

# Техніка і технології

УДК 621.438

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ У ПРОЦЕСІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ

<sup>1</sup>Л.Б. Чабанович, <sup>2</sup>О.М. Склярєнко, <sup>2</sup>А.Р. Чабанович

<sup>1</sup>ВАТ «Укргазпроект», 04050, м. Київ-50, вул. Артема, 77, тел. (044) 4840250,  
e-mail: ukrpro@i.kiev.ua

<sup>2</sup>Національний університет будівництва та архітектури,  
03680, м. Київ-037, Повітрофлотський проспект, 31, тел. (044) 2454833,  
e-mail: chabanovich@rencons.com

*Розглядається завдання підвищення ефективності використання природного газу в Україні. Виконано аналіз можливих схем використання вторинних енергоресурсів газотранспортної системи країни. Запропоновано технології спалювання природного газу з використанням трубчастих пальникових пристроїв. Пропонуються технічні та технологічні рішення з модернізації парку газоперекачувальних агрегатів. Розглянуто варіанти використання теплового потенціалу викидних газів газоперекачувальних агрегатів. Запропонована схема до оснащення утилізаційних систем газотурбінних установок та використання їх в комунальній теплоенергетиці*

Ключові слова: пальниковий пристрій, трубчаста технологія спалювання природного газу, камера згорання, тепловий потенціал викидних газів, газотурбінна установка, газоперекачувальний агрегат, утилізація тепла, когенерація

*Рассматривается задача увеличения эффективности использования природного газа в Украине. Сделан анализ возможных схем использования вторичных энергоресурсов газотранспортной системы страны. Предложены технологии сжигания природного газа посредством использования трубчатых горелочных устройств. Предлагаются технические и технологические решения модернизации парка газоперекачивающих агрегатов. Рассмотрены варианты использования теплового потенциала выхлопных газов газоперекачивающих агрегатов. Предложена схема дооснащения утилизационных систем газотурбинных установок и использования их в коммунальной теплоэнергетике*

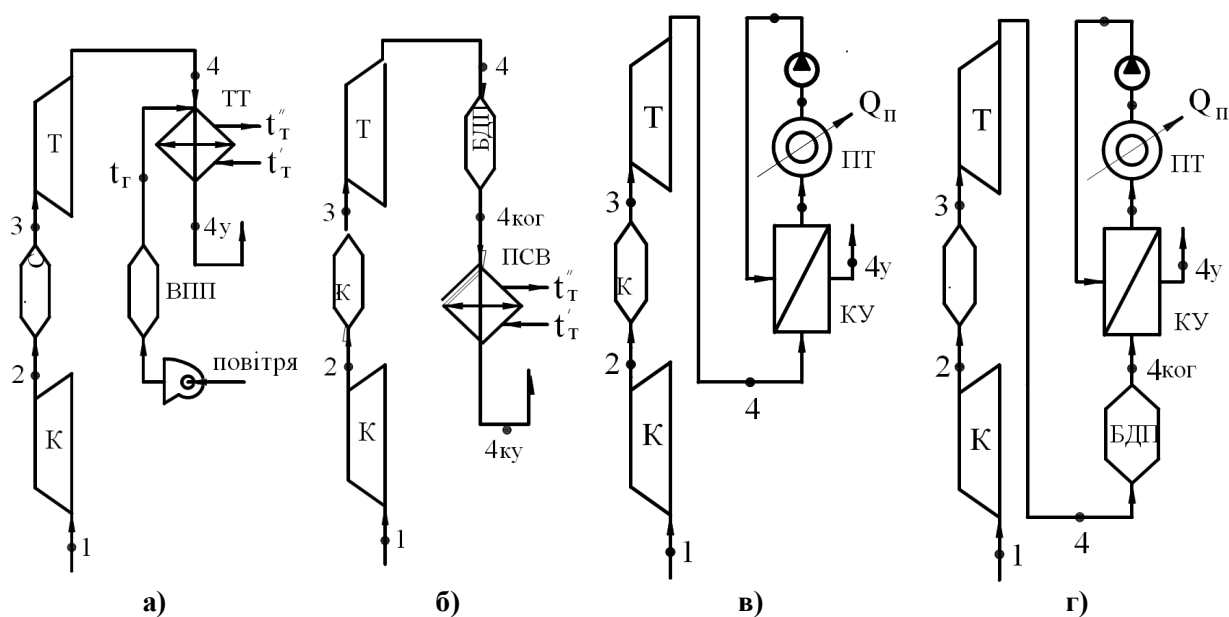
Ключевые слова: горелочное устройство, трубчатая технология сжигания природного газа, камера сгорания, тепловой потенциал выхлопных газов, газотурбинная установка, газоперекачивающий агрегат, утилизация тепла, когенерация

*It is considered a task of increasing of power efficiency of natural gas unit in Ukraine. The analysis of all possible schemes of using of secondary energy resources of gas-transport system of the country was made. The technologies of popping of natural gas by use of tubular firing units are suggested. The technical and technological decisions of modernization of the park of gas-compressor units are suggested. The variants of use of the heat potential of exhaust gases of gas-compressor units are considered. A scheme of equipping of heat-recovery systems of gas-turbine units and their using in municipal heat and power engineering was suggested*

Keywords: firing unit, tubular technology of natural gas burning, combustion chamber, thermal potential of exhaust gases, gas-turbine unit, gas-compressor unit, heat recovery, cogeneration

Використання утилізаційних енергозберігаючих технологій на базі газотурбінних установок в енергетиці, промисловості та в газотранспортній системі є ефективним напрямком підвищення енергетичної ефективності при виробництві механічної та теплової енергії за рахунок раціонального використання природного газу. Особливо актуальним це стало впродовж

останнього десятиліття у зв'язку з суттєвим здорожчанням енергоносіїв, а саме природного газу. Підвищення ефективності спалювання палива в камері згорання газотурбінних установок досягається за рахунок використання теплової енергії викидних газів шляхом встановлення в газоходах теплофікаційних теплообмінників (підігрівачів води), котлів-утилізаторів.



а – з теплофікаційним теплообмінником і виносним підтопковим пристроєм;

б – з блоком доспалюючих пристроїв і підігрівачем води;

в – з котлом-утилізатором і системою теплопостачання споживачів;

г – з блоком паликових пристроїв і котлом-утилізатором, що працюють в режимі доспалювання.  
 1, 2 – вхід та вихід повітря із повітряного компресора (К); 3 – вихід продуктів згорання із камери згорання газу; 4 – вихід відпрацьованих газів із турбіни (Т)

**Рисунок 1 – Структурні схеми використання теплового потенціалу викидних газів ГТУ**

Україна володіє однією з найбільших газотранспортних систем Європи. До її складу входить 72 компресорні станції, де експлуатуються близько 700 газоперекачувальних агрегатів, з них 438 агрегатів з газотурбінним приводом. Сумарна ефективна потужність газотурбінних газоперекачувальних агрегатів складає майже 4500 МВт. Враховуючи високу температуру викидних газів газотурбінних установок, що становить 400-600°C, співвідношення між величиною теплового потенціалу викидних газів та потужністю газотурбінної установки, сумарний тепловий утилізаційний потенціал газотранспортної системи України [11] оцінюється майже в 12000 МВт. Відповідно, найбільш простим способом підвищення коефіцієнта використання палива є застосування утилізаційних технологій на основі використання остаточного теплового потенціалу викидних газів газотурбінних установок. Сучасні газотурбінні установки (ГТУ) залежно від часу їх розробки та введення в експлуатацію корисно використовують тільки 25-40% теплового потенціалу спалюваного палива. Утилізація теплового потенціалу викидних газів газотурбінних установок є важливим чинником зниження енерговитрат в енергетиці, промисловості та комунальному господарстві на основі підвищення коефіцієнта використання палива до 70-75%. Відповідно потенціал ефективного використання існуючих газотурбінних установок на даний час недооцінений, особливо перспективи його використання в комунальному господарстві.

Використання технології утилізації та когенерації енергії в більшості випадків не вима-

гає суттєвих капіталовкладень. Такі технології характеризуються стислими термінами реалізації та окупності, а також можливістю використання в установках, що експлуатуються. Оскільки, більшість газоперекачувальних агрегатів компресорних станцій України були змонтовані у 70-і, 80-і роки минулого століття і на даний час здебільшого відпрацьовали нормативний термін експлуатації (потребують капітального ремонту чи заміни), актуальним є комплексний підхід до процесу ремонту чи модернізації, який паралельно з капітальним ремонтом передбачає і роботи з оснащення газотурбінних установок системами утилізації енергії викидних газів для теплопостачання будівель та споруд компресорних станцій і теплопостачання комунальних споживачів населених пунктів.

Структурні схеми варіантів отримання вторинного теплоносія [4, 5] зображено на рисунку 1.

Аналіз запропонованих схем свідчить, що при реалізації утилізаційних теплофікаційних технологій їх термодинамічна ефективність визначається коефіцієнтом використання палива (КВП) за балансним співвідношенням

$$КВП = \eta_{ГТУ} + \eta_y (1 - \eta_{ГТУ} K_{Тук}), \quad (1)$$

де:  $\eta_{ГТУ}$  – коефіцієнт корисної дії базової газотурбінної установки;

$K_{Тук}$  – коефіцієнт аеродинамічної ефективності теплоутилізаційного контура;

$\eta_y$  – коефіцієнт корисної дії утилізаційної установки.

Розрахунки свідчать, що значення КВП залишаються практично незмінними при зміні

коефіцієнта корисної дії газотурбінної установки в широких межах, та визначається здебільшого рівнем ефективності теплоутилізаційного контура, тобто КВП визначається  $\eta_y$ .

У процесі підгрівання теплоносія у теплоутилізаційному контурі в комбінованому когенераційно-утилізаційному режимі загальна величина КВП зменшується зі збільшенням ступеня когенерації  $\beta_{\text{ког}}$ , що визначається як відношення теплової енергії  $q_{\text{ког}}$ , підведеної при доспалюванні на викиді газотурбінної установки, до теплової енергії  $q_1$ , підведеної в камері згоряння газотурбінної установки і у випадку, коли  $\beta_{\text{ког}} > 0$  розрахункове співвідношення оцінки величини коефіцієнта використання палива має такий вигляд

$$\text{КВП}_{(\text{ког})} \approx \eta_y / (1 + \beta_{\text{ког}}). \quad (2)$$

Коефіцієнт корисної дії бінарної парогазової установки з котлом-утилізатором без доспалювання при  $\beta_{\text{ког}} = 0$  визначається балансовим рівнянням

$$\eta_{\text{пгу}} = \eta_{\text{гту}} K_{\text{гук}} + \eta_{\text{пгу}} \eta_{\text{ул}} (1 - \eta_{\text{гту}} K_{\text{гук}}), \quad (3)$$

де  $\eta_{\text{пгу}}$  – коефіцієнт корисної дії паротурбінної установки.

У випадку використання в бінарній парогазовій установці котла-утилізатора з доспалюванням палива у газоході газотурбінної установки коефіцієнт корисної дії такої парогазової установки визначається рівнянням

$$\eta_{\text{пгу}(\text{ког})} = (\eta_{\text{пгу}} + \eta_{\text{пгу}}) / (1 + \beta_{\text{ког}}). \quad (4)$$

На рис. 2, 3 зображено залежності загального коефіцієнта використання палива від ступеня когенерації при виробництві теплоносія та загального коефіцієнта корисної дії від ККД газотурбінної установки та ступеня когенерації  $\eta_{\text{пгу}} = f(\eta_{\text{гту}}, \beta_{\text{ког}})$  у парогазовій установці.

Проведений огляд перспектив реалізації розглянутих схем утилізації та когенерації енергії [11] дає підстави констатувати, що найбільш простим напрямком підвищення загального коефіцієнта використання палива при модернізації газоперекачувальних агрегатів компресорних станцій є використання установок з кінцевою регенерацією, що підвищує загальний ККД більш як на 10% порівняно з традиційною схемою та дозволяє використовувати їх як установок децентралізованого енергопостачання комунальних споживачів. Ефективність реалізації розглянутих схем утилізації та когенерації енергії залежить від вибору раціональних методів спалювання палива в діючих газотурбінних установках [1,2,3] з урахуванням специфіки експлуатації паливних пристроїв у ГТУ, в тому числі і на викиді (газоходах) ГПА. Специфіка газотурбінних установок унеможливило використання традиційних для топкової техніки методів та засобів ефективного спалювання палива в камерах згоряння ГТУ. Із відомих технологій спалювання палива для умов камери згоряння ГТУ [6] найбільшою мірою прийнятними є дифузійно- та струминно-стабілізаційні, струминні та трубчасті паливкові пристрої.

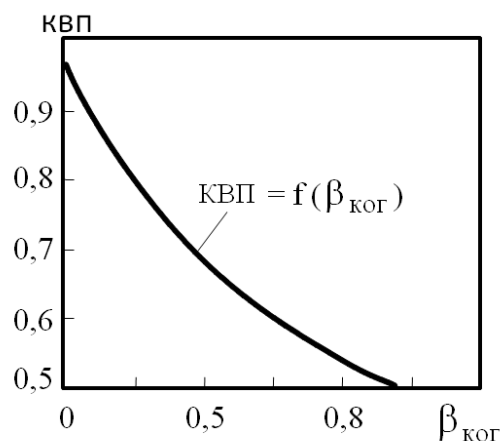


Рисунок 2 – Вплив коефіцієнта когенерації на загальний коефіцієнт використання палива при виробництві теплоносія

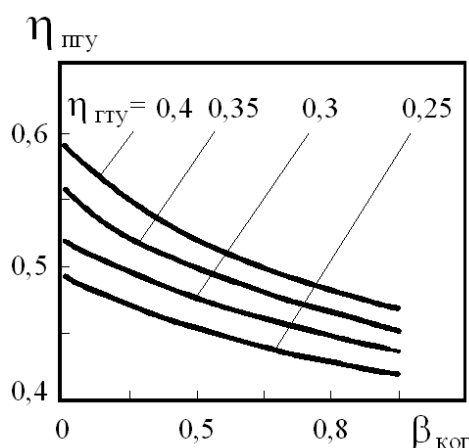
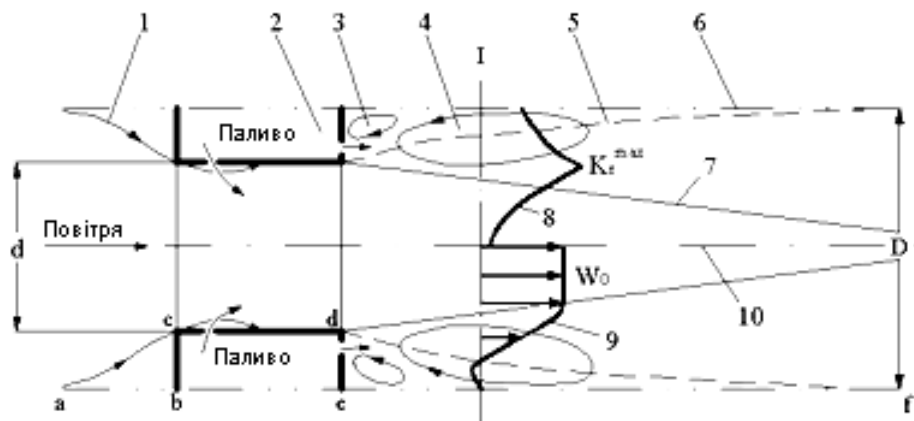


Рисунок 3 – Вплив ККД базової ГТУ та ступеня когенерації на загальний ККД парогазової установки

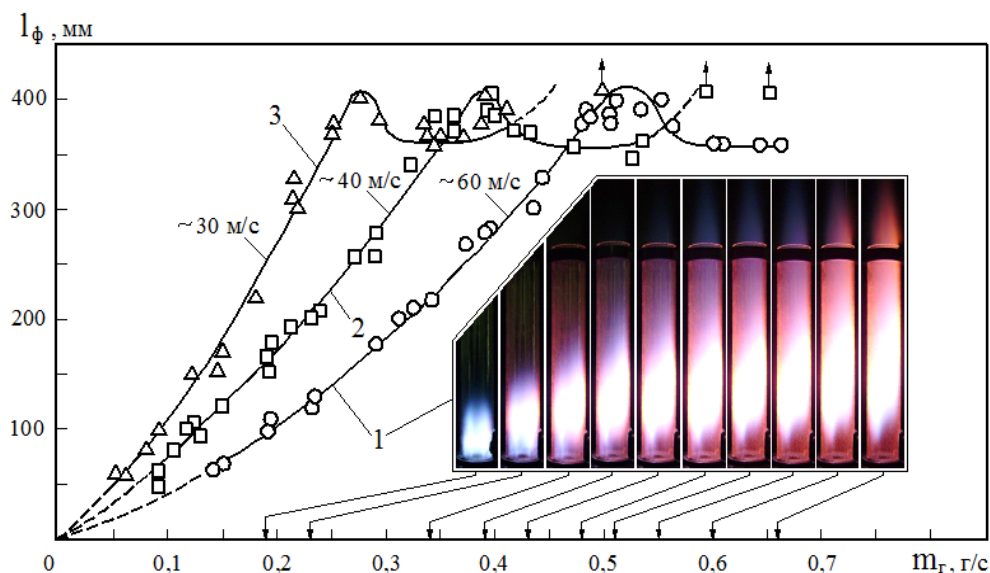
Основою концепції трубчастих паливних пристроїв є використання трубчастих інтенсификаторів сумішоутворення та стабілізації горіння. Основним елементом трубчастих паливників є насадка Борда (рис. 4), що є аеродинамічним каналом з раптовим розширенням. Інтенсифікація процесу сумішоутворення та підвищення стійкості факела досягається за рахунок кільцевої циркуляційної течії, яка виникає в насадці Борда. Кожна така насадка утворює трубчастий паливоспалюючий модуль, в якому повітря підводиться до зони горіння центральним каналом, а паливо подається паралельно потоку повітря через систему газових отворів на торцевій стінці паливного модуля.

Результати досліджень дифузійного факела в трубчастому модулі [9], свідчать, що у форсованих режимах він має замкнену структуру, зона вигорання факела формується в пограничному шарі повітряного струменя, із центрального (повітряного) каналу модуля, довжина факела ( $l_{\text{ф}}$ ) змінюється у міру зміни витрат паливного газу, а в тінювій зоні за торцевою стінкою модуля утворюється тороїдальний вихровий потік, що стабілізує факел.



1 – границі периферійних ліній потоку перед трубчастим модулем; 2 – топливний колектор; 3 – тороїдальний вихор; 4 – рециркуляційна течія; 5 – границя пограничного шару струменя окислювача; 6 – умовна границя потоку; 7 – границя ядра струменя окислювача; 8 та 9 – епюри розподілу характеристик інтенсивності турбулентності ( $K_r$  – число Кармана) і осової складової швидкості; 10 – осова лінія

**Рисунок 4 – Трубчастий інтенсифікатор сумішоутворення та стабілізації процесу горіння**



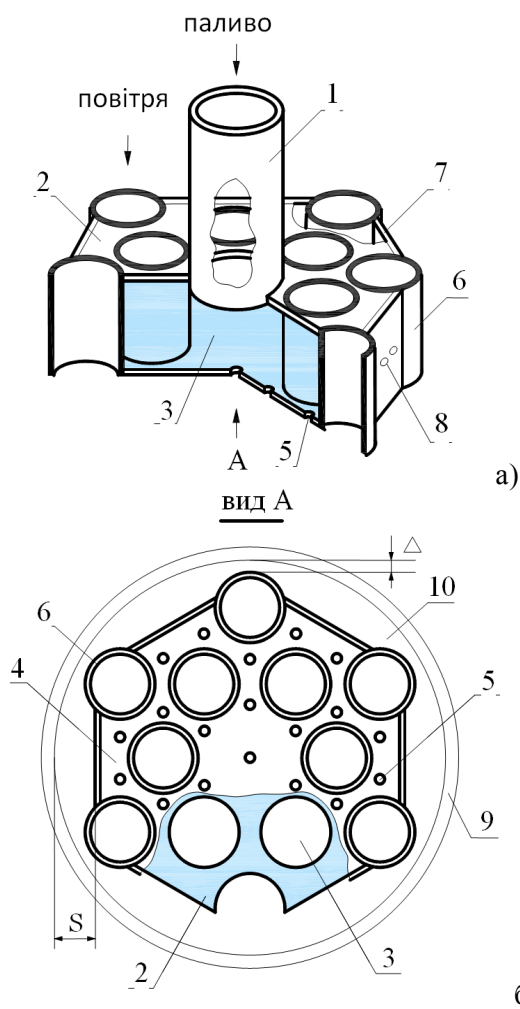
1, 2 і 3 – характеристики видимої довжини факела  $l_f = f(m_f)$  для різних рівнів швидкості повітря в каналі модуля

**Рисунок 5 – Вплив витрат палива та швидкості повітря в повітряному каналі на довжину дифузійного факела**

Суттєвою особливістю розвитку факела в трубчастому модулі є відсутність чітких границь, оскільки і факел складається з двох частин: внутрішнього ядра висотою  $l_f$  і зовнішньої «розмитой» оболонки висотою  $\Delta l_f$ . Товщина «розмитой» області факела ( $\Delta l_f$ ) суттєво зростає зі збільшенням витрат палива, що ілюструє рис. 5, де показана діаграма структури факела при зміні витрат паливного газу ( $m_f$ ). Виконані дослідження та розробки [6,9] підтверджують перспективність використання трубчастих пальників як в паливоспалюючих пристроїв стехіометричного типу (топки котлів, блоки пальникових пристроїв у когенераційно-утилізаційних системах на викиди ГТУ), так і в пристроях, що працюють за високих та змінних надлишків повітря (камери згорання ГТУ, топки промис-

лових теплогенераторів широкого призначення), у випадку досягнення мінімальної токсичності продуктів згорання та можливості ефективної утилізації горючих газів.

Подавання палива до пальника (рис. 6) здійснюється газовою трубою (1) в паливний колектор (3), обмежений трубними дошками (2) і (4), торцевими стінками (7) та повітряними трубками (6). Підведення палива в зону горіння здійснюється системою газових отворів (5), розміщених на фронтальній трубній дошці (2) для реалізації дифузійного сумішоутворення або з допомогою газових отворів (8) на торцевих стінках (7) та системою газових отворів, розміщених на бокових поверхнях повітряних трубок (6) для реалізації процесу попереднього сумішоутворення.

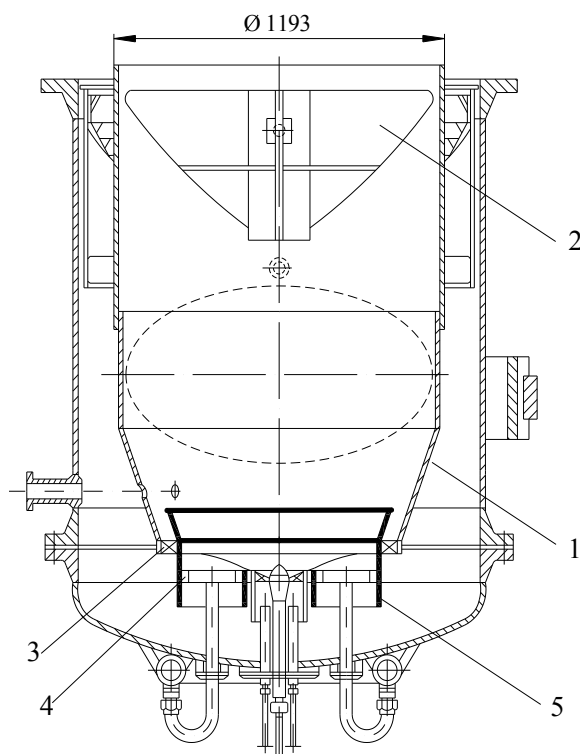


- 1 – труба; 2 – трубна дошка (фронтальна);  
3 – паливний колектор; 4 – трубна дошка (задня);  
5 – паливні отвори; 6 – повітряна трубка;  
7 – торцеві стінки; 8 – паливні отвори;  
9 – обичайка; 10 – повітряний канал

**Рисунок 6 – Загальний вигляд (а) та вигляд із боку зони горіння (б) трубчастого пальника**

Вибір газотурбінної установки ГТК-10 НЗЛ як об'єкта перевірки можливості використання та впровадження трубчастої технології спалювання газу в камері згоряння у процесі модернізації ГПА (рис. 7), що тривало експлуатуються, обумовлений високим рейтингом їх токсичності, суттєвими розбіжностями між технічними та номінальними показниками, а також високою часткою сумарно установленої потужності газотурбінних установок ГТК-10 в парку газотурбінних газоперекачувальних агрегатів газотранспортної системи України.

Газоперекачувальні агрегати ГТК-10 НЗЛ експлуатуються впродовж 30-40 років і мають суттєві відхилення фактичних техніко-економічних показників від проектних. Ці відхилення зумовлені як конструкторськими недоробками, так і фізичним зносом обладнання, що проявляється в зниженні коефіцієнта корисної дії агрегатів і їх ефективної потужності та призводить до зменшення продуктивності та перевитрати паливного газу. Отже, існуючий парк



- 1 - конічна обійма фронтального пристрою;  
2 - вихровий аеродинамічний змішувач;  
3 - кільцевий лопатевий завихрувач;  
4 - трубчастий пальник; 5 - обичайка

**Рисунок 7 – Розріз камери згоряння ГПА ГТК-10**

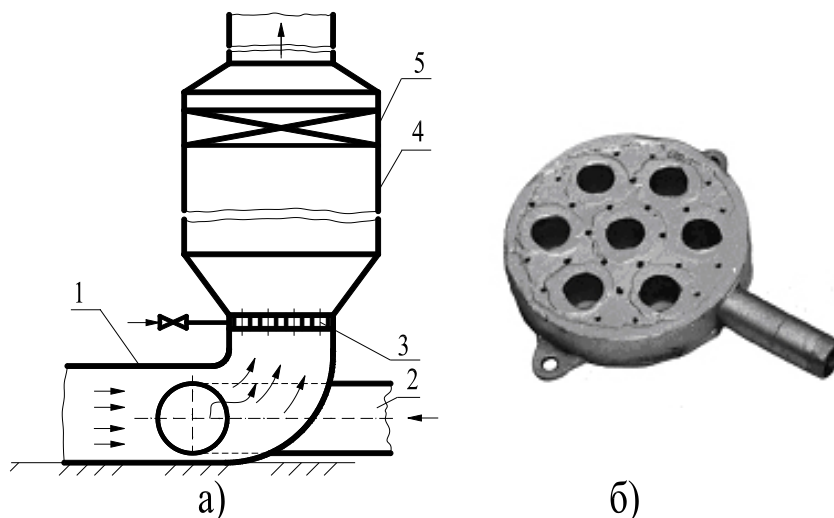
вказаних агрегатів потребує модернізації. Така модернізація може проводитися або шляхом повної заміни газоперекачувального обладнання на нове, сучасне, або шляхом заміни чи модернізації окремих частин агрегатів, з метою приведення технічних характеристик агрегатів до сучасних вимог. Враховуючи брак коштів на повну заміну існуючого парку газоперекачувальних агрегатів на нові, найбільш перспективною є заміна та модернізація окремих вузлів та частин обладнання.

В основу технічної пропозиції щодо модернізації камери згоряння ГТК-10 НЗЛ було покладено перетворення вихрової структури первинної зони горіння на основі використання трубчастої технології спалювання газу [6,7], розробленої спільно Національним технічним університетом «Київський політехнічний інститут», Інститутом газу Національної Академії наук України та ВАТ «Укргазпроект». За результатами проведених порівняльних експлуатаційних випробовувань [10] газоперекачувальних агрегатів ГТК-10 НЗЛ з двома варіантами фронтальних пристроїв: зі штатними реєстровими пальниками та з оптимізованими трубчастими пальниками, встановлено можливість одночасного покращення показників надійності експлуатації, підвищення екологічної безпеки та енергетичної ефективності.

Результати порівняння техніко-економічних показників ГПА ГТК-10 при роботі з двома варіантами камери згоряння (на основі викори-

Таблиця 1 – Техніко-економічні показники ГПА ГТК-10 при роботі з різними варіантами камери згоряння

№ з/п	Показники	Одиниця виміру	Фактичні значення		Значення за ТУ
			варіант I	варіант II	
1	Приведена ефективна потужність	кВт	8240	8908	8908
2	Приведені витрати природного газу	м <sup>3</sup> /год	3050	2943	3313
3	Питомі витрати природного газу	м <sup>3</sup> /кВт·г	0,364	0,33	0,372
4	Коефіцієнт корисної дії ГТУ	%	27,9	31,5	28,03



1 – газохід ГТУ; 2 – колектор подачі повітря; 3 – пальник трубчастого типу; 4, 5 – топка та конвективні поверхні утилізатора

Рисунок 8 – Схема установки трубчастого пальника перед котлом-утилізатором з доспалюванням (а) та загальний вигляд трубчастого пальника (б)

стання штатних регістрових пальників та патрубків – варіант I і оптимізованих трубчатих пальників – варіант II) наведені в таблиці 1.

При практично однаковому споживанні паливного газу ( $Q_{\text{пр.г}} \approx 3000$  м<sup>3</sup>/год) приведена ефективна потужність газоперекачувального агрегату при роботі з модернізованим варіантом камери згоряння суттєво перевищує аналогічний показник експлуатованих штатних пристроїв. При цьому збільшується приріст ефективного коефіцієнта корисної дії ГПА на 3,6%.

Діючі газоперекачувальні агрегати оснащені котлами-утилізаторами, але їх використовують як резервну систему для теплопостачання будівель та споруд компресорних станцій, через зупинки агрегатів на технологічні, діагностичні та ремонтні роботи. Враховуючи те, що парк газоперекачувальних агрегатів потребує термінової модернізації, а існуючі газоперекачувальні агрегати мають великий утилізаційний тепловий потенціал [4,5], є реальна можливість використати його також для теплопостачання комунальних споживачів найближчих населених пунктів. Тому пропонується виконувати модернізацію ГПА КС з заміною камер згоряння газотурбінних установок та дооснащенням систем утилізації тепла за рахунок включення в роботу когенераційно-утилізаційних систем «ГТУ–котел» з доспалюванням палива (рис. 8).

Для таких умов з успіхом можуть бути використані трубчасті пальники, аналогічні тим, що можуть бути використані при модернізації камер згоряння. Такі пальники характеризуються простотою конструкції, технології виготовлення та монтажу; незначним аеродинамічним опором та практично можливістю нарощування теплової потужності.

Враховуючи технічну можливість дооснащення газоперекачувальних агрегатів такою системою утилізації енергії викидних газів, з'явиться можливість використати енергію викидних газів для теплопостачання технологічних та комунальних споживачів як основне джерело теплопостачання, що дає змогу раціонально використовувати паливний газ та суттєво підвищити коефіцієнт використання палива. Впровадження трубчастої технології не вимагає значних капіталовкладень, може бути виконане силами персоналу компресорних станцій в стилі терміні (наприклад в ремонтний період). Термін окупності затрат на модернізацію камер згоряння та газоходів складає декілька місяців, а очікувана річна економія паливного газу тільки на одному агрегаті ГТН-10 сягає до 3 млн. м<sup>3</sup> природного газу на рік.

### Висновки

Україна володіє однією з найбільших газотранспортних систем в Європі, але використан-



ня енергозберігаючих технологій остаточного теплового потенціалу обладнання вкрай низьке, та становить всього 4%, хоча 80% парку газоперекачувальних газотурбінних агрегатів оснащенні утилізаційним обладнанням. У зв'язку з тим, що близько 20% парку газотурбінних агрегатів виробили свій моторесурс, а близько 50% існуючих газоперекачувальних агрегатів фізично та морально застаріли та потребують заміни на більш сучасні, враховуючи величезні капітальні витрати такої заміни, запропонована модернізація камер згорання газоперекачувальних агрегатів шляхом заміни пальникових пристроїв на прямоочні трубчасті та дооснащення утилізаційних систем блоками доспалювання газу дасть змогу задіяти наявні потужності для використання в комунальній теплоенергетиці та суттєво підвищить ефективність використання природного газу.

### Література

- 1 Шнеэ Я.И. Газовые турбины. Часть первая – термодинамические процессы и теплообмен в конструкциях / Я.И. Шнеэ, В.М. Капинос, И.В. Котляр. – К: Высшая школа, 1976. – 295 с.
- 2 Газотурбинные установки: справочное пособие; под общ. ред. Л.А. Арсеньева и В.Г. Тырышкина. – Л.: Машиностроение, 1978. – 230 с.
- 3 Костюк А.Г. Газотурбинные установки / А.Г. Костюк, А.Н. Шерстюк. – М.: Высшая школа, 1979. – 253 с.
- 4 Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения / В.Т. Матвеев // Промышленная теплотехника. – 1997. – Т. 19, № 4-5. – С. 81–85.
- 5 Повышение эффективности использования тепла уходящих газов газотурбинных установок компрессорных станций магистральных газопроводов / А.Г. Вертепов, Ю.Н. Васильев // Газовая промышленность. – 1980. – Вып. 2. – 35 с. – Серия: Транспорт и хранение газа.
- 6 Система показателей эффективности камер сгорания ГТУ / Г.Н. Любчик // Известия вузов. – 1978. – № 12. – С. 47–52. Серия: Энергетика.
- 7 Актуальні проблеми модернізації газотурбінних газоперекачуючих агрегатів / Р.М.Говдяк, Б.І.Шелковський, Г.М.Любчик, Г.Б.Варламов // Екотехнології та ресурсозбереження. – 2003. – № 5. – С. 66–72.
- 8 Модернизация ГПА стационарного типа в условиях компрессорных станций / О.Васин, П.Завальный, А.Михайлов, Ю.Русецкий // Газотурбинные технологии. – 2001. – № 1. – С. 22–25.
- 9 Использование конструктивных особенностей и аэродинамических эффектов насадка Борда при создании малотоксичных топливосжигающих модулей / Г.Н.Любчик, Г.А.Микулин, Г.Б.Варламов и др. // Технологические системы. – 2002. – Вып. 1, №2 (13). – С. 130–133.
- 10 Деякі попередні результати виробничих випробувань модернізованої камери згорання ГПА ГТК-10 на основі трубчастих пальників / Р.М.Говдяк, Л.Б.Чабанович, Б.І.Шелковський, Г.М.Любчик, Я.С.Марчук, В.І.Ізбаш та ін. // Інформаційний огляд ДК «Укртрансгаз», липень – серпень 2006. – 4 (40). – С. 8–9.
- 11 Когенераційно-утилізаційні технології на базі газотурбінних установок / Г.Н.Любчик, Л.Б.Чабанович, Р.М.Говдяк, А.Реграги, Б.І.Шелковський. – К.: Ватра, 2008. – 185 с.
- 12 Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды / Б.М.Кривоногов. – Л.: Недра, 1986. – 280 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*17.02.11*

*Рекомендована до друку професором*

*Грудзом В.Я.*