

**О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, О. В. ВЛАСЕНКО**

## **ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ В ГАЗОВИХ ТУРБІНАХ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ТЕПЛОВОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ**

У сучасних розвинених країнах світу на вироблення електричної енергії та теплоти низького та середнього потенціалу витрачається основна частина видобутих паливно-енергетичних ресурсів. В Україні потенціал виробництва біометану оцінюється в 7,8 млрд м<sup>3</sup>/рік, що складає 25 % нинішнього споживання природного газу в країні. Інфраструктура України готова до транспортування і енергетичного використання біометану, оскільки біометан є повним аналогом природного газу. При зберіганні органічних відходів («біовідходів») – наприклад, органічної частини побутових відходів – виділяється біогаз, суміш метану та вуглекислого газу. Цей газ є високоякісним паливом для газових двигунів або газових турбін – так само, як метантенційний газ, що виробляється з біомаси на очисних спорудах. Біогаз може замінити викопне паливо, а також характеризується своєю нейтральністю CO<sub>2</sub>. Біогаз можна спалювати на місці, практично не переробляючи, щоб обігрівати будівлі та житити котли чи навіть сам реактор. Біогаз можна використовувати для комбінованого виробництва теплоти та електроенергії, можна просто перетворити на електроенергію за допомогою двигуна внутрішнього згорання, паливних елементів або газової турбіни, при цьому отримана електроенергія використовується на місці або продається в електричну мережу. Врахувавши переваги використання біогазу, а також цінову політику на природний газ, в дослідженні проведено розрахунок теплової схеми державної районної електростанції. Як основне паливо використовується природний газ, для порівняння вибрано біогаз. Питома теплота згорання біогазу майже вдвічі менша за природний газ. Працюючи на біогазі, коефіцієнт корисної дії газотурбінної установки менший на 8,5 %, парогазової установки – на 7,5 %, ніж на природному газі. Так як в еквіваленті 1000 м<sup>3</sup> природного газу дорівнює 1500 м<sup>3</sup> біогазу, введено коефіцієнт врахування на біогаз. На основі відповідного дослідження сформовано висновки щодо використання біогазу, як альтернативи природному газу. Актуальністю використання біогазу для виробництва теплової та електричної енергії є забезпечення перспективного джерела електроенергії і зниження викидів вуглекислого газу.

**Ключові слова:** біомаса, біогаз, паливо, газова турбіна, парова турбіна, когенераційна установка.

**O. CHERNOUSENKO, O. VLASENKO**

## **USE OF BIOGAS IN GAS TURBINES FOR THE PRODUCTION OF HEAT AND ELECTRICITY**

In the modern developed countries of the world, the main part of the extracted fuel and energy resources is spent on the production of electricity and heat of low and medium potential. In Ukraine, the biomethane production potential is estimated at 7.8 billion m<sup>3</sup>/year, which is 25 % of the current natural gas consumption in the country. The infrastructure of Ukraine is ready for transportation and energy use of biomethane, as biomethane is a complete analogue of natural gas. When storing organic waste ("bio-waste") – for example, the organic part of household waste - biogas, a mixture of methane and carbon dioxide, is released. This gas is a high-quality fuel for gas engines or gas turbines - just like methane gas produced from biomass in sewage treatment plants. Biogas can replace fossil fuels and is also characterized by its CO<sub>2</sub> neutrality. Biogas can be burned on-site with little to no processing to heat buildings and power boilers or even the reactor itself. Biogas can be used for combined heat and power generation, can be simply converted to electricity using an internal combustion engine, fuel cells or gas turbine, with the resulting electricity being used on-site or sold into the electricity grid. Taking into account the advantages of using biogas, as well as the price policy for natural gas, the study carried out a calculation of the thermal scheme of the state district power plant. Natural gas is used as the main fuel, biogas was chosen for comparison. The specific heat of combustion of biogas is almost half that of natural gas. When operating on biogas, the efficiency of a gas turbine installation is 8.5 % lower, and that of a steam-gas installation is 7.5 % lower than on natural gas. Since 1000 m<sup>3</sup> of natural gas is equivalent to 1,500 m<sup>3</sup> of biogas, a biogas accounting factor has been introduced. On the basis of the relevant research, conclusions were drawn regarding the use of biogas as an alternative to natural gas. The relevance of the use of biogas for the production of heat and electricity is to provide a promising source of electricity and reduce carbon dioxide emissions.

**Key words:** biomass, biogas, fuel, gas turbine, steam turbine, cogeneration plant.

### **Вступ**

За даними Європейського агентства з навколишнього середовища та Агентства з охорони навколишнього середовища США, глобальні викиди антропогенних парникових газів різко зросли за останні кілька років. Через наслідки для світової економіки та життя людей пом'якшення глобального потепління є одним із основних невідкладних засобів боротьби зі зміною клімату та його наслідками, яке було проголошено відповідно до цілі сталого розвитку у статутах ООН.

Розвиток ринку біогазу в Україні дозволить замінити 2,6 – 18 млрд м<sup>3</sup> природного газу на рік, що сприятиме економічному розвитку регіонів, посиленню енергетичної безпеки країни, дозволить покривати пікові навантаження в електромережі, створенню нових робочих місць [1].

Перспективні звичайні енергетичні технології підвищили ефективність використання енергії, але не покращили стан навколишнього середовища – термічне, хімічне та радіоактивне забруднення навколишнього середовища з потенційно катастрофічними наслідками. Негативна тенденція розвитку традиційної енергетики в основному зумовлена існуванням двох факторів – швидкого виснаження природних ресурсів та забруднення навколишнього середовища. За даними ООН, очікується, що запаси вугілля будуть вичерпані між 2082-2500 роками. У зв'язку з цим, з одного боку, необхідно знайти можливості для раціонального використання традиційних енергоресурсів, а з іншого боку, необхідно розвивати науково-технічну роботу з використання нетрадиційної та відновлюваної енергії [2].

Біогаз – це горюча газова суміш, що утворю-

© О. Ю. Черноусенко, О. В. Власенко, 2024

ється під час анаеробного зброджування органічної речовини в анаеробному біогазовому реакторі. Біогаз можна рекуперувати та використовувати безпосередньо для приготування їжі та освітлення, або його можна перетворити на теплоту в системі газового обігрівача чи в комбіновану теплоту та електроенергію (CHP) у когенераційній установці (MES та ін. 2003; JENSSSEN та ін. 2004; WRAPAI 2009). Під час анаеробного зброджування відходи обробляються та розкладаються, а також утворюється біогаз. Анаеробне очищення також має перевагу перед аеробним очищенням у меншому викиді парникових газів. Тому біогаз є відновлюваним зеленим джерелом енергії [2].

В еквіваленті 1000 м<sup>3</sup> природного газу дорівнює 1500 м<sup>3</sup> біогазу [3].

Метан є цінним компонентом з точки зору використання біогазового палива. Теплотворна здатність біогазу становить близько 6 кВт год/м<sup>3</sup>, що відповідає приблизно половині літра дизельного пального і може використовуватися безпосередньо як джерело теплоти або для виробництва електроенергії. У всіх випадках біогаз повинен бути осушений і очищений перед спалюванням; інакше це може пошкодити газовий двигун.

Біомаса привернула значну увагу як потенційна заміна викопного палива у виробництві теплоти та електроенергії, оскільки вона дозволяє диверсифікувати природний газ, зменшити вплив на навколишнє середовище [4].

Біогаз можна використовувати декількома способами, як сирій біогаз або оновлений біометан. Проблема з використанням біогазу як палива полягає у потребі в газі очищення для відповідності вимогам якості до утилізаційного обладнання. Використання неочищеного біогазу може збільшити вимоги до обслуговування обладнання, що працює на біогазі, і може скоротити термін його служби. Як необхідна умова для ефективного використання біогазу, його потрібно охолоджувати, дренажувати і сушити одразу після виробництва, щоб зменшити конденсацію та очистити від H<sub>2</sub>S [4].

З використанням біогазу актуальним є забезпечення перспективного джерела електроенергії і зниження викидів CO<sub>2</sub>.

Біометан, як близький аналог природного газу, може використовуватися для виробництва теплової і електричної енергії, як паливо для транспорту, а також як сировина для хімічної промисловості [1].

Існують різні види технологій для перетворення хімічної енергії біогазу в механічну, теплову та електричну енергію. Хімічна енергія горючих газів перетворюється на механічну енергію в системі контрольованого згоряння за допомогою теплового двигуна. Потім ця механічна енергія активує генератор для виробництва електроенергії. Найпоширенішими тепловими двигунами, які ви-

користуються для перетворення енергії біогазу, є газові турбіни, які є двигунами внутрішнього згоряння (наприклад, газові турбіни, поршневі двигуни) та двигуни зовнішнього згоряння (наприклад, двигуни Стірлінга) [2].

Масштабні біогазові установки майже завжди є когенераційними установками на основі газових турбін. Механічна енергія, вироблена в таких установках, завжди надходить від тиску, пов'язаного зі зміною температури газу. Необхідний температурний розрив може лежати як у високому, так і в низькому діапазоні температур. Наприклад, установки циклу топінгу в основному виробляють електроенергію з парової турбіни на основі низькотемпературного циклу (WRAPAI 2009): теплота від згоряння біогазу активує парову турбіну, відпрацьована пара конденсується, а низькотемпературна теплота виділяється з неї, конденсат використовується для централізованого опалення. Установки нижнього циклу виробляють високотемпературну теплоту для промислових процесів. Потім котел-утилізатор живить парову електростанцію [2].

Типовими великомасштабними когенераційними установками для конверсії біогазу є: газові турбіни, що виробляють електроенергію та використовують відхідну теплоту; газові двигуни з використанням поршневого двигуна; електростанції комбінованого циклу (ПГУ), адаптовані для ТЕЦ; паротурбінні ТЕЦ, які використовують систему опалення як конденсатор пари для парової турбіни [2].

Відповідно до науково-технічних прогнозів на перспективу, конверсія біомаси є найпоширенішим енергетичним ресурсом серед відновлюваних джерел енергії [3].

Перехід енергетичної системи до більш широкого використання відновлюваної енергії є передумовою для передбаченого скорочення викидів парникових газів. Використання відновлюваних джерел енергії зросло в усьому світі за останнє десятиліття, причому біомаса є найважливішим джерелом, що покриває 10 % загального світового попиту на первинну енергію. Біомаса є відновлюваним джерелом вуглецю, яке використовує процес фотосинтезу для отримання вуглеводнів. Найбільш відповідними ресурсами біомаси для біоенергетики є енергетичні культури, відходи та побічні продукти лісового, сільського господарства, деревини та харчової промисловості, відходи садівництва та ландшафтного господарства, а також органічні відходи промисловості та кінцевих споживачів. Загалом, усі ці відновлювані джерела вуглеводнів можна використовувати для заміни всіх видів викопного палива, включаючи природний газ, рідке паливо та вугілля [5] – [7].

Завдяки значно вищій ефективності перетворення біомаса здатна виробляти майже 70% вто-

ринної енергії. Електроенергія, сучасні когенераційні установки і біопаливо для транспортного сектору становлять незначний внесок і використовуються особливо в країнах, які прагнуть використовувати відновлювані джерела енергії. Сьогодні ці потужності часто працюють цілий рік із повним навантаженням, виробляючи біопаливо або біоенергію, незалежно від фактичного попиту на енергію та ситуації з постачанням. Перехід енергетичної системи кардинально змінить цю картину: збільшення використання сонячної та вітрової енергії потребує забезпечення електроенергією з біомаси в періоди недостатньої швидкості вітру або недостатнього сонячного світла; використання різних відновлюваних джерел у поєднанні одне з одним також може мати місце в секторі теплопостачання,

наприклад, комбіноване використання систем біомаси та сонячних колекторів, тоді як у сфері біопалива комбіноване забезпечення біопалива та інших продуктів біомаси буде мати вищий інтерес [8], [9].

Хімічний склад біогазу, отриманого на біогазових заводах, представлений метаном та діоксидом вуглецю з незначним вмістом сірководню та аміаку. У біогазі також є сліди таких елементів, як водень, азот, монооксид вуглецю. Газова суміш насичена водяною парою, в ній також можуть бути частинки пилу.

Склад біогазу: 55 % – 75 % метану, 25 % – 45 % CO<sub>2</sub>, незначні домішки водню (H<sub>2</sub>) і сірководню (H<sub>2</sub>S), азоту, ароматичних вуглеводнів, галогено-ароматичних вуглеводнів (табл. 1) [10].

Таблиця 1 – Склад і властивості біогазу

Показник	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	Суміш 60 % CH <sub>4</sub> + 40 % CO <sub>2</sub>
Об'ємна частка, %	55 – 70	27 – 44	1	3	100
Об'ємна теплота згорання, МДж/м <sup>3</sup>	35,8	10,8	22,8	–	21,5
Температура займання, °С	650 – 750	–	585	–	650 – 750
Щільність нормальна, г/л	0,72	1,98	0,09	1,54	1,2
Щільність критична, г/л	102	408	31	349	320

### Мета роботи

Метою роботи є обґрунтування використання біогазу в газових турбінах для виробництва теплової та електричної енергії, а також порівняння роботи газової та парової турбіни на природному газі і біогазі.

### Виклад основного матеріалу

Отриманий в результаті метанового бродіння біогаз, після відповідної технологічної сепарації (поглинання і використання на інші технологічні потреби наявного вуглекислого газу) перевершує природний газ за теплотворністю. Отримання промислового біогазу рослинного і тваринного походження можливе за рахунок їх зброджування (метанового бродіння) з отриманням метану і знезаражених органічних добрив [10].

Вироблений біогаз використовують для наступних технічних рішень [10]:

1) *Виробництво теплової енергії.* Для отримання теплоти під час використання біогазу необхідні спеціальні пальники. Найчастіше використовується комбінація біогазу з природним газом.

2) *Комбіноване виробництво електричної і теплової енергії.* Для комбінованого виробництва теплової і електричної енергії використовуються когенераційні установки (рис. 1), в яких біогаз у двигуні внутрішнього згорання перетворюється на електричну енергію, а охолодження двигуна і відхідних газів дозволяє отримати теплову енергію.

Загальний коефіцієнт корисної дії когенераційних установок знаходиться в межах 85 % – 90 % використаної енергії [11].

3) *Паливні елементи.* Паливні елементи виробляють електричну і теплову енергію з водню та кисню. Проводяться наукові дослідження з використання очищеного біогазу.

4) *Газова турбіна.* Використовуються газові мікротурбіни у вигляді комбінованих теплоенергетичних установок потужністю до 200 кВт для децентралізованого енергозабезпечення (рис. 2). Вони характеризуються малою емісією, низьким рівнем шуму та низькою вартістю обслуговування. Паливом можуть бути природний газ, біогаз, скрапленний газ, мазут.

Системи метантенків використовуються здебільшого на підприємствах, які мають доступ до великої кількості вихідної сировини, яка виділяє метан під час свого розкладання. Однією з унікальних особливостей цього типу газоподібної біомаси є те, що її можна використовувати як для виробництва пари, так і як паливо для газових турбін.

Як працює газова турбіна (рис. 2): після того, як газ розширюється через турбіну, остаточне розширення забезпечує вихлопний дифузор, який виходить під атмосферним тиском. Вихлопний дифузор додає близько 10 % загальної потужності двигуна [12]. Після розширення вихлоп містить велику кількість енергії. У випадку двигуна ОР 16 температура вихлопу становить близько 560 °С. Це хороша температура для підняття пари на про-

мислових процесах. Цей процес називається когенерацією (комбіноване виробництво теплоти та електроенергії) і є важливим засобом зменшення загального споживання палива, а отже, і викидів CO<sub>2</sub>. Використовуючи перевірену технологію радіальної газової турбіни, газова турбіна є компактною, ефективною та надійною промисловою газовою турбіною, призначеною для постачання електроенергії як на нафтогазовий, так і на промисловий ринки [12].



Рис. 1 – Когенераційна установка на біогазі [11]

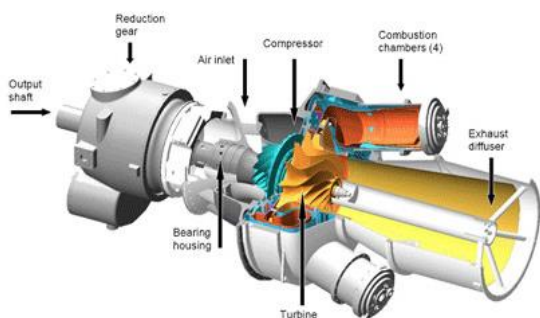


Рис. 2 – Газова турбіна для установок на біомасі [12]

5) *Мікротурбіни*. Мікротурбіни стали популярною альтернативою двигунам ІС завдяки спрощеному графіку технічного обслуговування, нижчому рівню шуму та викидам у повітря. Однак початкова вартість вища. Паливні елементи можуть бути варіантом у майбутньому, але витрати повинні знизитися, перш ніж вони стануть практичною альтернативою для використання на фермах. Когенераційні агрегати на основі мікротурбін або двигунів Стірлінга тільки зараз стають комерційно доступними. Обидва мають значно нижчі витрати на технічне обслуговування, оскільки заміна масла не потрібна. Наразі капітальні витрати на ці опції все ще на 60% вищі, ніж на двигуни ІС, але, за прогнозами, ці витрати різко впадуть з часом із збільшенням виробництва [13].

6) *Електростанція комбінованого циклу* (ПГУ) є, мабуть, найбільш значущим з економічної та екологічної точки зору прикладом інтенсифікації процесу (рис. 3). Його широке застосування подвоїло теплову ефективність виробництва електроенергії за останні два десятиліття. Газ стискають до досить високого тиску, щоб вуглекислий газ можна було видалити шляхом абсорбції аміну. Метан, що залишився, стискається до більш високого тиску та спалюється разом з повітрям у газовій турбіні згоряння на газопаровій електростанції комбінованого циклу [14]. Одним із напрямів підвищення енергетичної ефективності біогазових установок є застосування парогазових технологій.

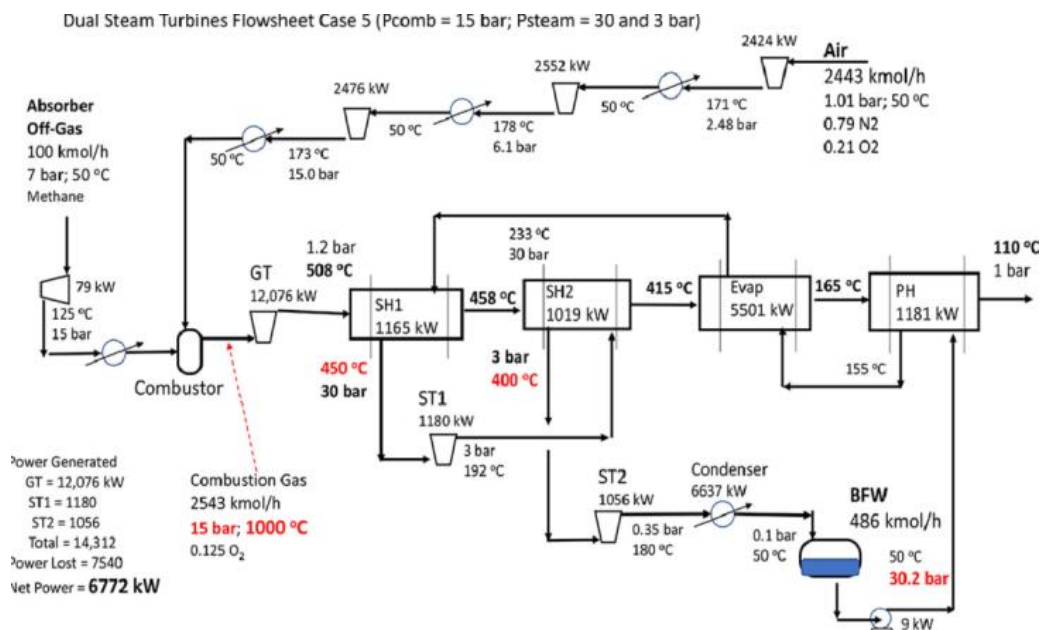


Рис. 3 – Електростанція комбінованого циклу [14]

Властивості біогазу є одним з головних параметрів, які впливають на придатність його використання як палива для двигуна когенераційної установки. Деякі властивості можуть значно підвищити ціну цілого проекту, або зробити його неможливим. Тому до оцінки біогазу слід приступати з повною відповідальністю [15]. За його оцінкою слід знати такі характеристики:

– вміст метану  $\text{CH}_4$  – 55 % – 65 %. Мінімальний вважається 50 % концентрація;

– тиск біогазу – тиск газу при спалюванні в когенераційній установці знаходиться в межах від 1,5 кПа до 10 кПа;

– постійність якості газу (константний склад і тиск біогазу) – впливає на стабільність роботи і кількість випускаємих емісій.

Біогаз, багатий на  $\text{CH}_4$ , широко використовується для заміни викопного палива через його відновлюваність. Він використовувався для виробництва теплоти, електроенергії, пари в житлових і промислових умовах, а також для введення в мережі природного газу. Крім того, він використовується в системах комбінованого виробництва теплоти та електроенергії, використовується як паливо для транспортних засобів, а також у застосуванні паливних елементів [16].

Парові турбіни для електростанцій на біомасі характеризуються високим ККД, відповідають останнім європейським вимогам щодо ефективності циклу та високої робочої гнучкості. Щоб відповідати цим вимогам, виробники газових турбін використовують широкий спектр уніфікованих компонентів, попередньо розроблених для цієї мети [8].

### Обговорення результатів

В роботі проведено розрахунок теплової схеми режиму для умов розташування майданчика будівництва державної районної електростанції (ДРЕС), температура зовнішнього повітря  $T_{\text{н.в}} = 10,3$  °С, тиск зовнішнього повітря  $P_{\text{н.в}} = 0,0997$  МПа, вологість  $\varphi_{\text{н.в}} = 70$  %. В табл. 2 вказано початкові дані для розрахунку.

Як основне паливо використовується природний газ. За існуючою схемою на ДРЕС надходить від газорозподільчої станції (ГРС) природний газ із розрахунковою тепловою згоряння  $8053$  ккал/м<sup>3</sup> (при 20 °С та 760 мм рт.ст.). ГРС розташована на відстані 4,5 км від ДРЕС.

Після ГРС газ високого тиску (0,6 МПа) двома газопроводами Ду 800 мм подається до газорозподільчих пунктів (ГРП) ГРП-1 і ГРП-2. Після ГРП газ середнього тиску (0,22 МПа) двома трубопроводами Ду 1220 мм підводиться головному корпусу. Від ГРП-1 газ підводиться до енергоблоків № 1 – 4, від ГРП-2 до енергоблоків № 5 – 8. На

вихідних колекторах ГРП-1, ГРП-2 передбачено перемичку, за допомогою якої газ від будь-якого ГРП може подаватися на будь-який з блоків.

Розрахунок теплової схеми у даному випадку проводиться поетапно. У першому етапі проводиться розрахунок газової турбіни. Мета розрахунку визначити економічність газової турбіни за заданих параметрів навколишнього середовища з урахуванням технологічних зв'язків її з паровою турбіною.

Далі проводиться перевірочний розрахунок парової турбіни. Особливості розрахунку полягають у збільшенні витрати пари через циліндр середнього тиску (ЦСТ) та циліндр низького тиску (ЦНТ). Збільшується потужність, що розвивається паровою турбіною.

Враховуються втрати потужності, пов'язані з витратою пари на ущільнення парової турбіни.

Визначено основні показники газової та парової турбін (рис. 4). В якості палива взято природний газ і біогаз. Біометан за нормальних умов є газоподібним паливом з теплотворною здатністю, близькою до природного газу (до 35 МДж/м<sup>3</sup>). Дані розрахунків наведено у табл. 3.

Розраховано основні параметри:

– електрична потужність ПГУ брутто та нетто;

– електричний ККД ПГУ брутто та нетто;

– питома витрата теплоти на вироблення електроенергії брутто та нетто;

– питома витрата умовного палива на відпуску електроенергії;

– витрати електроенергії та теплоти на власні потреби.

Аналізуючи розрахунки, очевидно, що питома теплота згоряння біогазу майже вдвічі менша за природний газ. Працюючи на біогазі, ККД ГТУ менше на 8,5 %, ККД ПГУ – на 7,5 %, ніж на природному газі.

Таблиця 2 – Початкові дані

Параметр	Величина
1 Тиск зовнішнього повітря, $P_{\text{атм}}$ , бар	0,997
2 Температура зовнішнього повітря, $t_{\text{нп}}$ , °С	10,3
3 Вологість зовнішнього повітря, $\varphi$ , %	70
4 Ступінь стиску в компресорі, $\epsilon$	17
5 Витрата продуктів горіння $G_{\text{пр.гор}}$ , кг/с	692,363
6 Температура відхідних газів із газової турбіни, $t_{\text{пр.гор}}$ , кг/с	573,3
7 Витрата палива в ГТУ, $G_{\text{пал}}$ , кг/с	15,18
8 Теплотворна здатність палива, $Q_{\text{р}}^{\text{н}}$ , кДж/кг	47170,8
9 Температура палива, $t_{\text{пал}}$ , °С	130
10 Тиск палива $P_{\text{пал}}$ , бар	30
11 ККД генератора, $\eta_{\text{ген}}$	0,9894



Також проведено розрахунок теплової схеми для розрахункового (базового) режиму за нормами МОН ISO2314:1989 (температура зовнішнього повітря  $T_{з.п.} = 15$  °С, тиск зовнішнього повітря  $P_{з.п.} = 0,1013$  МПа, вологість  $\phi_{з.п.} = 60$  %).

Паливо – природний газ та біогаз. Так як в еквіваленті 1 000 м<sup>3</sup> природного газу дорівнює 1500 м<sup>3</sup> біогазу, введено коефіцієнт врахування на біогаз  $\xi = 1,5$ .

Результати розрахунку наведено у табл. 4.

З табл. 4, із врахуванням коефіцієнту на біогаз  $\xi = 1,5$ , маємо ККД ГТУ і ПГУ менше в 1,6 рази, ніж на природному газі. Але потрібно зауважити, що біогаз екологічно чистий газ, який має значно менше вуглецеве навантаження. Цей газ є повновідновлюваною формою енергії та ідеально підходить для виробничих та промислових підприємств із енергоємними операціями. Виробництво біогазу дозволяє запобігти викидам метану в атмосферу.

Згідно із Законом України про енергозбереження, актуальним завданням є підвищення економічної ефективності енергетичних установок, які використовують альтернативні види палива.

Інфраструктура України вже на 100 % готова до транспортування біометану і енергетичного використання, оскільки біометан є повним аналогом природного газу. Залишаються незмінними газопроводи, газові котли, газові двигуни, газові електростанції, інше енергетичне обладнання, спроектоване для використання природного газу.

Наша країна має розвинену мережу газорозподільчих мереж і потужну газотранспортну мережу, що дає можливість виробникам біометану підключитися до газових мереж в більшості місць України.

Транспортування біометану газовими мережами і використання біометану в газовому обладнанні (газові пальники, двигуни, турбіни) не потребує витрат для їх модернізації.

Використання біогазу в якості палива зумовлено наступним [16]:

- висока вартість природного газу;
- великий об'єм відходів агропромислового комплексу, а також проблема очистки стічних вод;
- потреба у зменшенні викидів вуглекислих та парникових газів.

### Висновки

Підвищений інтерес до розвитку технологій відновлюваної енергетики був стимульований запровадженням законодавчих заходів у Європі щодо скорочення викидів CO<sub>2</sub> від виробництва електроенергії у відповідь на потенційну загрозу глобального потепління.

Аналізуючи переваги використання біогазу, як альтернативу природному газу, в роботі наводиться розрахунок теплової схеми державної рай-

онної електростанції, яка працює на природному газі, також теплову схему порівняно за умов роботи на біогазі. Працюючи на біогазі, коефіцієнт корисної дії газотурбінної установки менший на 8,5 %, парогазової установки – на 7,5 %, ніж на природному газі. Так як в еквіваленті 1000 м<sup>3</sup> природного газу дорівнює 1500 м<sup>3</sup> біогазу, введено коефіцієнт врахування на біогаз 1,5. Із врахуванням даного коефіцієнту, коефіцієнт корисної дії газотурбінної установки і парогазової установки менший в 1,6 рази, працюючи на біогазі, в порівнянні з природним газом.

Враховуючи переваги застосування біогазу для виробництва теплової та електричної енергії, а також результати розрахунків, очевидно, що використання високоефективної турбіни на біогазі може призвести до збільшення економії на експлуатації.

### Список літератури

1. Ткаченко С. Й. Біогазові технології. Регулярний тепловий режим : моногр. / С. Й. Ткаченко, О. В. Власенко. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 132 с. – ISBN-е 978-966-641-937-1. – ISBN 978-966-641-943-2. – URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/782> (дата звернення 05.05.2024).
2. Tkachenko S. Cooling and heating of the fluid in the cylindrical volume / S. Tkachenko, O. Vlasenko, N. Resident, D. Stepanov, N. Stepanova // Acta Innovations. – 2021. – No. 42.2 – P. 15–26. – DOI: <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.42.2>.
3. Гелетуха Г. Г. Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні / Г. Г. Гелетуха, П. П. Кучерук, Ю. Б. Матвеев // Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України. – 2014. – № 11. – 42 с. – URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/04/position-paper-uabio-11-ua.pdf> (дата звернення 05.05.2024).
4. Kaparaju P. 17 - Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells / P. Kaparaju, J. Rintala // The Biogas Handbook : Science, Production and Applications : Woodhead Publishing Series in Energy. – 2013. – P. 404–427. – DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857097415.3.404>.
5. Energy for a sustainable future // The Secretary-General's Advisory Group on Energy and Climate Change (AGECC) : Summary Report and Recommendations, 28 April 2010. – New York, 2010. – URL: [https://www.unido.org/sites/default/files/2010-05/AGECCsummaryreport\\_0.pdf](https://www.unido.org/sites/default/files/2010-05/AGECCsummaryreport_0.pdf) (дата звернення 05.05.2024).
6. Bringezu S. Assessing Global Land Use: Balancing Consumption with Sustainable Supply. A Report of the Working Group on Land and Soils of the International Resource Panel / S. Bringezu, H. Schütz, W. Pengue, M. O'Brien, F. Garcia, R. Sims, R. Howarth, L. Kauppi, M. Swilling, J. Herrick. – Nairobi : United Nations Environment Programme, 2014. – 131 p. – ISBN 978-92-807-3330-3.
7. Kaltschmitt M. Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren / M. Kaltschmitt, H. Hartmann, H. Hofbauer. – Berlin : Springer, 2009. – No. XXXI. – 1030 p. – ISBN 978-3-540-85094-6. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85095-3>.
8. Edenhofer O. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation / O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow. – New York : Cambridge University Press, 2012. – ISBN 978-1-107-02340-6.

9. Faaij A. A General Introduction to International Bioenergy Trade / A. Faaij, M. Junginger, C.S. Goh // International Bioenergy Trade. Lecture Notes in Energy. – 2014. – Vol. 17. – PP. 1–15. – ISBN 978-94-007-6982-3. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-6982-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6982-3_1).
10. Біогаз / BITECO. – URL: <https://biteco-energy.com/ua/info/biogas/> (дата звернення 05.05.2024). – Назва з екрану.
11. Біогазові установки. Когенераційні установки, міні-ТЕЦ TESSARI Energia (Італія) на біогазі / Energy Systems-Ludger SC. – URL: <http://www.esludger.com.ua/uk/Kogeneratsiyini-ustanovki/kogeneratsiyini-ustanovki-mini-tets-na-biogazi-biogazovi-ustanovki.html> (дата звернення 05.05.2024). – Назва з екрану.
12. Turbine using biogas or gas or any liquid fuel / Neptune Oil and Gas Pte Ltd. – URL: <https://neptune-og.com/turbine-using-biogas-or-gas-or-any-liquid-fuel/> (дата звернення 05.05.2024). – Назва з екрану.
13. Vandeweyer H. Biomethaan – opwerking van biogas tot aardgaskwaliteit / H. Vandeweyer, R. Baert, E. Ryckebosch, J. Leenknecht, M. Drouillon and H. Vervaeren. – Howest : Departement PIH, 2008. – 176 p. – ISBN 9789081355209.
14. Luyben, W.L. Dual steam turbines in biogas power processes / W.L. Luyben // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. – 2023. – Vol. 190. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109412>.
15. About biogas and biomethane / European Biogas Association. – URL: <https://www.europeanbiogas.eu/about-biogas-and-biomethane/> (дата звернення 05.05.2024). – Назва з екрану.
16. Steam Turbines For Biomass Power Plants / DOOSAN – URL: <https://www.doosanskodapower.com/en/power-generation/power-generation/steam-turbines-for-biomass-power-plants/> (дата звернення 05.05.2024). – Назва з екрану.
5. (2010), “Energy for a sustainable future”, *The Secretary-General’s Advisory Group on Energy and Climate Change (AGECC) : Summary Report and Recommendations*, 28 April 2010, New York, Access mode: URL: [https://www.unido.org/sites/default/files/2010-05/AGECCsummaryreport\\_0.pdf](https://www.unido.org/sites/default/files/2010-05/AGECCsummaryreport_0.pdf) (accessed 05 May 2024).
6. Bringezu S., Schütz H., Pengue W., O’Brien M., Garcia F., Sims R., Howarth R., Kauppi L., Swilling M., Herrick J. (2014), *Assessing Global Land Use: Balancing Consumption with Sustainable Supply. A Report of the Working Group on Land and Soils of the International Resource Panel, United Nations Environment Programme*, Nairobi, 131 p., ISBN 978-92-807-3330-3.
7. Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H. (2009), *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*, Springer, Berlin, no. XXXI, 1030 p., ISBN 978-3-540-85094-6, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85095-3>.
8. Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Seyboth K., Matschoss P., Kadner S., Zwickel T., Eickemeier P., Hansen G., Schlömer S., von Stechow C. (2012) *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, Cambridge University Press, New York, ISBN 978-1-107-02340-6.
9. Faaij A., Junginger M., Goh C.S. (2014), “A General Introduction to International Bioenergy Trade”, *International Bioenergy Trade. Lecture Notes in Energy*, vol. 17, pp. 1–15, ISBN 978-94-007-6982-3, [https://doi.org/10.1007/978-94-007-6982-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6982-3_1).
10. BITECO (2013), *Biogas*, Access mode: <https://biteco-energy.com/ua/info/biogas/> (accessed 05 May 2024).
11. Energy Systems-Ludger SC (2022), *Biogas plants. Cogeneration plants, mini CHP plant TESSARI Energia (Italy) on biogas*, Access mode: <http://www.esludger.com.ua/uk/Kogeneratsiyini-ustanovki/kogeneratsiyini-ustanovki-mini-tets-na-biogazi-biogazovi-ustanovki.html> (accessed 05 May 2024).
12. Neptune Oil and Gas Pte Ltd (2019), *Turbine using biogas or gas or any liquid fuel*, Access mode: <https://neptune-og.com/turbine-using-biogas-or-gas-or-any-liquid-fuel/> (accessed 05 May 2024).
13. Vandeweyer H., Baert R., Ryckebosch E., Leenknecht J., Drouillon M., Vervaeren H. (2008), *Biomethaan – opwerking van biogas tot aardgaskwaliteit*, Departement PIH, Howest, 176 p., ISBN 9789081355209.
14. Luyben, W.L. (2023), “Dual steam turbines in biogas power processes”, *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, vol. 190, <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109412>.
15. European Biogas Association (2024), *About biogas and biomethane*, Access mode: <https://www.europeanbiogas.eu/about-biogas-and-biomethane/> (accessed 05 May 2024).
16. DOOSAN (2024), *Steam Turbines For Biomass Power Plants*, Access mode: <https://www.doosanskodapower.com/en/power-generation/power-generation/steam-turbines-for-biomass-power-plants/> (accessed 05 May 2024).

#### Reference (transliterated)

1. Tkachenko S., Vlasenko O. (2023), *Biogazovi tehnologii'. Reguljarnyj teplovij rezhim* [Biogas technologies. Regular thermal regime], VNTU, Vinnytsia, 132 p., ISBN-e 978-966-641-937-1, ISBN 978-966-641-943-2, Access mode: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/782> (accessed 05 May 2024).
2. Tkachenko S., Vlasenko O., Resident, N., Stepanov D., Stepanova N. (2021), “Cooling and heating of the fluid in the cylindrical volume”, *Acta Innovations*, no. 42.2, pp. 15–26. <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.42.2>.
3. Geletukha G., Kucheruk P., Matveev Yu. (2014), “Prospects of Biomethane Production and Use in Ukraine”, *UABio*, no. 11, 42 p., Access mode: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/04/position-paper-uabio-11-en.pdf> (accessed 05 May 2024).
4. Kaparaju P., Rintala J. (2013), “17 - Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells”, *The Biogas Handbook : Science, Production and Applications : Woodhead Publishing Series in Energy*, pp. 404–427, <https://doi.org/10.1533/9780857097415.3.404>.

Надійшло (received) 05.05.2024

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Черноусенко Ольга Юрійвна (Chernousenko Olga)** – доктор технічних наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського, завідувач кафедри теплової та альтернативної енергетики; м. Київ; тел.: (050) 413–40–50; e-mail: [chernousenko20a@gmail.com](mailto:chernousenko20a@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>. Scopus 6507954096.

**Власенко Ольга Володимирівна (Vlasenko Olga)** – доктор філософії (phd), КПІ ім. Ігоря Сікорського, асистентка кафедри теплової та альтернативної енергетики; м. Київ; тел.: (096) 565–76–07; e-mail: [olgakysak7@gmail.com](mailto:olgakysak7@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8975-0873>.