

УДК 621.643

## РЕЗЕРВИ ЕНЕРГО-РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ І НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ НА КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЯХ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

<sup>1</sup>Р.М.Говдяк, <sup>2</sup>Г.М.Любчик, <sup>1</sup>Л.Б.Чабанович, <sup>1</sup>О.Г.Гриник, <sup>1</sup>Б.І.Шелковський

<sup>1</sup> ВАТ „Укргазпроект”, 04050, Київ-50, вул. Артема, 77, тел. (044) 4840250  
ukrpro@i.kiev.ua

<sup>2</sup> Національний технічний університет України „КПІ”, 03056, Київ-56, проспект Перемоги, 37,  
тел. (044) 4549948, lubchikgen@i.kiev.net

*Рассматриваются направления и новые технологии снижения расходов энергоносителей, увеличение эффективности использования природного газа на компрессорных станциях и преобразования их в относительно экологически чистые энерготехнологические комплексы комбинированного производства различных видов энергии и воды.*

*Directions and new technologies of the cost cutting of power mediums, multiplying efficiency of the use of natural gas on the compressor stations and transformation of them in is relative ecologically clean power technological complexes of the combined production of different types of power and water, are examined.*

Газова промисловість України є провідною галуззю паливно-енергетичного комплексу нашої держави. Від забезпечення надійності її роботи значною мірою залежить стабільність та розвиток національної економіки, а також надійність поставок природного газу на експорт до країн Європи.

Вдале географічне положення України – на основних шляхах транспортування природного газу з потенційно найбільших у світі газодобувних регіонів Росії, Середньої Азії і Близького Сходу до основних споживачів газу – країн Центральної і Західної Європи – ставить нашу державу в ряд країн, які можуть бути гарантом газозабезпечення цих споживачів.

Газотранспортна система України (ГТС), крім транзитної поставки близько 120 млрд.м<sup>3</sup> природного газу на рік у країни Центральної і Західної Європи і близько 15 млрд.м<sup>3</sup> – до Молдови та південних областей Росії, виконує важливу функцію подачі газу для внутрішніх потреб держави в об'ємах близько 76 млрд. куб. м на рік, включаючи власні технологічні потреби системи. Ця система за своєю потужністю займає друге місце у Європі (після Росії) і її пропускна спроможність становить 287,7 млрд. куб.м/рік газу на вході і 178,5 млрд.куб.м/рік – на виході.

ГТС України включає: понад 36,6 тис.км газопроводів (22,2 – магістральних газопроводів, 14,4 – газопроводів-відводів); 71 компресорну станцію (КС), 108 компресорних цехів загальною потужністю близько 5380 МВт, які оснащені 692 газоперекачувальними агрегатами вітчизняного та закордонного виробництва; 13 підземних сховищ (ПС) із загальною активною ємністю 30,8 млрд.м<sup>3</sup>; 1425 газорозподільних станцій. З'єднані у систему мережу газопроводів, підземні сховища забезпечують високу надійність функціонування всієї газотранспортної системи України, що є гарантом безперебійної поставки газу внутрішнім споживачам, а також транзиту газу до Європи.

У складі ГТС України, яка складається з ГПА 20-ти типів (вітчизняного і закордонного виробництва), у стані експлуатації знаходиться 438 газотурбінних ГПА (63% від загальної кількості), 158 електроприводних агрегатів (23%) та 96 поршневих газокompресорів (14%).

Газотурбінні ГПА (загальною потужністю 4,3 млн. кВт) споживають на власні потреби близько 4,5 млрд. м<sup>3</sup> газу на рік, а з вихлопними газами вони викидають понад 108·10<sup>9</sup> МДж теплоти. Щорічно всі КС споживають приблизно 1,5 млрд. кВт-год електроенергії. Близько 16% парку газотурбінних ГПА вже виробили свій моторесурс, близько 50% таких ГПА фізично і морально застаріли, мають порівняно низький ефективний ККД – 24-26%, незадовільні екологічні характеристики за рівнем шуму і концентрацією шкідливих (СО<sub>2</sub>) та токсичних (NO<sub>x</sub>) теплових викидів з вихлопними газами ГПА у навколишнє середовище.

Для підвищення енергетичної і екологічної ефективності та надійності ГТС в ДК "Укртрансгаз" здійснюється: програма реконструкції КС, програма реконструкції лінійної частини газотранспортної мережі та ін., згідно з якими сьогодні виконано низку важливих науково-дослідних, дослідно-конструкторських робіт і організаційно-технічних заходів щодо реконструкції КС і лінійної частини газотранспортної мережі. Ці програми призначені для реалізації у період до 2010 р.

На даний час розроблено програма науково-технічного прогресу газової промисловості України до 2030 р. Вказані програми містять комплекс заходів щодо поліпшення енерго-екологічних показників та надійності роботи об'єктів ГТС України, які включають: заміну морально і фізично застарілих ГПА на агрегати з поліпшеними енергетичними та екологічними характеристиками; утилізацію вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) на КС з газотурбінними ГПА, у тому числі теплового потенціалу вихлопних газів та надлишкового тиску приро-

дною газу на КС, газорозподільних станціях (ГРС), газорегулювальних пунктах (ГРП), на великих об'єктах споживання природного газу тощо.

Згідно з цими програми передбачається реконструкція компресорних станцій на основі заміни морально та фізично застарілих ГПА сучасними газотурбінними приводами вітчизняного виробництва (ДПНВК газотурбобудування "Зоря-Машпроект" (м. Миколаїв) [1], ВАТ Мотор-Січ" [2] (м. Запоріжжя) та ВАТ „Сумське НПО ім. М.В.Фрунзе”) з поліпшеними енергетичними і екологічними характеристиками: ГПА-Ц-6.3А, ГПА-Ц-6.3С, ГПА-Ц-16С, ГПА-25С та ін. Значне підвищення ефективного ККД ГПА нового покоління досягнуто переважно за рахунок збільшення початкових параметрів термодинамічного циклу: температури продуктів згоряння газу перед турбіною і ступеня стиснення циклового повітря. При цьому температура вихлопних газів агрегатів нового покоління сягає рівня 470–550°C та вище, що утворює джерело значної кількості вторинних енергоресурсів.

Ефективна утилізація теплового потенціалу вихлопних газів енергетичних ГТУ реалізується передовими фірмами (General Electric, Mitsubishi, Siemens, ABB, Westinghouse та ін.) на основі застосування комбінованих бінарних парогазових установок (ПГУ), в результаті чого досягається абсолютний приріст ККД таких установок на 17...18% (при загальному рівні ККД ПГУ до 60%) з одночасним підвищенням потужності ПГУ майже на 40% порівняно з базовою ГТУ, що працює по простому циклу. Застосування бінарних ПГУ на компресорних станціях наштовхується на значні труднощі технічного, технологічного та економічного походження – через ускладнення технологічної схеми установки, погіршення надійності експлуатації та ремонтпридатності обладнання, суттєве підвищення матеріало- та металоємності і, як наслідок, виникає необхідність в значних капіталовкладеннях на будівництво самої ГПА та у витратах на її експлуатацію. Тому використання ПГУ на КС магістральних газопроводів для привода нагнітачів газу обмежується декількома дослідно-промисловими установками. Згадану технологію можна застосовувати лише для електропостачання КС і зовнішніх споживачів електричної енергії поблизу станцій.

Більш реальним в найближчі роки є застосування на КС України монарних парогазових установок (спільна розробка ДПНВК газотурбобудування "Зоря-Машпроект" (м. Миколаїв) та НТУУ "КПІ"), які працюють за циклом "Водолій" і можуть генерувати як електричну, так і механічну енергію [3, 4]. В основу цієї технології покладено подачу пари до камери згоряння газової турбіни, утворення та подачу робочого тіла (у вигляді суміші продуктів згоряння та водяної пари) до газопарової турбіни і регенерацію вологи у вигляді водяного конденсату у контактному конденсаторі.

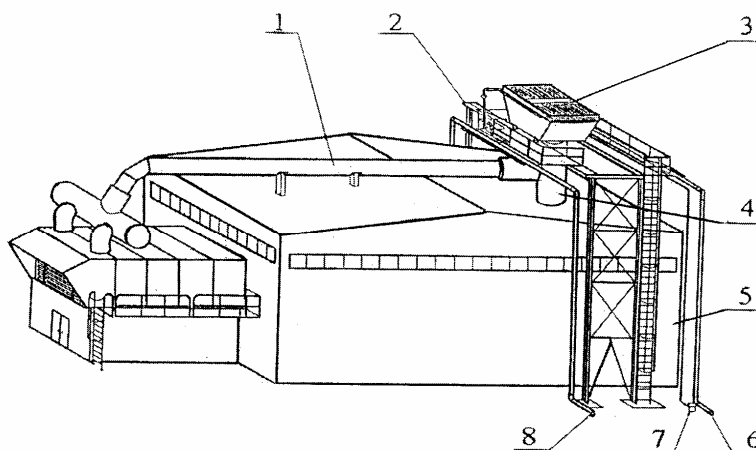
На базі вискоелективних суднових ГТД типу GT1000S і GT1500S розроблено два типи

промислових установок «Водолій» потужністю 16 і 25 МВт та ККД 43 і 45% в умовах ISO. Технологія „Водолій” і установки цього типу, на відміну від ГТУ простого циклу, дають змогу одержувати постійну потужність у діапазоні температур зовнішнього повітря від мінус 40 до плюс 50°C; виробляти електричну (або механічну) і теплову енергію у вигляді пари і гарячої води для теплопостачання споживачів; одержувати низькі рівні емісії NO<sub>x</sub> і CO<sub>2</sub>. На номінальному режимі (при оптимальному співвідношенні екологічної пари до паливного газу – 1,5) рівень NO<sub>x</sub> для установок потужністю 16 МВт становить приблизно 35 млн<sup>-1</sup> (близько 70 мг/м<sup>3</sup>) а потужністю 25 МВт — не більше 25 млн<sup>-1</sup> (близько 50 мг/м<sup>3</sup>). Наведені показники підтверджуються досвідом промислової експлуатації монарної ПГУ потужністю 16 МВт на КС Ставищенська ДК «Укртрансгаз», де спостерігається зменшення на 40% питомих викидів вуглекислого газу [4]. У перспективі установки „Водолій” мають значні потенційні можливості збільшення їх ефективного ККД до 55–57%.

Напрямок радикального підвищення ефективності газотурбінних ГПА – на основі заміни морально і фізично застарілих агрегатів на агрегати нового покоління – у будь-якому разі потребує значних капіталовкладень для своєї реалізації і відповідно високого терміну реалізації та терміну окупності, що є суттєвим обмеженням стосовно можливості швидкої реалізації цього напрямку у газотранспортній системі України. Додатковим обмеженням є відсутність відповідного резерву потужності парку ГПА України.

За таких умов ефективним напрямком зниження витрат природного газу та інших енергоносіїв на КС є: застосування маловитратних технологій, використання вторинних енергоресурсів на основі забезпечення власних технологічних потреб КС у різних видах енергії (і, частково, зовнішніх споживачів) за рахунок утилізації теплоти вихлопних газів ГПА у водяних теплоутилізаторах, а також (за необхідності) когенерації теплової енергії на основі застосування блоків допалюючих пристроїв та підігрівачів мережевої води.

Цей напрямок скорочення витрат енергоносіїв на КС є досить перспективним, зважаючи на те, що використання теплових ВЕР на КС України становить менш ніж 4% (від загального потенціалу ВЕР), і до 80% ГПА на газотурбінному приводі оснащені теплофікаційними теплообмінниками, розробленими у свій час провідними інститутами галузі: "Укргазпроект" та "ВНПТрансгаз" (м. Київ), "Гіпроспецгаз" (м. Санкт-Петербург), СНПО ім. М.В.Фрунзе (м. Суми), Інститутом технічної теплофізики НАН України (м. Київ) для всіх типів вітчизняних та деяких закордонних ГПА і газотурбінних електростанцій на основі застосування оребрених поверхонь нагрівання, які відрізняються високою тепловою ефективністю, невисоким аеродинамічним опором (не більше 0.5...0.7 кПа), низькою питомою металоємністю на одиницю утилізованого тепла, і забезпечують збільшення



1 – газохід; 2 – рухома опора; 3 – утилізаційний теплообмінник; 4 – вихлопна труба; 5 – укриття агрегату; 6 – загальний колектор холодної води; 7 – дренажний трубопровід; 8 – загальний колектор гарячої води

**Рисунок 1 — Теплоутилізаційна установка ВАН «Укргазпроект» для газоперекачувального агрегату ГТК-10І фірми «АЕГ КАНІС»**

енергетичної ефективності використання паливного газу агрегатів у 1,5–2,0 рази та зниження шуму їхнього вихлопу (рис. 1) [5].

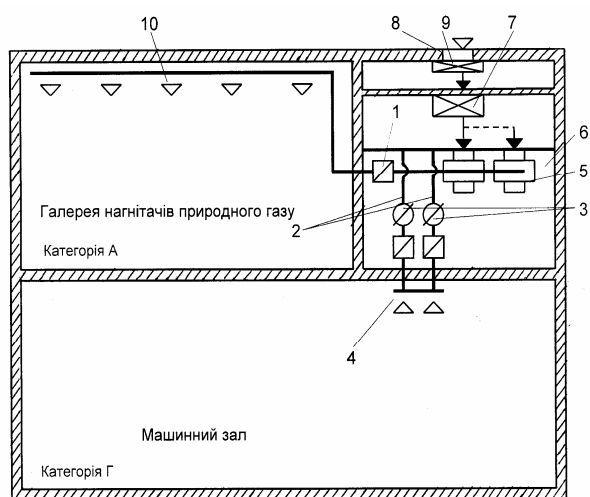
В останні роки у зв'язку з розробкою і промисловим освоєнням ГПА нового покоління створено нові ефективні утилізаційні теплообмінники для оснащення цих агрегатів. Їх застосування (за наявності відповідних споживачів теплової енергії) дає змогу підвищити коефіцієнт використання палива (КВП) до рівня 70-80%.

Перспективним теплоносієм, особливо для умов Півночі, є повітря. Оскільки у машинних залах газотурбінних і електропровідних агрегатів підігрів повітря у технологічних будівлях КС переважно здійснюється від декількох джерел, у тому числі від реєстрів водяного опалення, зовнішніх поверхонь ГПА (за рахунок природної конвекції системи повітряного охолодження електроприводу), співробітниками ВАТ «Укргазпроект» розроблено і впроваджено системи повітряного теплопостачання цехів КС та індивідуальних укриттів ГПА від одного джерела теплого повітря (рис. 2). Запропоновані системи повітряного теплопостачання споруд КС – енергетично високоефективні, прості в конструктивному виконанні, вимагають мінімальних матеріальних витрат [5, 6].

Газотранспортна система України має значний потенціал утилізації енергії надлишкового тиску природного газу і великий досвід використання цього потенціалу при виробництві електричної, теплової енергії та холоду, а також у розробці сучасних утилізаційних турбодетандерних установок для КС, ГРС і ГРП.

Основними джерелами енергії надлишкового тиску є магістральні газопроводи, які працюють під тиском від 5,4 до 7,4 МПа та газові розподільні станції, де перед подачею у розподільну мережу відбувається зниження тиску природного газу до 0,3...1,2 МПа.

Детальну інформацію щодо турбодетандерних установок подано в роботі [7].



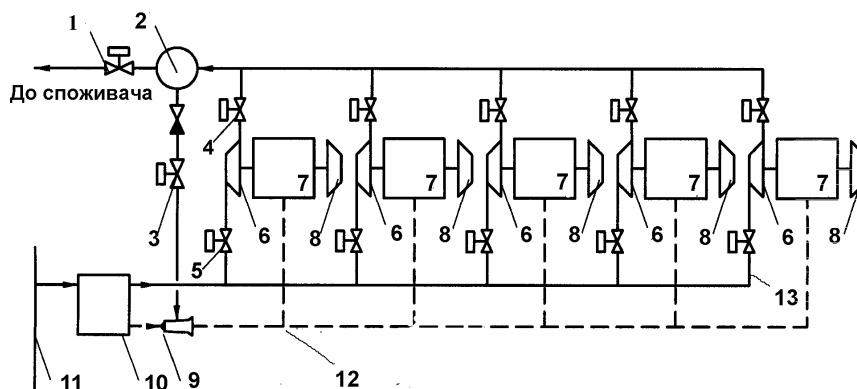
1 – універсальний зворотний вогнезатримуючий клапан; 2 – повітропроводи; 3 – засувка з ручним керуванням; 4 – всмоктувальний короб; 5 – вентиляційний агрегат; 6 – вентиляційна камера; 7 – калорифер; 8 – вузол повітрозбору; 9 – утеплений багатостулковий клапан; 10 – розподільний повітропровід

**Рисунок 2 — Принципова схема повітряного теплопостачання галереї нагнітачів компресорних цехів способом перепуску теплого повітря машинного залу ГПА з газотурбінним приводом**

Сьогодні в газотранспортній системі України працює 1425 газорозподільних станцій (ГРС), через які щорічно надходить промисловим, комунально-побутовим та бюджетним споживачам близько 76 млрд. м<sup>3</sup> природного газу.

Якщо весь природний газ, який споживається в Україні, подавати через турбодетандери, то оціночно на ГРС можливо отримати додатково понад 160 МВт генеруючих потужностей, що зможуть щорічно виробляти понад 1,4 млрд. кВт/год електроенергії.





1, 3, 4, 5 – кран із пневмоприводом; 2 – газозбірник; 6 – пускова турбіна; 7 – турбокомпресор; 8 – нагнітач; 9 – ежектор; 10 – блок підготовки паливного, пускового, імпульсного газів; 11 – магістральний трубопровід; 12 – паливний газ; 13 – пусковий газ

**Рисунок 4 — Принципова технологічна схема запуску газотурбінних ГПА природним газом з подальшою утилізацією**

наявністю власного виробництва таких установок, у тому числі ВАТ «Турбоатом» – потужністю від 8 кВт до 6,6 МВт, ВАТ ІВП «Енергія» – потужністю 5 та 6 МВт, ДП НВКГ «Зоря-Машпроект» – потужністю 2,2, 2,5 та 3 МВт, а також ВАТ «Мотор-Січ» – потужністю 2 та 3,4 МВт, а також досвіду впровадження цієї технології на діючих ГПА.

У газовій промисловості України пальні вторинні ресурси – значні за об'ємом. Вони складаються переважно з: технологічних потреб КС у газі при пусках-зупинках ГПА і продувках пилотівловлювачів; технологічних витрат лінійної частини газопроводів, підземних сховищ газу; викидів газу при ремонті газопроводів і їх скорочення і є важливим напрямком ресурсозбереження.

Більше чверті століття тому у газовій промисловості було розроблено і частково впроваджено комплекс науково-технічних рішень щодо скорочення технологічних втрат природного газу в 2,5-3 рази. Так, ВВПТрансгазом була розроблена і впроваджена на газорозподільних станціях (ГРС) принципово нова безвідаткова система продувки пилотівловлювачів. Інститутами «Укргазпроект», «ВВПТрансгаз» розроблені (на рівні винаходів) науково-технічні рішення щодо утилізації паливних ВЕР – скорочення і використання викидів природного газу для технологічних потреб КС, які ще й досі не впроваджені.

На рис. 4 зображено розроблену ВАТ «Укргазпроект» принципову технологічну схему запуску газотурбінних ГПА з пусковими турбодетандерами на природному газі з подальшим його збиранням і використанням на технологічні і загальнотехнічні потреби КС (як паливо агрегатів, котельнь, для заправки автомобілів тощо).

Запуск агрегатів здійснюється у такий спосіб. Пусковий газ з магістрального газопроводу через блок підготовки паливного, пускового та імпульсного газів та кран з пневмоприводом надходить у пускову турбіну, де після розширення через кран 4 надходить у газозбірник. Паливний газ після блоку підготовки газу над-

ходить у високонапірне сопло ежектора, а до його низьконапірної камери з газозбірника при відкритому крані 3 надходить утилізований пусковий газ, який змішується з високонапірним газом і надходить до камери згоряння ГПА.

Для виключення викидів газу при пуску газотурбінних ГПА як робоче тіло (замість пускового газу) може використовуватися стиснене повітря.

З початку 90-х років при реконструкції компресорних станцій газопроводів України, Росії та інших держав колишнього СРСР ключовими стали дві проблеми – модернізація газотурбінного устаткування з метою підвищення його ефективності та надійності роботи і зниження викидів токсичних оксидів азоту.

На даний час технічна база для реконструкції компресорних станцій має такий набір технологічних рішень:

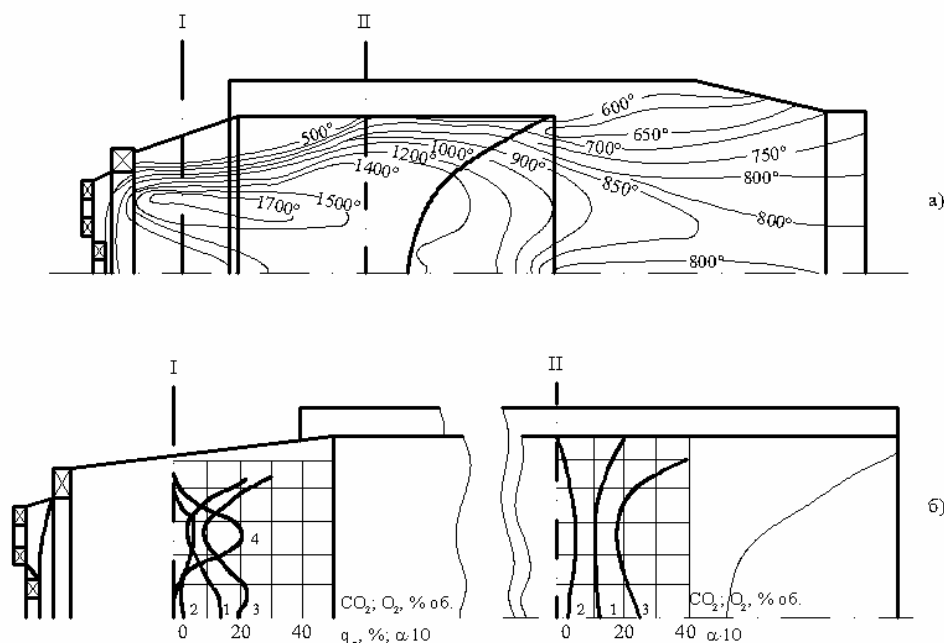
- модернізація ГПА (переведення на регенеративний цикл, повузлова реновація, подовження ресурсу і т.д.)

- реконструкція елементів ГПА в загальному і індивідуальному будинках у таких модифікаціях: заміна привода зі збереженням нагнітача, заміна привода із застосуванням змінної проточної частини в штатному корпусі нагнітача, повна заміна ГПА;

- заміна привода в існуючому контейнері;
- заміна контейнерного ГПА на існуючій фундаментній площадці (можливо зі збільшенням потужності).

Для заміни застарілого привода найбільш поширеного агрегату ГТК-10 регенеративного типу ДПНВК газотурбобудування «Машпроект» (м. Миколаїв) розроблено газотурбінний двигун ДН-70 потужністю 10 МВт, ефективний ККД якого становить 36%. Однак через технічні і фінансові причини парк ГПА неможливо обновили за короткий термін.

Конструктивні рішення ГПА ГТК-10 забезпечують можливість їх часткового ремонту в умовах КС, завдяки чому можливе продовження їх експлуатації на 12-15 років понад установлений ресурс.



1 та 2 – розподіл кисню ( $O_2$ ) та діоксиду вуглецю ( $CO_2$ ); 3 – розподіл локальних коефіцієнтів надлишку повітря ( $\alpha_{лок}$ ); 4 – розподіл хімічної неповноти згорання ( $q_3$ )

**Рисунок 5 — Розподіл температур (а) та результати діагностики складу продуктів згорання (б) за результатами стендових випробувань**

Основними напрямками модернізації ГТК-10 з метою відновлення і поліпшення їх характеристик є:

- заміна регенераторів пластинчастого типу на більш надійні прямо трубні (на першому етапі) і на ще більш надійні, компактні і менш металомісткі – трубні на базі застосування трубчастих змійовиків з малими радіусами згину (у майбутньому);
- заміна утилізаторів теплоти вихлопних газів агрегатів, у тому числі з застосуванням оребрених поверхонь теплообміну;
- зменшення радіальних проміжків турбін і заміна вставок турбін;
- заміна змінних проточних частин нагнітачів на більш ефективні;
- модернізація камер згорання.

Модернізацію ГПА ГТК-10 доцільно здійснювати на основі впровадження комплексних заходів, включаючи реабілітацію регенератора і модернізацію камери згорання цього агрегату. Одночасне впровадження цих заходів не тільки дасть змогу суттєво підвищити економічні показники і надійність роботи ГПА, але і забезпечить підвищення їх екологічної безпеки, а значна економія палива при роботі даного типу ГПА в нормальному регенераційному режимі дасть змогу одержати швидку компенсацію витрат на модернізацію регенератора і камери згорання.

НТУУ “КПІ” спільно з ВАТ “Укргазпроект” розробили технічну пропозицію по модернізації штатних камер згорання ГТК-10 (рис. 4), суть якої полягає в заміні шести периферійних пальників реєстрового типу на таку ж кількість прямо трубних пальників трубчастого типу (I-ий етап модернізації) та збільшені первинного надлишку повітря (II-ий етап модернізації).



**Рисунок 6 — Загальний вигляд штатного реєстрового пальника (а) камери згорання ГПА ГТК-10 та трубчастого пальника (б) для першого варіанту модернізації камери згорання цього агрегату**

Аналіз результатів стендових випробувань камери згорання ГТК-10 зі штатними пальниками реєстрового типу (рис. 6, а) свідчить, що причиною збільшення емісії оксидів азоту в ГПА на базі ГТК-10 є одночасний вплив таких факторів:

– низького надлишку первинного повітря в зоні горіння ( $\alpha \rightarrow 1,1$ ), що є причиною її підвищеного температурного рівня (рис. 5, б);

– застосування вихрових пальників (рис. 6, а);

– високої температури повітря на вході в камеру згоряння (значно перевищує 400 °С);

– завищеного об'єму зони горіння (до вихрового змішувача камери згорання), що визначає низьку теплову напругу цієї зони ( $qV \approx 70 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па})$ ) та збільшення часу перебування продуктів згорання у ній.

Наведені на рис. 5, б результати стендових випробувань камери згоряння ГТК-10 зі штатними реєстровими пальниками фіксують утворення високотемпературних “жгутів” у первинній зоні горіння ( $t = 1700^\circ\text{C}$  та вище), що є додатковою причиною збільшення емісії  $\text{NO}_x$  і утворення суттєвої нерівномірності поля температур продуктів згоряння у газозбірнику турбіни високого тиску, що є причиною обмеження ефективної потужності і зниження ККД ГПА [8].

Модернізація камери згоряння на I-му етапі проведена за умов мінімальної зміни конструкції фронтального пристрою камери згорання та використання штатної системи запуску камери згоряння і штатної системи регулювання ГПА. У зв'язку з поставленими умовами на першому етапі модернізації було розроблено трубчастий пальник (рис. 6, б) з прохідними перерізами по повітрю та паливу, що еквівалентні аналогічним показникам штатних реєстрових пальників. При цьому у камері згоряння ГТК-10 (рис. 5, а) було залишено центральний черговий пальник реєстрового типу, а замість шести штатних реєстрових пальників (рис. 6, а) було змонтовано таку ж кількість прямооточних пальників трубчастого типу (рис. 6, б).

Випробування модернізованої камери згоряння (з I-им варіантом трубчастих пальників), що відбулися на ГПА ГТК-10 станції № 4 на Бердичівській КС УМГ “Київтрансгаз” підтвердили: безвідмовність та “мякість” запуску модернізованої камери згоряння при використанні штатного чергового пальника; високу ефективність роботи модернізованої камери згоряння при використанні штатної системи регулювання ГПА в широкому діапазоні зміни режимів роботи установки.

В результаті візуального огляду стану елементів конструкції після зупинки ГПА не було виявлено будь-яких дефектів елементів конструкції та інших негативних ознак, а за результатами екологічних обстежень, виконаних співробітниками СПНУ УМГ „Київтрансгаз”, виявлено значне зниження емісії оксидів азоту (на 30...40%) порівняно з адекватними режимами роботи ГТУ зі штатною камерою згоряння.

З аналізу результатів екологічних обстежень встановлено суттєвий вплив коефіцієнта надлишку повітря на фронтальному пристрої на величину емісії оксидів азоту, що стало підставою подальшого вдосконалення конструкції трубчастих пальників за рахунок збільшення подачі повітря в первинну зону горіння. На під-

ставі цього висновку було розроблено другий, оптимізований варіант трубчастого пальника зі збільшеним на 50% прохідним перетином по повітрю.

Випробування роботи модернізованої камери згоряння з оптимізованими трубчастими пальниками проведено також на ГПА ГТК-10 ст. № 1 Бердичівської КС УМГ “Київтрансгаз”.

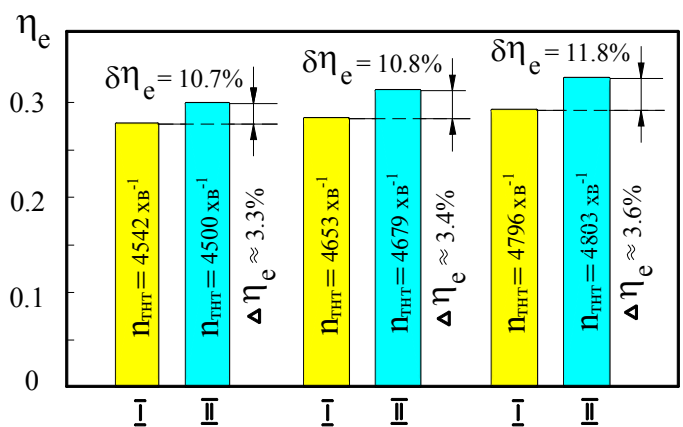
Порівняння результатів екологічної діагностики продуктів згоряння при роботі камер згорання ГПА ГТК-10 станції №4 (зі штатними реєстровими пальниками) та станції № 1 (зі штатними реєстровими пальниками та патрубками локального дозованого вдуву), а також з двома варіантами пальників трубчастого типу показали, що заміна на першому етапі модернізації реєстрових пальників на трубчасті при однаковій подачі повітря в первинну зону дає (за однозначних умов експлуатації) зменшення емісії оксидів азоту приблизно на 30% за достатньо низького рівня емісії  $\text{CO}$ .

На другому етапі модернізації (за рахунок застосування трубчастих пальників зі збільшеною кількістю повітряних трубок) досягнуто зниження емісії  $\text{NO}_x$ : від рівня  $\text{NO}_x (\text{O}_2=15\%) \approx 870 \text{ мг}/\text{м}^3$  до  $\text{NO}_x (\text{O}_2=15\%) \approx 240 \text{ мг}/\text{м}^3$  на режимі роботи ГТУ, близькому до номінального.

Зниженням емісії оксидів азоту при застосуванні модернізованої камери згоряння (порівняно зі штатними реєстровими пальниками) відбувається за рахунок зменшення часу перебування реагуючих газів у зоні горіння (порівняно з реєстровими пальниками), зменшення середнього рівня температур у зоні горіння за рахунок збільшення подачі повітря через фронтальний пристрій з трубчастими пальниками з одночасним зменшенням подачі паливного газу (приблизно на 10% при однаковій ефективній потужності ГПА). При цьому досягається зниження емісії  $\text{CO}$  за рахунок поліпшення ефективності сумішоутворення у зоні горіння паливного газу та підвищення однорідності структури цієї зони.

В результаті проведеної модернізації ГПА ГТК-10-4 досягнуто не тільки покращання екологічних показників установки, але й суттєве підвищення ефективності робочого процесу камери згоряння в результаті заміни реєстрових (штатних) пальників на трубчасті (прямоточні), що дало змогу знизити рівень необоротних втрат енергії у камері згоряння ГПА за рахунок зниження аеродинамічного та термічного опору трубчастих пальників порівняно з реєстровими, зменшення середнього рівня температур та можливого зниження хімічної неповноти згоряння, підвищення рівномірності поля температур та однорідності аеродинамічної структури потоку продуктів згоряння перед ТВТ, зниження рівня температур газів за ТНТ.

В результаті такої модернізації досягнуто приріст ( $\Delta\eta_e$ ) ефективного ККД ГПА порівняно з варіантом, коли ГПА оснащено штатною камерою згоряння з реєстровими пальниками та патрубками локального дозованого вдуву (ЛДВ) у середньому на 3,4% (рис. 7), що еквівалентно відносному приросту ( $\delta\eta_e = 100 \cdot \Delta\eta_e / \eta_e$ , %) ККД



I – варіант камери згоряння зі штатними пальниками та патрубками ЛДВ;  
 II – модернізований варіант камери згоряння з оптимізованими пальниками трубчастого типу

**Рисунок 7 — Порівняння абсолютного (Δη<sub>e</sub>) та відносного (δη<sub>e</sub>) приросту ККД зі штатним (I) та модернізованим (II) варіантами камери згоряння ГПА ГТК-10-4 на різних режимах експлуатації**

приблизно на 10,7...11,8% (залежно від режиму експлуатації) і такому ж рівню економії природного газу на привод ГПА [9].

При застосуванні трубчастої технології тільки на одному ГПА за рахунок зниження витрат паливного газу на власні потреби на 10% економічний ефект складає близько 1 млн. грн. на рік (при терміні реалізації 1 місяць з терміном окупності заходів по застосуванню трубчастої технології 1-2 місяці).

В результаті модернізації камери згоряння досягається підвищення надійності експлуатації ГПА ГТК-10 за рахунок високої ефективності роботи модернізованої камери згоряння в широкому діапазоні режимів експлуатації ГПА та розширення запасу по ефективній потужності агрегату; підвищення коефіцієнта надлишку повітря у камері згоряння ГПА (приблизно на 10% при однаковій ефективній потужності); утворення однорідної термічної структури потоку та підвищення рівномірності поля температур газів перед сопловим апаратом ТВТ; зниження рівня максимумів температур перед турбіною високого тиску при однозначній ефективній потужності (з оптимізованим і штатним варіантом камери згоряння).

Вирішення проблем розробки та впровадження енергозберігаючих і ресурсозберігаючих технологій та обладнання нерозривно пов'язано з питаннями охорони навколишнього середовища. Підвищення ефективності використання природного газу на КС впровадженням більш енергетичних і екологічно ефективних ГПА, скороченням і використанням горючих ВЕР, модернізацією камер згоряння агрегатів, ефективного використання їх теплових ВЕР в утилізаційних теплообмінниках і парогазових установках поряд з підвищенням якості ремонтів енерготехнологічного обладнання КС, а також оптимізація режимів роботи газотранспортної системи дають змогу знизити її негативну дію на навколишнє середовище

У результаті реалізації технологій очищення природного газу на КС із застосуванням ци-

клонних пиловловлювачів, фільтрів-сепараторів, а також при очищенні внутрішньої порожнини труб газопроводів за допомогою очисних поршнів на компресорних станціях накопичуються значні об'єми твердих і рідинних забруднюючих речовин, до складу яких входять рідинні нафтопродукти, метанол, діетиленгліколь, вода, масло, шлам, механічні домішки тощо. Якість і повнота утилізації цих видів забруднюючих речовин багато в чому визначає екологічну чистоту ґрунту і водоймищ у районі розташування компресорної станції. На компресорних станціях накопичуються значні об'єми відпрацьованого масла з системи змащування і ущільнення елементів ГПА, яке потребує відповідної утилізації [10].

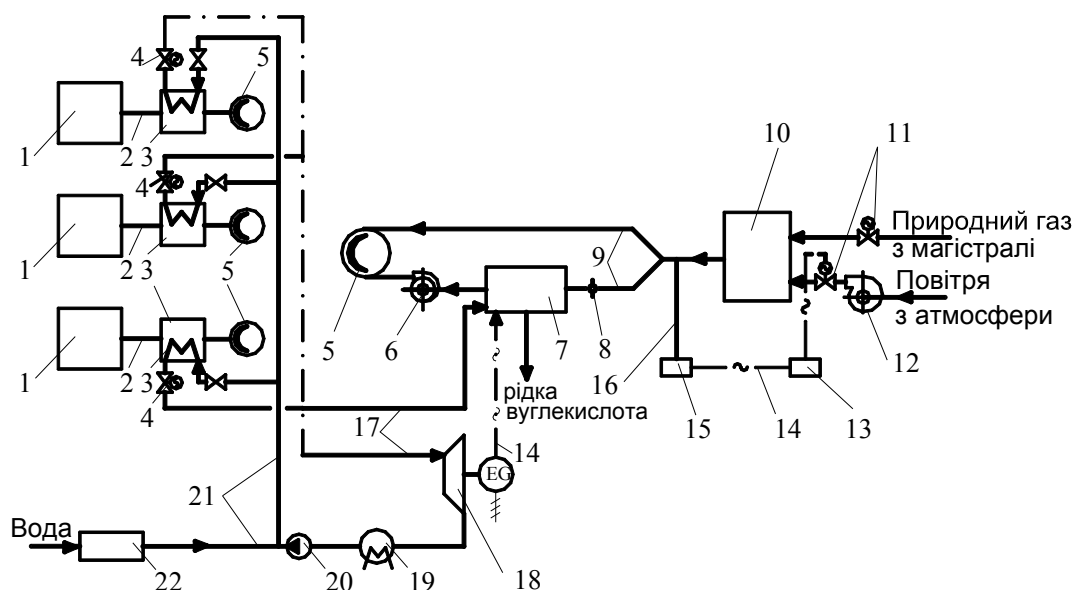
Джерелом забруднення навколишнього середовища можуть бути стічні води, які утворюються при експлуатації КС і мають у своєму складі залишки різних солей, нафтопродуктів, масел та побутових відходів. Якісне очищення стічних вод і утилізація виділених забруднюючих речовин із застосуванням сучасних технологій також дасть змогу значно знизити негативний вплив КС на навколишнє середовище.

Значну шкоду навколишньому середовищу наносять технологічні газові викиди, які утворюються при експлуатації КС і складаються з природного газу, та викиди відпрацьованих продуктів згоряння газотурбінних установок.

Із загальної кількості викидів природного газу на КС близько 85% припадає на викиди при пусках і зупинках ГПА, близько 10% – пов'язано з різного роду витіканнями газу через нещільності в обв'язці станцій і газопроводів і близько 5% – пов'язані з проведенням різного роду ремонтних робіт і внаслідок аварійних ситуацій [1].

В результаті згоряння паливного газу в камерах згоряння ГТУ і котелень до атмосферного повітря надходять: оксиди азоту (NO і NO<sub>2</sub>), оксид вуглецю CO, метан CH<sub>4</sub>, діоксид сірки SO<sub>2</sub> (у разі проскоку сірководню (H<sub>2</sub>S) після газоочищення), вуглекислий газ CO<sub>2</sub>, сажа тощо.





1 – газотурбінний газоперекачувальний агрегат; 2 – випускний тракт агрегату; 3 – паровий котел-утилізатор; 4 – парова засувка з електроприводом; 5 – димова труба; 6 – димосос; 7 – вуглекислотна установка; 8 – шибер; 9 – димохід; 10 – котельня; 11 – газова або повітряна засувка з електроприводом; 12 – вентилятор; 13 – блок управління; 14 – електричні комунікації; 15 – газоаналізатор; 16 – відвід димових газів; 17 – паропровід; 18 – парова турбіна з електрогенератором; 19 – конденсатор; 20 – конденсатний насос; 21 – трубопровід води або конденсату; 22 – блок водопідготовки.

**Рисунок 8 — Принципова технологічна схема одержання вуглекислоти з використанням вторинних ресурсів КС газопроводів**

У 2005 році викиди забруднюючих речовин в атмосферу підприємствами ДК „Укртрансгаз” склали близько 142 тис. т., головним чином це природний газ – 59%, оксиди азоту – 24%, оксид вуглецю – 16% та ін.

Підприємствами у 2005 р. використано  $2 \cdot 10^6$  кубометрів води і відведено стічних вод в природні об’єкти близько 516 тис. куб. м, в тому числі без очищення – 292 тис. куб. м.

Серед усіх парникових газів за своїми масштабами головну небезпеку становить метан та діоксид вуглецю  $\text{CO}_2$ , основним джерелом якого є продукти згоряння органічних палив.

Зниження викидів у атмосферу метану в основному залежить від факторів технологічного плану та ступеня аварійності газопроводів, що експлуатуються, та газоперекачувальних агрегатів на КС, а також можливе за рахунок оптимізації роботи газотранспортної системи.

Зниження викидів діоксиду вуглецю при експлуатації КС можливе опосередковано за рахунок всебічного застосування заходів енергозбереження та підвищення ефективності використання хімічної енергії паливного газу.

При використанні на КС опалювальних котелень можливе практично повне (на основі застосування технологій декарбонізації димових газів) вилучення  $\text{CO}_2$  з одночасною фіксацією технічної вуглекислоти, яка є цінним продуктом побутових та технічних потреб. Висока екологічна ефективність технологій декарбонізації димових газів та комерційна цінність отриманого кінцевого продукту робить таку технологію самоокупною і перспективною при

застосуванні на об’єктах великої та малої енергетики і в газотранспортній системі України.

Понад півстоліття існує технологія одержання  $\text{CO}_2$  з продуктів згоряння вуглеводневих палив (в основному природного газу) з повітрям зі вмістом вуглекислого газу близько 9,5% через поглинання його розчином моноетанол-аміна (MEA).

Фахівцями ВАТ «Укргазпроект» проведено дослідження можливості виробництва рідкої вуглекислоти у компактній блочно-комплектній вуглекислотній установці фірми «UNION INGEERING» (Данія) використовуючи для одержання вуглекислоти побічний продукт – димові гази газової опалювальної котельні компресорної станції. За результатами цих досліджень розроблено технічну пропозицію щодо організації виробництва рідкої вуглекислоти з димових газів газових опалювальних котелень на компресорних станціях магістральних газопроводів з використанням їх вторинних теплових і матеріальних ресурсів [7].

З екологічної точки зору технічна пропозиція спрямована на зниження викидів вуглекислого газу.

Фахівцями ВАТ «Укргазпроект» пропонується створити на КС з електроприводними і газотурбінними агрегатами, які використовують для власних потреб теплопостачання опалювальні котельні, вуглекислотну установку з використанням обладнання фірми «UNION INGEERING», що представлена (рис. 8).

До складу установки входять: власне вуглекислотна установка 7, котельня 10 (основна

або резервна), димохід роздвоєний 9 з вбудованим шибером 8, димосос 6. При відкритому шибері 8 і працюючому димососі 6 димові гази від котельні надходять у вуглекислотну установку 7, де і відбувається технологічний процес одержання рідкої вуглекислоти, а потім через димар 5 викидаються в атмосферу. При відключеній вуглекислотній установці шибер 8 перед вуглекислотною установкою 7 закритий. Димові гази котельні 10 через обхідний байпас і димар 5 викидаються в атмосферу.

Для покриття власних потреб вуглекислотної установки в насиченій водяній парі та електроенергії можливе використання утилізованої в паровому котлі-утилізаторі з теплоти вихлопних газів газотурбінних агрегатів КС з подаванням частини пари безпосередньо до блоків вуглекислотної установки 7, а іншої частини – у парогазову установку 16 для вироблення електроенергії. Таким чином, у результаті збільшиться ефективність використання вторинних енергетичних і матеріальних ресурсів компресорних станцій магістральних газопроводів.

Оцінки свідчать, що при тривалості роботи вуглекислотної установки 8000 годин на рік, річний економічний ефект складе близько 500000 \$ США, а термін окупності капіталовкладень – 2 роки.

Починаючи з кінця 19-го століття, вуглекислий газ широко використовується як вогнегасна речовина (ВР) у системах пожежогасіння (ПГ). Як показує практика, вуглекислий газ є ефективною, надійною, технологічною, доступною і дешевою ВР широкого спектра дії.

В даний час, на відміну від громіздких, енергомістких вуглекислотних заводів, фірмою «UNION ENGINEERING» (Данія) випускаються компактні блочно-комплектні установки з виробництва рідкої переохолодженої вуглекислоти ( $P=1,8$  МПа,  $t=$  мінус  $28^{\circ}\text{C}$ ) продуктивністю 40, 80, 145, 285, 500 і 1000 кг/год з димових газів котельні вуглекислотної установки, що працюють по циклу середнього тиску.

При виробництві вуглекислоти на КС надлишок її може продаватися зовнішнім споживачам: для систем пожежогасіння, заправлення вогнегасників, заводам з виробництва безалкогольних і слабоалкогольних напоїв, заводам з розливу мінеральних вод, заводам зі зварювання в середовищі вуглекислого газу, підприємствам парфумерної та медичної промисловості, сільського господарства тощо.

CO<sub>2</sub> широко застосовується при створенні ефективних систем пожежогасіння на об'єктах різного призначення.

На сьогодні почалося промислове освоєння на КС газопроводів України та Росії систем газового пожежогасіння із застосуванням CO<sub>2</sub>. Рідку вуглекислоту привозять (і надалі мають намір привозити) на КС з вуглекислотних заводів. Це вимагає фінансових витрат і не завжди можливо (віддаленість КС від вуглекислотних заводів, важкодоступні райони розміщення КС). Більш економічно вигідним і зручним є варіант організації виробництва рідкої вуглекислоти безпосередньо на КС.

Широкі перспективи має вуглекислота і у паливно-енергетичному комплексі. Це:

- нагнітання CO<sub>2</sub> у нафтові пласти з метою радикального підвищення нафтовіддачі;
- застосування CO<sub>2</sub> як буферної подушки при видобутку газу з вироблених родовищ і при експлуатації підземних сховищ газу;
- профілактика вугільних шахт від вибухів метану за рахунок його періодичного (раз у декілька років) витиснення за допомогою CO<sub>2</sub> і використання метану як палива;
- спалювання твердих палив з рідким шлаковидаленням і поділом шлаків на цінні феросплави і високоякісні гідрофобні силікати;
- вуглекислотно-киснева газифікація вугілля з метою одержання газів з високою тепловою згоряння;
- флотаційне збагачення низькосортного вугілля у рідкій вуглекислоті.

Як показують проектні розробки і техніко-економічні розрахунки, серед зазначених вище можливостей одним з найбільш ефективних напрямків є автономне енергопостачання нафтогазових родовищ з накачуванням CO<sub>2</sub> у нафтові пласти з метою підвищення нафтовіддачі.

Багаторічний досвід експлуатації нафтових родовищ США свідчить, що за рахунок нагнітання CO<sub>2</sub> у нафтові пласти забезпечується підвищення нафтовіддачі до 86-94%, у той час як середнє значення цього показника в країнах СНД (наприклад, Росії) не перевищує 30%.

Негативний вплив на навколишнє середовище при роботі ГПА на КС здійснює і так зване шумове забруднення. Необхідність зменшення шумового забруднення особливо зростає при експлуатації нового покоління газотурбінних ГПА внаслідок зростання швидкості газів у проточній частині турбомашин, різкої зміни швидкостей, зростання тиску і температури по газовому тракту приводного двигуна разом зі зменшенням його металоємності (особливо авіаційних і суднових приводів). Все це призводить до збільшення амплітуди коливань деталей, вузлів і, як наслідок, до збільшення інтенсивності шуму, що погіршує умови роботи обслуговуючого персоналу та, у ряді випадків, навіть унеможливує оптимальний вибір промислового майданчика КС.

У цій ситуації перед проектувальниками компресорних станцій стоять серйозні завдання щодо зниження рівня шуму станцій і захисту обслуговуючого персоналу та прилеглих населених пунктів. Інститутами «Укргазпроект» і «ВНИИГАЗ» (м. Видне Московської обл.) науково обгрунтовано, розроблено і впроваджено комплекс заходів, який забезпечує зниження рівня шуму КС та інтенсивності його поширення на місцевості.

Цей комплекс заходів включає:

- виявлення визначальних джерел шуму на КС на основі застосування уточненої методики визначення звукової потужності агрегатів і виявлення напрямків поширення шуму від агрегатів;
- виконання акустичних розрахунків КС та їх аналіз;

– розробку рекомендацій щодо захисту від шуму населених пунктів у районі КС та визначення необхідних розмірів санітарно-захисної зони.

Інтенсивним джерелом шуму на КС є вихлопні шахи газоперекачувальних агрегатів, де для зниження рівня шуму застосовують одно- або двоступінчасті глушники, які мають низьку акустичну ефективність (близько 5 дБ) і експлуатаційну надійність. Під динамічним впливом швидкісного потоку гарячих (понад 350°C) вихлопних газів ГПА відбувається руйнування поверхонь перфорованих пластин та суттєве зменшення ефекту шумоглушіння.

Також зменшення рівня шуму можна досягти встановленням у вихлопних шахтах ГПА шумоглушників-утилізаторів (ШУТ), які забезпечують зниження шуму вихлопу агрегатів з одночасною утилізацією теплоти їх вихлопних газів для підігріву води, повітря та інших теплоносіїв у системах теплопостачання КС. Такі шумоглушники-утилізатори для ГТУ запропоновані інститутом «Укргазпроект» на рівні винаходу. В подальшому розроблено їх конструктивні рішення спільно з інститутами «ВНИИГАЗ» і технічної теплофізики НАН України. Зауважимо, що боротьба та захист від шуму КС повинні вирішуватись спільними зусиллями науководослідних, проектних інститутів, заводів-виробників ГПА з урахуванням фактора шуму в процесі створення нових газоперекачувальних агрегатів, розробки акустично-ефективних глушників шуму на всосі та вихлопі ГПА [12].

## ВИСНОВКИ

Невеликий ККД агрегатів, невикористання енергозберігаючих технологій, застосування ресурсовитратних технологій тощо породжує значні об'єми вторинних енергоресурсів на КС магістральних газопроводів, які використовуються досить слабо і здебільшого викидаються в атмосферу, забруднюючи навколишнє середовище. В цьому містяться великі резерви енергоресурсозбереження, які можуть бути реалізовані через:

– використання вторинних енергоресурсів – пальних і теплових та надлишкового тиску газу з використанням сучасних технологій і обладнання;

– модернізацію і заміну застарілих ГПА на сучасні агрегати з ККД 34-35%, а також модернізацію камер згоряння ГПА шляхом заміни традиційних вихрових реєстрових пальників на прямоочні трубчасті для підвищення ефективності використання паливного газу на КС.

До теперішнього часу в Україні, в основному, вже розроблена достатня кількість екологічних енерго-ресурсозберігаючих технологій і обладнання для КС магістральних газопроводів. Вони дають змогу вже зараз значно збільшити ефективність використання природного газу на компресорних станціях і в перспективі перетворити їх у відносно екологічно чисті енерготехнологічні комплекси комбінованого виробництва різних видів енергії (механічної,

електротехнічної, теплової) і води (при впровадженні парогазових установок типу „Водолій”). Для проведення і впровадження цих робіт необхідні значні інвестиції, а також підтримка на законодавчому рівні.

## Література

1 Модернизация газоперекачивающих агрегатов на основе судовых конвертированных газотурбинных двигателей // Проспект НПО «Машпроект», ПО «Заря» / Ротапринт НПО «Машпроект». – Николаев. – 12 с.

2 Богуслаев В. ОАО «Мотор Сич» на рынке газотурбинных технологий. Отрасль и сопутствующие рынки: структура, тенденции, анализ// Нефть и газ. – 2002. – № 8. – С. 28-29.

3 Романов В.І., Коломєєв В.М., Дикий М.О. Підвищення ефективності функціонування утилізаційного контуру КППТУ „Водолій” // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – №6. – С.43-46.

4 Дикий М.О., Бондин Ю.М., Говдяк Р.М., Чабанович Л.Б., Шелковський Б.І. Підвищення ефективності, надійності та екологічної безпеки газотранспортної системи України // Эко-технологии и ресурсосбережение: Сб. тр. 8-й международной конференции „Энергетична безпека Європи XXI століття”. – 2005. – С.75-77.

5 Шелковский Б.И. Патыченко А.С., Захаров В.П. Утилизация использование вторичных энергоресурсов компрессорных станций. –М.: Недра, 1991. – 160 с.

6 Говдяк Р.М., Чабанович Л.Б., Семчук Я.М., Шелковський Б.І., Кривенко Г.М. Енерго-екологічна безпека нафтогазових об'єктів. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2007.

7 Степанец А.А. Энергосберегающие турбодетандерные установки. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр».

8 Турбо- и компрессоростроение / Под ред. В.А.Алексеева. – Л.: Машиностроение, 1970. – 507 с.

9 Деякі попередні результати виробничих випробувань модернізованої камери згоряння ГПА ГТК-10 на основі трубчастих пальників / Говдяк Р.М., Чабанович Л.Б., Шелковський Б.І., Любчик Г.М. та ін. // Інформаційний огляд ДК „Укртрансгаз”. – 2006. – №4 (40).

10 Поршаков Б.П., Калинин А.Ф., Купцов С.М. и др. Энергосберегающие технологии при магистральном транспорте природного газа. – М.: МПА-ПРЕСС, 2006. – 311 с.

11 Говдяк Р.М. Производство жидкой углекислоты на объектах газовой промышленности // Эко-технологии и ресурсосбережение. – 2005. – №3. – С.41-47.

12 Говдяк Р.М. Исследование и разработка мероприятий и оборудования для снижения уровня шума компрессорных станций // Эко-технологии и ресурсосбережения. – 2003. – №1. – С.50-57.