

УДК 536.46:662.61
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).17](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).17)

EFFICIENCY OF SAVING NATURAL GAS BY REPLACING IT WITH ARTIFICIALLY GENERATED GAS FUELS

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКОНОМІЇ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЙОГО ЗАМІЩЕННІ АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ГАЗОВИМИ ПАЛИВАМИ

Yurii I. Novosad¹
Novosad777.mon1@gmail.com
ORCID: 0009-0001-4619-8302
Mykyta V. Vorobiov^{1,2}
vorobiov.nikv@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9621-7658

Ю. І. Новосад¹,
аспірант
М. В. Воробйов^{1,2},
канд. техн. наук, доцент

¹ *National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv*

² *Thermal Energy Technology Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

¹ *Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

² *Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України, м. Київ*

Abstract. The article develops an approach to solving the problem of fuel gas substitution, within the framework of studying the possibility of saving natural gas by replacing it with alternative gas fuels.

The purpose of the study is to assess the possible savings of natural gas when replacing it with alternative low-calorie gas fuels. The proposed approach should take into account the combustion characteristics of alternative gas fuels, their energy potential, and the technological conditions of fuel-using equipment.

Research methodology. The work uses computational and theoretical methods based on the basic concepts of equilibrium thermodynamics and the determination of the main fire-technical characteristics of gas fuels.

Results. According to the calculations performed using the proposed approach, the savings in natural gas when it is partially replaced by alternative gas fuels are significantly lower than those estimated using the traditional balance method of calculating fuel replacement. At the same time, with an increase in the share of alternative low-calorie gas in a mixture with natural gas and an increase in the operating temperature, the savings in natural gas decrease compared to the results of its determination using the traditional approach.

Scientific novelty. The proposed approach to fuel substitution is based on maintaining useful heat energy directly inside the combustion chamber and takes into account the second law of thermodynamics. This approach allows not only to evaluate the energy potential of alternative gaseous fuels, but also to quantitatively determine their suitability for partial or complete replacement of natural gas in specific technological conditions.

Practical significance. The proposed approach to fuel substitution can be applied to various fuel-oxidizer mixtures; it allows taking into account the temperature and energy limitations of the fuel-oxidizer mixture, which is critical for high-temperature processes when determining natural gas savings during its substitution.

Key words: natural gas savings; alternative gas fuels; energy and thermal installations; fuel substitution.

Анотація. В статті розвинуто підхід щодо вирішення проблеми заміщення паливних газів, в рамках вивчення можливості економії природного газу шляхом його заміщення альтернативним газовим паливом.

Мета дослідження полягає в оцінці можливої економії природного газу при заміщенні на альтернативні низькокалорійні газові палива. Запропонований підхід має враховувати характеристики горіння альтернативних газових палив, їх енергетичний потенціал та технологічні умови паливо-використовуючого обладнання.

Методика дослідження. В роботі використано розрахунково-теоретичні методи, які базуються на основних поняттях рівноважної термодинаміки та визначення основних вогнетехнічних характеристик савлювання газових палив.

Результати. Згідно проведених розрахунків за запропонованим підходом економія природного газу при його частковому заміщенні альтернативним газовим паливом виявляється значно меншою, ніж це впливає з оцінок традиційного балансового методу розрахунку заміщення палив. При цьому, із збільшенням долі альтернатив-

ного низькокалорійного газу в суміші з природним газом та підвищенням робочої температури економія природного газу зменшується в порівнянні з результатами її визначення за традиційним підходом.

Наукова новизна. Запропонований підхід до заміщення палив базується на підтриманні корисно засвоєної теплової енергії безпосередньо всередині топочної камери та враховує положення другого закону термодинаміки. Такий підхід дозволяє не лише оцінювати енергетичний потенціал альтернативних газоподібних палив, але і кількісно визначати їхню придатність для часткового або повного заміщення природного газу у конкретних технологічних умовах.

Практична значимість. Запропонований підхід до заміщення палив можна застосовувати до різних паливо-окиснювальних сумішей, він дає змогу враховувати температурні та енергетичні обмеження паливо-окиснювальної суміші, що є критичним для високотемпературних процесів при визначенні економії природного газу при його заміщенні.

Ключові слова: економія природного газу; альтернативні газові палива; енергетичні та теплотехнічні установки; заміщення палив.

ВСТУП

Одним із дієвих шляхів зменшення споживання природного газу є його часткове або повне заміщення альтернативними газоподібними паливами. До таких енергоносіїв належать гази локального походження, зокрема біогаз, звалищний газ, продукти газифікації твердих і рідких палив, а також технологічні гази металургійного виробництва (доменний, коксовий, коксодоменний). Практичний інтерес становлять як зазначені гази, так і їх суміші з природним газом або іншими технологічними газами промислового походження.

Проблема економії палива є актуальною не лише з позицій енергозбереження, але й з огляду на екологічні наслідки його використання. Це зумовлено тим, що викиди токсичних речовин і парникових газів мають майже лінійну залежність від обсягів спалюваного палива. У контексті глобальних кліматичних змін значущість скорочення споживання викопних палив істотно зростає, оскільки парникові гази у продуктах згоряння, передусім діоксид вуглецю (CO_2), відіграють визначальну роль у зростанні середньої температури атмосферного повітря.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Під час заміни природного газу технологічними або іншими альтернативними газами істотним обмежувальним чинником стають їх порівняно невисокі енергетичні показники, зокрема значення нижчої теплоти згоряння та температури полум'я. Такі властивості істотно ускладнюють застосування зазначених палив у високотемпературних теплотехнічних установках, експлуатація яких потребує підтримання значних технологічних температур.

Для прикладу, в нагрівальних печах металургійного виробництва робочі температури під час підготовки слябів до термічної обробки зазвичай досягають 1100–1300 °C, тоді як температура газів, що відводяться з робочого простору печі, становить близько 1000 °C [1]. У таких умовах використання доменного газу як основного палива є проблематичним, оскільки його адіабатична температура полум'я при спалюванні в повітрі, як правило, не перевищує 1200–1400 °C

[2]. Таким чином, температурний потенціал доменного газу виявляється співмірним із рівнем технологічної температури самого процесу, що призводить до звуження температурного напору теплопередачі та суттєво обмежує можливості забезпечення стабільного й енергоефективного функціонування високотемпературних агрегатів.

Водночас енергетичний потенціал технологічних газів є цілком достатнім для їх ефективного застосування у низько- та середньотемпературних теплотехнологічних процесах. Обмеження, пов'язані з невисокою теоретичною температурою горіння альтернативних газових палив, можуть бути подолані під час їх використання у високотемпературних агрегатах шляхом попереднього високотемпературного підігріву компонентів горіння – як окиснювача (повітря), так і, за потреби, самого паливного газу. Як правило, підігрів паливно-окиснювальної суміші реалізується за рахунок утилізації теплової енергії продуктів згоряння, що відводяться з печі, що водночас сприяє підвищенню загальної енергетичної ефективності агрегату. Альтернативним підходом до розширення можливостей використання низькокалорійних газів є їх збагачення більш енергомісткими газовими паливами або підвищення окиснювальної здатності робочого середовища шляхом додавання кисню до повітря [3].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Починаючи з перших десятиліть ХХІ століття, у промислових установках, системах централізованого й локального теплопостачання, а також у теплових двигунах спостерігається помітне розширення спектра застосовуваних палив. Особливого поширення набули водневмісні енергоносії [4] та різноманітні альтернативні газоподібні палива [5]. Така тенденція зумовлена як поступовим виснаженням запасів традиційних вуглеводневих ресурсів, так і стабільним зростанням їх вартості на світових енергетичних ринках, що стимулює пошук можливостей часткового або повного заміщення природного газу іншими газовими паливами.

Паралельно з диверсифікацією палив у сучасних теплотехнологічних системах відбувається активна трансформація підходів до вибору та використання окиснювачів. Це пов'язано, з одного боку, з упрощенням киснево-паливних технологій [6], які набули особливої актуальності в металургійному виробництві, а з іншого – із застосуванням зволоженого повітря як окиснювача [7], що дозволяє знизити утворення токсичних компонентів у продуктах згоряння. Додатковим чинником є специфічні вимоги до режимів роботи когенераційних енергетичних систем [8]. У когенераційних установках, зокрема, як окиснювальне середовище може використовуватися повітря зі зниженим вмістом кисню. Такий режим реалізується шляхом подавання в камеру згоряння не атмосферного повітря, а розбавлених димових газів, що відводяться від інших елементів системи (наприклад, мікротурбін), що забезпечує інтеграцію теплових і електрогенеруючих процесів та підвищує загальну ефективність енергетичної установки.

Зростання уваги до застосування інноваційних і нетрадиційних газоподібних енергоносіїв зумовлене як поступовим скороченням доступних запасів класичних вуглеводневих палив, так і потребою формування оновлених принципів побудови паливно-енергетичного балансу в державах Європейського Союзу. У межах цих трансформацій ключовим напрямом є ідентифікація таких видів палива, які здатні забезпечувати достатньо високий рівень енергетичної ефективності за одночасного зменшення негативного впливу на довкілля.

Окрім того, в науковій літературі широко представлені дослідження українських учених, присвячені питанням заміщення природного газу альтернативними газоподібними енергоносіями, зокрема штучно синтезованими газами [9], біогазом [10] та іншими різновидами газових палив. Водночас більшість наявних робіт у цій галузі мають переважно прикладну спрямованість і, як правило, орієнтовані на аналіз окремих технологічних рішень, конкретних установок або специфічних умов експлуатації паливо-використовуючого обладнання.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Традиційна методика заміщення палив при зміні їх складу або типу [11], сформована у США в середині XX століття, була розроблена переважно для умов побутового споживання енергоносіїв. У межах цього підходу основна увага приділялася забезпеченню стійкості процесу горіння та характеристикам факельного полум'я, тоді як теплова потужність енергетичної установки вважалася незмінною. Таким чином, кількість теплової енергії, що підводиться до установки, приймалася сталою незалежно від властивостей заміщуваного палива.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження полягає в оцінці можливої економії природного газу при заміщенні на альтернативні низькокалорійні газові палива. Запропонований підхід має враховувати характеристики горіння альтернативних газових палив, їх енергетичний потенціал та технологічні умови паливо-використовуючого обладнання.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи дослідження. В роботі використано розрахунково-теоретичні методи, які базуються на основних поняттях рівноважної термодинаміки та визначення основних вогнетехнічних характеристик спалювання газових палив.

Об'єкт дослідження. Процеси спалювання газових палив в енергетичних та технологічних установках.

Предмет дослідження – вплив складу і властивостей альтернативних газових палив на ефективність економії природного газу в енергетичних установках.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Згідно з діючими в Україні нормативами щодо можливості заміщення одного виду палива на інший для природного газу, відповідно до Постанови № 2493 Кодексу газотранспортної системи встановлено, що нижча теплота згоряння природного газу має бути не менше 7600 ккал/м³. Цей стандарт відповідає вимогам Європейського Союзу і регулює показники якості газу, що подається споживачам. Додатково, для регулювання процесу горіння встановлено допустимий діапазон числа Воббе від 9840 ккал/м³ до 13 020 ккал/м³ з максимально допустимим відхиленням ± 5 % від номінального значення [12], що по теплофізичним властивостям відповідає раніше скасованому міждержавного стандарту ГОСТ 5542-87 «Гази горючі природні для промислового і комунального призначення». У відповідності з зазначеними документами, вимоги для природного газу, який відпускається споживачам висуваються наступні:

1. Мінімальна нижча теплотворна здатність – не менше $Q_{H,min} = 31,8$ МДж/м³ при температурі 298 К (20 °С) та атмосферному тиску 1,01325 бар, в той час як значення теплоти згоряння для природного газу, що поставляється з магістрального газопроводу, складає, як правило, $Q_H \approx 33,6$ МДж/м³ лімітується (більш низьке значення теплоти згорання).

2. Вищі числа Воббе Wo_h розраховувались через TCV – повну теплотворну здатність Q_h :

$$Wo_B = Q_B / G_{0,5} = Q_B / (M_{нал} / M_{Пое})^{0,5} \quad (1)$$

становлять 41,2...54,4 МДж/м³ згідно вищезазначених умов для 1 м³.

У випадку використання суміші альтернативних газових палив з природним газом при його заміщенні без порушення вимог стандарту необхідно визначити

максимальну долю альтернативного газового палива в суміші, за яких будуть виконуватися вимоги ГОСТ 5542-87, наведені вище.

Для аналізу виконання вимог заміщення природного газу за ГОСТ 5542-87 розглянемо наступні альтернативні газові палива: синтез-газ як продукт газифікації соломи [13], синтез-газ як продукт газифікації рослинних олій [13], Біогаз [13], склади яких представлені в табл. 1.

Залежності зміни Q_H і W_{O_B} від долі альтернативних газових палив в суміші з природним газом представлено на рис. 1. Діапазон прийнятних значень Q_H і W_{O_B} визначений згідно мінімальних вимог для NG відповідно до ГОСТ 5542-87 (затемнені області), тобто $Q_{H, \min} = 31,8$ МДж/м³, $W_{O_B} = 41,2$.

На рис. 1 показано процедуру визначення можливих меж підмішування АГП, які представлено: синтез-газами ПГС і ППРО та біогазом БГ при заміщенні природного газу. Склад газів АГП як для синтез-газу так і для біогазу представлений в табл. 51 де також наведені інші необхідні дані для оцінки прийнятних домішок до ПГ в рамках підтримання вимог чинного стандарту.

Величини параметрів заміщення для нової паливної суміші визначаються як зважені суми відповідних характеристик компонентів палива:

$$Q_{B, \text{суміші}} = Q_{B, \text{ПГ}} D_{\text{ПГ}} + Q_{B, \text{АГП}} D_{\text{АГП}}; \quad (1)$$

$$M_{\text{суміші}} = M_{\text{ПГ}} D_{\text{ПГ}} + M_{\text{АГП}} D_{\text{АГП}}; \quad (2)$$

$$G_{\text{суміші}} = G_{\text{ПГ}} D_{\text{ПГ}} + G_{\text{АГП}} D_{\text{АГП}}. \quad (3)$$

Як правило, для кожного з оцінюваних параметрів $X_{\text{суміші}} \in \{Q_{H, \text{суміші}}; M_{\text{суміші}}; G_{\text{суміші}}\}$:

$$X_{\text{суміші}} = D_{\text{ПГ}}(X_{\text{ПГ}} - X_{\text{АГП}}) + X_{\text{АГП}}. \quad (4)$$

При реалізації запропонованої методики всі дані, представлені на рис. 1, приведені до нормальних умов (нм³ змішаного газу) (нм³ – взятий при 273 К (0 °С) та 1 бар, як прийнято в рекомендації ГОСТ 5542-87 «Гази горючі природні для промислового і комунального призначення»

Нижні допустимі значення Q_H (а) та W_{O_B} (б) прийняті відповідно до вимог ГОСТ 5542-87 при 298 К (20 °С), і перераховані на 273 К (0 °С).

Таблиця 1. Основні характеристики альтернативних газів для оцінки потенціалу заміни в рамках стандартних NG

#	Властивості та розмірність		Біогаз [13]	Синтез-газ із газифікації соломи(ПГС) [13]	Синтез-газ із газифікації рослинних олій (ППРО) [13]	Природний газ [14]
			БГ	ПГС	ППРО	ПГ
1	Склад, % об.	CH ₄	–	1,0	0,1	91,34
		$\sum C_n H_{n+2} / C_6 H_6$	–	–	–	5,55
		CO ₂	38	11,3	0,3	1,65
		N ₂ /NH ₃	1,6	38,4	46,7	1,45
		O ₂	0,4	–	–	0,01
		H ₂	–	22,5	25,1	–
		CO	60,0	20,5	25,1	–
		H ₂ O	–	6,3	0,3	–
2	Значення числа Воббе W_{O_B}	кДж/м ³	6989	7537	12572	51 472
3	Вища теплота згоряння Q_B	кДж/м ³	7 584	6 748	10 829	42 908
4	Нижча теплота згоряння Q_H	кДж/м ³	7 584	5 380	6 223	36 273

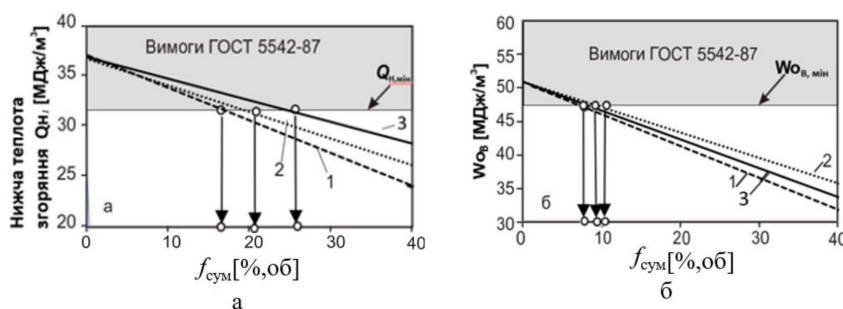


Рис. 1. Залежність основних характеристик суміші паливних газів (природний газ (ПГ) + синтез-газ(ПГС або ППРО) або біогаз від об'ємної частки синтез-газу $f_{\text{сум}}$, % (об.), для визначення долі вмісту синтез-газу в суміші, яка відповідає вимогам стандарту ГОСТ 5542-87: а – по нижчій теплотворній здатності (NCV) Q_H ; б – по вищому (повному) числу Воббе W_{O_B} . Заміщуючий газ: 1 – Синтез-газ із газифікації соломи (ПГС); 2 – синтез-газ із рослинних олій (ППРО). 3 – біогаз (БГ)

Аналіз наведених даних показав, що встановлені обмеження за $Q_{н,мін}$ значно жорсткіші, ніж за $W_{о,мін}$. Допустимий вміст АГП-газів в суміші з NG може бути збережений з об'ємною частиною до 30 % з точки зору вимог щодо чисел $W_{о,в}$, а за $Q_{н}$ – об'ємна частка природного газу в газовій суміші перевищує 90 % для будь-якого з оцінюваних АГП-газів.

Розрахунок економії палив за діючими нормативними документами

Згідно з класичним підходом [9], при заміні одного виду палива ($Пал'$) іншим ($Пал''$) передбачається збереження сталої теплової потужності енергетичної установки (наприклад, печі). Іншими словами, кількість теплової енергії, що подається в систему, має залишатися незмінною. Розрахунок при цьому здійснюється на основі нижчої теплоти згоряння палива ($Q_{н}$):

$$\begin{cases} B'_{пал,V} \cdot Q'_{н,V} = B''_{пал,V} \cdot Q''_{н,V}; \\ B'_{пал,m} \cdot Q'_{н,m} = B''_{пал,m} \cdot Q''_{н,m}; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{B'_{пал,V}}{B''_{пал,V}} = \frac{Q''_{н,V}}{Q'_{н,V}}; \\ \frac{B'_{пал,V}}{B''_{пал,V}} = \frac{B'_{пал,m}}{B''_{пал,m}} \cdot \frac{M''_{пал}}{M'_{пал}}. \end{cases} \quad (7)$$

У подальшому викладі всі характеристики та параметри, що стосуються базового палива $Пал''$, позначаються одним штрихом, тоді як параметри замінюваного палива $Пал'$ – двома.

У межах традиційного підходу визначення економії природного газу під час його часткової або повної заміни змішаним паливом (наприклад, комбінацією природного газу та біогазу – ПГ+БГ) здійснюється відповідно до таких залежностей, які впливають із базових термодинамічних визначень:

– за масовою витратою палива:

$$\begin{aligned} \Delta B_{ПГ,m} &= \left(1 - D''_{ПГ,m} \cdot \frac{B''_{пал,m}}{B'_{пал,m}} \right) \cdot 100 \% = \\ &= \left(1 - D''_{ПГ,m} \cdot \frac{Q'_{н,m}}{Q''_{н,m}} \right) \cdot 100 \%; \end{aligned} \quad (8)$$

– за об'ємною витратою

$$\begin{aligned} \Delta B_{ПГ,V} &= \left(1 - D''_{ПГ,V} \cdot \frac{B''_{пал,V}}{B'_{пал,V}} \right) \cdot 100 \% = \\ &= \left(1 - D''_{ПГ,V} \cdot \frac{Q'_{н,V}}{Q''_{н,V}} \right) \cdot 100 \%. \end{aligned} \quad (9)$$

З іншого боку, з урахуванням співвідношень (6) та (7), рівняння (8) може бути перетворене до форми (9), що демонструє кількісну відповідність між відносним об'ємним та масовим скороченням витрати природного газу у випадку його заміщення змішаним паливом типу ПГ + ПГС/ПГРО:

$$\Delta B_{ПГ,m} = \Delta B_{ПГ,V} \cdot V. \quad (10)$$

Крім того, із рівнянь (8) і (9) випливає твердження, що в рамках традиційних підходів до заміни палива економія природного газу нібито не залежить від робочої (технологічної) температури в топці (печі). Як буде показано нижче, таке припущення є помилковим. Це пов'язано з тим, що класичні методики нехтують температурно-залежними змінами ентальпійних та хімічних характеристик продуктів згоряння, які впливають на енергетичні й масообмінні показники системи”.

Запропонована методика розрахунку заміщення палив

Згідно з запропонованим підходом, процес заміщення одного виду палива іншим ґрунтується на умові збереження рівності кількості корисно засвоєної теплоти в обох випадках – як при використанні замінюваного палива ($Пал''$), так і при застосуванні замінювального ($Пал'$).

Іншими словами, розрахунок здійснюється не лише за теплотворною здатністю, а й з урахуванням коефіцієнта корисного використання теплової енергії, що дозволяє більш точно оцінити реальну ефективність роботи енергетичної установки при переході на альтернативне або змішане паливо.

$$\begin{cases} Q'_{вих} = Q''_{вих} \quad \text{або} \\ B'_{пал,m} (1 + \lambda' \cdot \Omega') \cdot (I'_{н,г,T} - I'_{н,г,вих}) = \\ = B''_{пал,m} (1 + \lambda'' \cdot \Omega'') \cdot (I''_{н,г,T} - I''_{н,г,вих}). \end{cases} \quad (11)$$

Під час переходу від масової до об'ємної витрати палива отримуємо:

$$\begin{aligned} B'_{пал,V} \cdot M'_{пал} (1 + \lambda' \cdot \Omega') \cdot (I'_{н,г,T} - I'_{н,г,вих}) = \\ = B''_{пал,V} \cdot M''_{пал} (1 + \lambda'' \cdot \Omega'') \cdot (I''_{н,г,T} - I''_{н,г,вих}). \end{aligned} \quad (12)$$

У разі заміщення природного газу біогазом за умови збереження коефіцієнта надлишку повітря $\lambda' = \lambda'' = \lambda = \text{const}$ об'ємна витрата суміші як палива визначається із умови збереження корисно засвоєної теплової потужності. З урахуванням відношення масових і об'ємних величин це дає наступне співвідношення:

$$B''_{пал,m} = \frac{B'_{пал,m} \cdot (1 + \lambda \cdot \Omega'_{st}) \cdot (I'_{н,г,T} - I'_{н,г,вих})}{(1 + \lambda \cdot \Omega'') \cdot (I''_{н,г,T} - I''_{н,г,вих})}. \quad (13)$$

Економія природного газу при цьому складе – по масовій витраті::

$$\begin{aligned} \delta B''_{ПГ,m} &= \frac{B'_{пал,m} - D''_{ПГ,m} \cdot B''_{пал,m}}{B'_{пал,m}} \cdot 100 \% = \\ &= \left[1 - D''_{ПГ,m} \cdot \frac{(1 + \lambda \cdot \Omega') \cdot (I'_{н,г,T} - I'_{н,г,вих})}{(1 + \lambda \cdot \Omega'') \cdot (I''_{н,г,T} - I''_{н,г,вих})} \right] \cdot 100 \%; \end{aligned} \quad (14)$$

– по об'ємному витраті:

$$\delta B''_{\Pi, V} = \frac{B'_{\text{нал}, V} - D''_{\Pi, V} \cdot B''_{\text{нал}, V}}{B'_{\text{нал}, V}} \cdot 100 \% =$$

$$= \left[1 - D''_{\Pi, V} \frac{M'_{\text{нал}} \cdot (1 + \lambda \cdot \Omega') \cdot (I'_{\text{н.з.}, T} - I'_{\text{н.з.}, \text{вих}})}{M''_{\text{нал}} \cdot (1 + \lambda \cdot \Omega'') \cdot (I''_{\text{н.з.}, T} - I''_{\text{н.з.}, \text{вих}})} \right] \cdot 100 \% \quad (15)$$

У рівняннях (14) та (15) слід враховувати взаємозв'язок між об'ємною $D_{\Pi, V} \equiv D_{i, V}$ та масовою $D_{\Pi, m} \equiv D_{i, m}$; долями природного газу в суміші, оскільки їхнє коректне перетворення є необхідним для точних розрахунків економії та витрат палива.

$$D_{i, V} \frac{M_i}{M_{\text{нал}}} = D_{i, m} \quad (16)$$

Тут $D_{\Pi, m} \equiv \Delta_{i, m}$, а $D_{\Pi, V} \equiv D_{i, V}$. У такому разі з рівнянь (16) і (17) випливає, що масова та об'ємна частки зекономленого природного газу в складі сумішевого палива є кількісно однаковими внаслідок заміщення вихідного природного газу (палива $\text{Пал}'$):

$$\delta B''_{\Pi, m} = \delta B''_{\Pi, V} \quad (17)$$

На рисунку 2 наведено порівняння економії природного газу ΔB_{Π} за традиційним підходом до заміни NG технологічним газом із величиною δB_{Π} визначеною з використанням запропонованої методики.

Згідно проведених розрахунків за запропонованим підходом економія природного газу при його частковому заміщенні альтернативним газовим паливом виявляється значно меншою, ніж це впливає з оцінок традиційного балансового методу розрахунку заміщення палив. При цьому, із збільшенням долі альтернативного низькокалорійного газу в суміші з природним газом та підвищенням робочої температури економія природного газу зменшується в порівнянні з результатами її визначення за традиційним підходом.

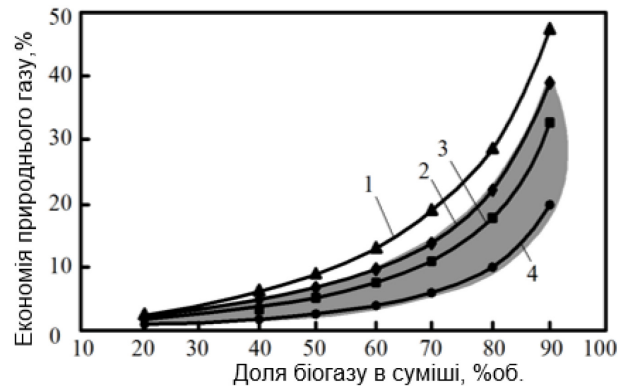


Рис. 2. Економія природного газу при його заміні біогазом залежно від частки газу в суміші з природним газом 1 – існуюча (традиційна балансова) методика заміщення палива [4 2–4 – запропонована методика заміщення палива (з урахуванням збереження корисно сприйнятого теплового потоку). Технологічна робоча температура $t_{\text{роб}}$, °C: 2 – 800; 3 – 1000; 4 – 1200. Коефіцієнт надлишку повітря $\lambda = 1,1$. Початкові умови: температура «холодного» палива та повітря, $t_{\text{нал}} = t_a = 25$ °C

ВИСНОВКИ

У межах запропонованої методології заміщення газових палив розроблено підхід, що базується на підтриманні корисно засвоєної теплової енергії безпосередньо всередині топочної камери та враховує положення другого закону термодинаміки. Такий підхід дозволяє не лише оцінювати енергетичний потенціал альтернативних газоподібних палив, але й кількісно визначати їхню придатність для часткового або повного заміщення природного газу у конкретних технологічних умовах.

Запропонований підхід до заміщення палив можна застосовувати до різних паливо-окиснювальних сумішей, він дає змогу враховувати температурні та енергетичні обмеження паливо-окиснювальної суміші, що є критичним для високотемпературних процесів при визначенні економії природного газу при його заміщенні.

REFERENCES

- [1] Hakan, Gür C., & Pan, J. (2008) *Handbook of Thermal Process Modeling of Steels*. CRC Press, 180 p/ ISBN 978-0-8493-5019-1.
- [2] Moon, J., Kim, S., & Sasaki, Y. (2014) Effect of Preheated Top Gas and Air on Blast Furnace Top Gas Combustion / Effect of Preheated Top Gas and Air on Blast Furnace Top Gas Combustion, *ISIJ International*, Vol. 54, Issue 1, 63–71. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.63>
- [3] Martin, P. (2013) Optimising performance, energy efficiency and greenhouse gas emissions. *Iron & Steel Today*, p. 13–14.
- [4] Huber, A. (2020). Impact of hydrogen and mixtures of hydrogen and natural gas on forced draught burners for gaseous fuels. *Walter Dreizler GmbH*, A 1434 EN, 11 p. Retrieved from: <https://www.dreizler.com/wp-content/uploads/2021/02/A-1434-EN-1.20-Impact-of-hydrogen-on-burners.pdf>
- [5] Assis, A. C., Panizio, R., Calado, L., Brito, P., & Mourão, P. (2023) Use of By-Products from Gasification and Carbonization from Polymeric Residues and Biomass for Application in Liquid Phase Adsorption. *Environments*, 10, 74. <https://doi.org/10.3390/environments10050074>
- [6] Semykin, S., GolubT., Molchanov, L., Dudchenko, S., & Vakulchuk, V. (2025). Environmental aspects of using oxygen blowing with prior electrical activation in oxygen converters. *Energy Technologies & Resource Saving*, 83(2), 107–116. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2025.09>
- [7] Soroka, B. S., & Vorobyov, N. V. (2019) Efficiency of the use of humidified gas fuel and oxidizing mixture *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations.*, 62(6), 547–564. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-547-564>

- [8] Prestipino, M., Piccolo, A., Carlos Mourao Vilela, C., & Galvagno, A. (2025) Cogeneration processes based on giant reed gasification combined with ORC and district heating for heat recovery: Comparative energy and exergy analysis. *Renewable Energy*, Volume 238, 121944, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121944>
- [9] Karp, I. M., Nikitin, E. E., Pyanikh, K. E., & Pyanikh, K. K. (2019) Zamishchennya pryrodnoho hazu al'ternatyvnymy palyvamy [Replacing natural gas with alternative fuels]. *Nauk. Dumka NAN Ukrainy. In-t hazu*. Kyiv :, p. 231 [in Ukrainian].
- [10] Blum, Ya. B., Geletukha, G. G., Grigoryuk, I. P. and othets. (2010) Novitni tekhnolohiyi bioenerhokonversiyi [Latest bioenergy conversion technologies]. *Agrar Media Group*, p. 326 [in Ukrainian]
- [11] Weber, E. J. (1966.) Interchangeability of Fuel Gases. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices/ First Edition, Second Printing. Section 12, Chapter 14.-N.Y.: *The Industrial Press*. P.12/239–12/252.
- [12] TOV “HK “Naftogaz Ukrainy” Yakist' pryrodnoho hazu, shcho podayet'sya spozhyvacham [LLC “GC “Naftogaz of Ukraine” Quality of natural gas supplied to consumers]. Retrieved from <https://www.naftogaz.com/information/yakist-pryrodnogo-gazu-scho-podaetsya-spozhyvacham>
- [13] Plasinski, K. J., Prins, M. J., & Pierik, A. (2006) Evaluation of Biomass Gasification. *Energy*., Vol. 32, Issue 4. P. 568–574. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.06.024>
- [14] Sertyfikat skladu pryrodnoho hazu [Natural gas composition certificate] Retrieved from https://lb.ua/economics/2016/02/02/326991_gaz_kieve_sootvetstvuet.html (date of application: 08/15/25)

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Hakan, Gür C., Pan, J. (2008) *Handbook of Thermal Process Modeling of Steels*. CRC Press, 180 p/ ISBN 978-0-8493-5019-1.
- [2] Moon, J., Kim, S., Sasaki, Y. (2014) Effect of Preheated Top Gas and Air on Blast Furnace Top Gas Combustion / Effect of Preheated Top Gas and Air on Blast Furnace Top Gas Combustion, *ISIJ International*, Vol. 54, Issue 1, 63–71. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.63>
- [3] Martin, P. (2013) Optimising performance, energy efficiency and greenhouse gas emissions. *Iron & Steel Today*, P 13–14.
- [4] Huber, A. (2020). Impact of hydrogen and mixtures of hydrogen and natural gas on forced draught burners for gaseous fuels. *Walter Dreizler GmbH*, A 1434 EN, 11 p. URL: <https://www.dreizler.com/wp-content/uploads/2021/02/A-1434-EN-1.20-Impact-of-hydrogen-on-burners.pdf>
- [5] Assis, A. C., Panizio, R., Calado, L., Brito, P., Mourão, P. (2023) Use of By-Products from Gasification and Carbonization from Polymeric Residues and Biomass for Application in Liquid Phase Adsorption. *Environments*, 10, 74. <https://doi.org/10.3390/environments10050074>
- [6] Semykin, S., Golub, T., Molchanov, L., Dudchenko, S., & Vakulchuk, V. (2025). Environmental aspects of using oxygen blowing with prior electrical activation in oxygen converters. *Energy Technologies & Resource Saving*, 83(2), 107–116. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2025.09>
- [7] Soroka, B. S., & Vorobyov, N. V. (2019) Efficiency of the use of humidified gas fuel and oxidizing mixture Energetika. *Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations.*, 62(6), 547–564. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-547-564>
- [8] Prestipino, M., Piccolo, A., Carlos Mourao Vilela, C., Galvagno, A. (2025) Cogeneration processes based on giant reed gasification combined with ORC and district heating for heat recovery: Comparative energy and exergy analysis. *Renewable Energy*, Vol. 238, 121944, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121944>
- [9] Карп, І. М., Нікітін, Є. Є., П'яних, К. Є., П'яних, К. К. (2019) Заміщення природного газу альтернативними паливами. *НАН України. Ін-т газу*. Київ : Наук. думка, 231 с.
- [10] Блюм, Я. Б., Гелетуха, Г. Г., Григорюк, І. П. та ін. (2010) Новітні технології біоенергоконверсії. *Аграр Медіа Груп*, 326 стор.
- [11] Weber, E. J. (1966.) Interchangeability of Fuel Gases. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices/ First Edition, Second Printing. Section 12, Chapter 14.-N.Y. : *The Industrial Press*. P. 12/239–12/252.
- [12] ТОВ «ГК «Нафтогаз України» Якість природного газу, що подається споживачам. URL: <https://www.naftogaz.com/information/yakist-pryrodnogo-gazu-scho-podaetsya-spozhyvacham>
- [13] Plasinski, K. J., Prins, M. J., Pierik, A. (2006) Evaluation of Biomass Gasification. *Energy*., Volume 32, Issue 4. P. 56–574. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.06.024>
- [14] Сертифікат складу природного газу URL: https://lb.ua/economics/2016/02/02/326991_gaz_kieve_sootvetstvuet.html (дата звернення: 15.08.25)

© Новосад Ю. І., Воробйов М. В.

Дата надходження статті до редакції: 24.11.2025

Дата затвердження статті до друку: 16.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0