energy, thermal energy, gas piston engine, decarbonization, water heating boiler, energy efficiency.

Stepanov Dmytro V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Chair of Thermal Power Engineering, e-mail: stepanovdv@ukr.net ;

Rezydent Nataliia V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Thermal Power Engineering, e-mail: rezidentnv1@ukr.net