

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.594; 575,3; 536,7; 482

Автономні комплекси з гібридними тригенераційними установками

Б. В. Косой^{1✉}, Б. Г. Грудка², С. В. Гайдук³, В. В. Чубенко⁴¹⁻⁴Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна 112, м. Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: ¹bkosoy@yahoo.comORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0001-5353-8881>; ²<https://orcid.org/0000-0003-1200-5442>;³<https://orcid.org/0000-0003-1627-2986>

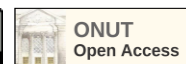
На сьогоднішній день тригенерація – це одна з кращих технологій, що дозволяє досягати значних показників економії енергоресурсів, збільшуючи термічну ефективність енергокомплексу до 80% і більше, мінімізуючи викиди парникових газів, а також інших забруднень в атмосферу. Тригенерація найбільш затребувана у сферах, де необхідно використовувати охолодження в технологічних процесах. Насамперед це харчова промисловість. Холод, який генерує тригенераційна установка, спрямовується на охолодження сировини чи готового продукту. Також застосування тригенерації ефективно на підприємствах, де передбачається цілорічно використовувати холодильні потужності. Тригенераційна установка як більш вигідна та ефективна альтернатива класичним джерелам тепло-, холодо- та енергопостачання застосовується також у металургії, хімічній, нафтовій промисловості та інших галузях. Тригенерація – досить самостійний напрямок розвитку малої енергетики. Вона відрізняється індивідуалізмом, оскільки орієнтується задоволення потреб конкретного об'єкта в енергоресурсах. У статті розглядається застосування систем тригенерації при виробництві низькотемпературних натуральних речовин. Діоксид вуглецю є ліквідним продуктом, який одержують із димових газів, що утворюються після спалювання природного газу. Аналіз показує, що вигідніше спочатку в когенераційній установці, що працює на природному газі, виробити електроенергію та теплоту. Під час створення таких систем виникають проблеми: продукти згоряння після когенераційної установки містять 8-10% кисню; потенціал одержуваної теплоти виявляється низьким. Запропоновано декілька варіантів усунення зазначених недоліків. Це дозволило створити автономно та ефективно діючі багатоцільові енерготехнологічні комплекси, що використовують лише природний газ, з метою вироблення електроенергії, теплоти, рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю та чистого газоподібного азоту. У цих комплексах реалізується високий енергетичний потенціал палива.

Ключові слова: Тригенерація; Автономний багатоцільовий комплекс; Природний газ; Електрична енергія; Теплота; Діоксид вуглецю; Азот

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i3.3002>

© The Author(s) 2024. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

Зростання викидів діоксиду вуглецю посилює прояв парникового ефекту, що сприяє глобальному потеплінню. Основний внесок у ці процеси пов'язаний з різними димовими газами [1].

У зв'язку з цим актуальною проблемою є розробка процесів, установок та енерготехнологій для економічного вилучення діоксиду вуглецю з димових газів з метою його подальшої утилізації, що було б екологічно сприятливішим для навколишнього середовища.

Разом з тим, незважаючи на значні викиди діоксиду вуглецю, обсяги його вилучення для подальшого застосування в народному господарстві є недостатніми. Традиційно багато діоксиду вуглецю потрібно для реалізації ефективних технологій у харчовій, хімічній промисловості, машинобудуванні, енергетиці та інших галузях. Великі кількості CO_2 використовуються при паровуглекислотній конверсії метану, продукти якого дозволяють отримувати різні ефіри, метанол та інші спирти.

Діоксид вуглецю виробляють, переважно, з димових газів, що утворюються після спалювання різних видів палива. В установках з виробництва діоксиду вуглецю у вигляді вихідного палива, що випускаються в Україні і за кордоном, переважно використовують природний газ, при спалюванні якого отримують димові гази і теплоту [2-5].

Аналіз показує, що раціональніше з димових газів вилучати як діоксид вуглецю, так і азот [6-11]. У відносно дешевому діоксиді вуглецю, особливо коли його виробництво супроводжується отриманням ще й азоту, зацікавлені підприємства, які займаються видобутком та переробкою нафти, газу та газових конденсатів. Застосування цих газів (CO_2 , N_2) дає можливість інтенсифікувати видобуток та переробку зазначених вуглеводнів [12-16].

Діоксид вуглецю та азот, якщо їх одержання буде пов'язане з відносно низькими витратами енергії, можуть бути основними компонентами вітчизняних великотоннажних виробництв сечовини – найефективнішого мінерального добрива. Його подальше використання дозволяє не лише підвищувати врожайність сільгоспкультур, а й сприяє включенню вуглецю до його глобального природного циклу [17, 18].

Розробкам систем багатоцільової переробки димових газів, одержуваних після спалювання природного газу, на жаль, поки що не приділяється належної уваги. Все це робить актуальним розробку процесів та схем таких економічних енерготехнологічних комплексів з виробництва з димових газів як діоксиду вуглецю, а й азоту. Особливий інтерес представляє пошук схемних рішень для створення автономно та ефективно діючих багатоцільових енерготехнологічних комплексів, що використовують лише природний газ, з метою вироблення електроенергії, теплоти, рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю та чистого газоподібного азоту.

Основна ідея виконаних досліджень полягає у наступному. Так як природний газ є високоенергетичним паливом, то доцільніше його використовувати спочатку для виробництва електроенергії та теплоти, а потім виділити з димових газів газоподібний азот та газоподібну вуглекислоту для подальшого її зрідження. Таке ефективне використання внутрішньої енергії газу можна здійснити в газопоршневих когенераційних установках [19]. Однак пряме включення когенераційної установки в схему тригенерації не дасть результату, тому що існує ряд проблем, викликаних застосуванням когенераційної установки, які негативно проявляють себе при виробництві діоксиду вуглецю. Так, після згоряння природного газу в когенераційній установці у вихлопних газах вміст кисню може досягати 8-10% (максимально). Присутність кисню у цих газах істотно погіршує роботу гібридної установки, оскільки відбувається полімеризація розчину абсорбенту (моноетаноламіну) та забиття ним основних апаратів. Також виникають складнощі з отриманням чистого газоподібного азоту. Крім цього, температурний потенціал виробленої теплоти в когенераційній установці (у вигляді гарячої води з температурою до 70-80 °C) низький. Для процесу десорбції CO_2 з розчину абсорбенту потрібен тепловий потік (водяна пара або димові гази) з температурою не нижче 130...140 °C, що потребує використання теплонасосних установок [20, 21].

Проведені дослідження дозволяють запропонувати три схемні рішення для створення таких енерготехнологічних комплексів з гібридними тригенераційними установками, які позбавлені зазначених недоліків.

2. Показники енергоефективності автономних комплексів

У всіх розроблених схемах багатоцільових автономних енерготехнологічних комплексів використовується тільки природний газ. Комплекси виробляють електроенергію для забезпечення нею всього власного обладнання та низки зовнішніх споживачів, а також чисті, у тому числі без токсичних домішок, рідкий низькотемпературний діоксид вуглецю та газоподібний азот.

Зобразимо схематично кожен комплекс і коротко опишемо його структуру та характеристики. Для простоти позначення конкретного автономного комплексу введемо скорочену назву з нумерацією.

Перейдемо до розгляду комплексу № 1, зображеного на рис. 1.

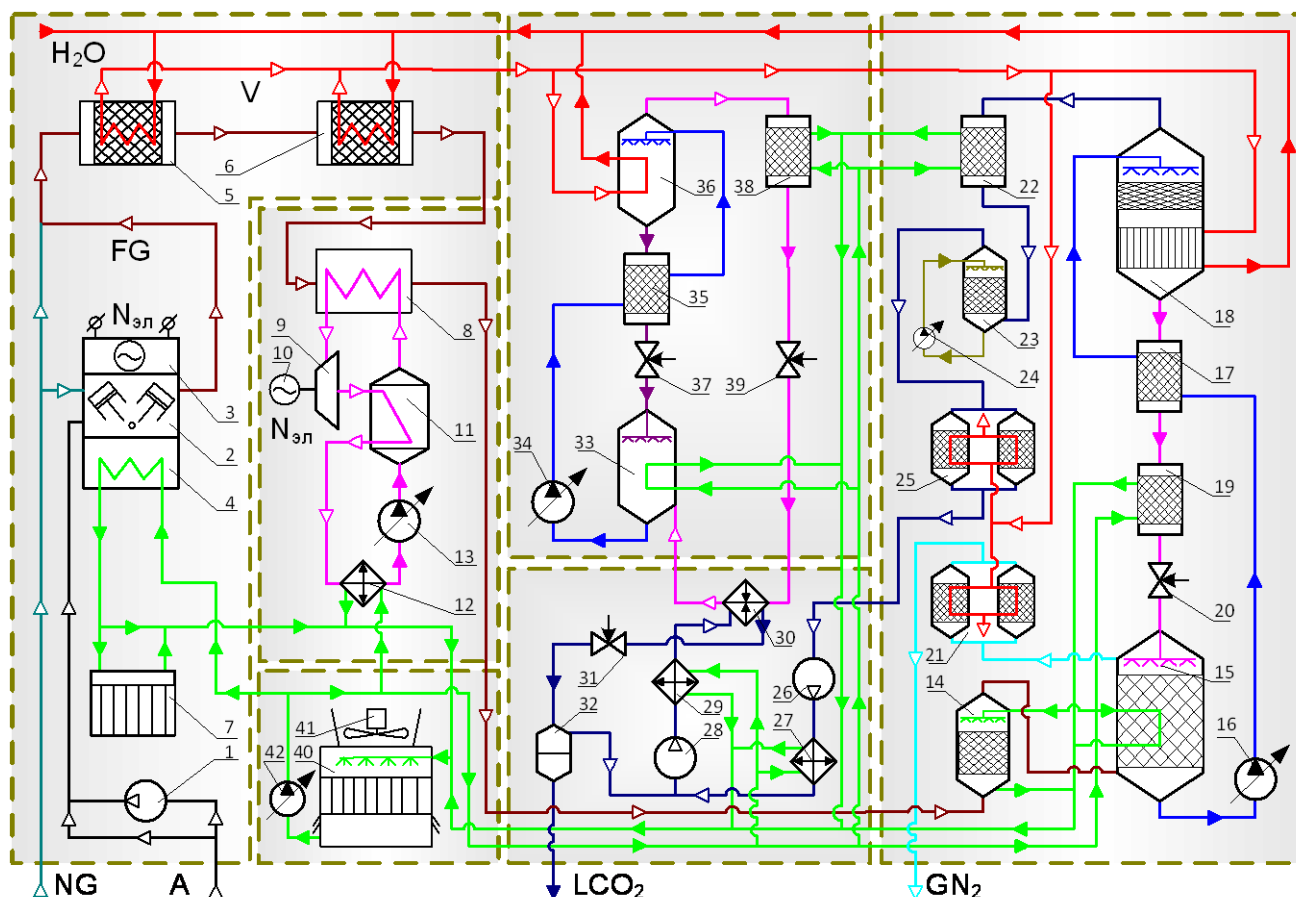


Рисунок 1 – Технологічна схема комплексу № 1 (КУ + ПТУ + УС): КУ (позиції 1...7) – когенераційна установка; ПТУ (позиції 8 ... 13) – паротурбінна установка; УС (позиції 14 ... 39) – вуглекислотна установка; А – повітря; FG – димовий газ; GN₂ – газоподібний азот; H₂O – вода; LCO₂ – рідкий низькотемпературний діоксид вуглецю; NG – природний газ; V – водяна пара; 1, 26, 28 – компресори; 2 – газовий двигун внутрішнього згоряння; 3, 10 – електрогенератори; 4 – система охолодження; 5 – блок каталітичної конверсії метану; 6 – блок каталітичного очищення; 7 – радіатор; 8 – утилізатор теплоти димових газів; 9 – парова турбіна; 11, 17, 35 – теплообмінники; 12, 38 – конденсатори; 13, 16, 24, 34, 42 – насоси; 14 – скруббер; 15, 33 – абсорбери; 18, 36 – десорбери; 19, 22, 27, 29 – холодильники; 20, 31, 37, 39 – дросельні вентилялі; 21 – блок осушення; 23 – очисна колонка; 25 – блок очищення та осушення; 30 – конденсатор-випарник; 32 – збірник рідини; 40 – градирня; 41 – вентилятор

Комплекс № 1 складається з чотирьох установок, які пов'язані один з одним матеріальними та технологічними потоками. Коротко викладемо їх особливості.

1. Когенераційна установка (позиції 1 ... 7, рис. 1) виробляє електричну енергію за допомогою газового двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) 2, що працює на природному газі, з електрогенератором 3. До складу даної установки входять апарати парокисневої конверсії природного газу 5 і каталітичного очищення димового газу 6. Наявність таких апаратів обумовлена тим, що після газового ДВЗ у димовому газі міститься приб-

лизно 8 % O_2 , а також токсичні домішки CO та NO_x . В апарат 5 надходить природний газ, який, беручи участь у процесі парокисневої каталітичної конверсії (у димовому газі є пари води з температурою 500 °C і 8 % кисню), утворює водень (H_2) та оксид вуглецю (CO), а кисень димового газу в реакції з H_2 та CO – пари води та CO_2 . У наступному апараті 6 проводиться каталітичне очищення димового газу від CO і NO_x . Тепло, що виробляється одночасно з цим в апаратах 5 і 6, використовується для отримання водяної пари з температурою не менше 135 °C.

2. Двоконтурна паротурбінна установка (пози-

ції 8...13, рис. 1) з низькотемпературним робочим тілом перетворює відведену від утилізатора 8 теплоту в електроенергію [22], вироблену турбіною 9, з якою пов'язаний електрогенератор 10.

3. Абсорбційно-десорбційна установка (позиції 14...25, рис. 1) використовується для поділу охолоджених і очищених від водяної пари в скрубєрі 14 димових газів на CO_2 і N_2 з подальшим їх очищенням і осушенням [2-11, 23].

4. Холодильна вуглекислотна установка (позиції 26 ... 39, рис. 1) каскадного типу виробляє рідкий низькотемпературний CO_2 . У верхньому кас-

каді використовується абсорбційна аміачна холодильна машина (позиції 30, 33...39, рис.1), що споживає теплоту конденсації водяної пари для вироблення холоду, необхідного для конденсації CO_2 , а в нижньому каскаді – вуглекислотна установка (позиції 26...3). 1) з двоступеневим компресором середнього тиску [5, 7, 8].

До складу комплексу входить система зворотного водопостачання (позиції 40...42, рис. 1) з відведенням теплоти відносно низького потенціалу до навколишнього середовища. У табл. 1. наведено основні показники роботи даного комплексу.

Таблиця 1 – Основні показники автономного енерготехнологічного комплексу №1

Найменування	Од. вим.	Виробництво	Споживання
Природний газ	нм ³ /год		280
Електрична потужність	кВт	700	100
Теплова енергія	кВт·год	2482	1972
Рідкий низькотемпературний діоксид вуглецю	кг/год	540	
Газоподібний азот	нм ³ /год	2100	

З табл. 1 видно, що при споживанні 280 м³/год природного газу комплекс виробляє: 450 кВт електроенергії, з якої 110 кВт використовують для роботи власного обладнання комплексу, а 340 кВт можуть споживатися зовнішніми джерелами; 2332 кВт·год теплової енергії, з якої 1972 кВт·год застосовується для організації внутрішніх процесів, що використовують тепло, і 360 кВт – для технологічних потреб підприємства; 540 кг/год рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю та 2600 м³/год чистого газоподібного азоту.

Принципова технологічна схема автономного комплексу № 2 зображено на рис. 2. У ньому застосовується парогенеруюча установка замість двоконтурної паротурбінної, як це впливає з рис. 1. Абсорбційно-десорбційна і холодильна вуглекислотна установки, що використовуються в цих двох комплексах, ідентичні.

Структурно комплекс № 2 складається з наступних установок:

1. Когенераційна установка (позиції 1...6, рис. 2). Виробляє електричну енергію за допомогою газового двигуна внутрішнього згоряння 2, що працює на природному газі, з генератором 3 і утилізаторами теплоти 4 і 5.

2. Парова котельна установка (позиції 7, 8, рис. 2). У паровому котлі 7 виробляється додаткова кількість пари при горінні частини природного газу за рахунок кисню (~8 %), що міститься в

димових газах після газового двигуна внутрішнього згоряння 2. У схемі є також утилізатор теплоти 8.

3. Абсорбційно-десорбційна установка (позиції 9...20, рис. 2). Поділяє димові газу на газоподібні CO_2 і N_2 з їх подальшим очищенням та осушенням.

4. Холодильна вуглекислотна установка (позиції 21 ... 35, рис. 2) каскадного типу. Виробляє рідкий низькотемпературний CO_2 . а в нижньому каскаді – вуглекислотна установка (позиції 21...27, рис. 2) з двоступеневим компресором середнього тиску.

Комплекс оснащений системою зворотного водопостачання (позиції 35 ... 37, рис. 2) з відведенням низькопотенційної теплоти в навколишнє середовище.

Показники роботи комплексу № 2 зведено у табл. 2. З табл. 2 видно, що при споживанні 250 м³/год природного газу комплекс виробляє: 400 кВт електроенергії, з якої 100 кВт використовуються для роботи власне обладнання комплексу, а 300 кВт можуть споживати зовнішні джерела; 2615 кВт·год теплової енергії, з якої 1652 кВт·год застосовується для організації внутрішніх тепловикористовуючих процесів, а 960 кВт·год – для технологічних потреб підприємства; 540 кг/год рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю та 2600 м³/год чистого газоподібного азоту.

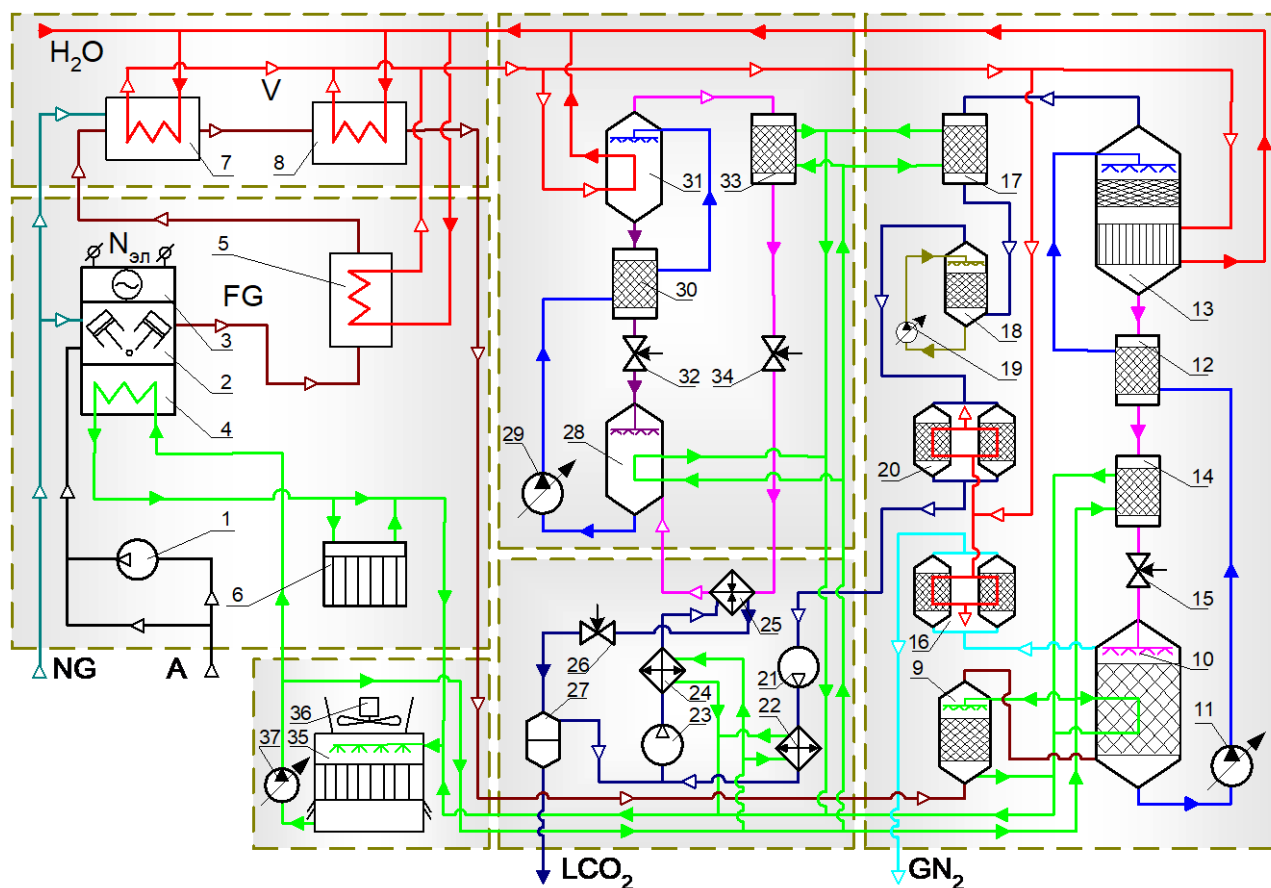


Рисунок 2 – Технологічна схема комплексу № 2 (КУ + ПКУ + УС): КУ (позиції 1...6) – когенераційна установка; ПКУ (позиції 7,8) – парова котельна установка; УС (позиції 9 ... 35) – вуглекислотна установка; А – повітря; FG – димовий газ; GN₂ – газоподібний азот; H₂O – вода; LCO₂ – рідкий низькотемпературний діоксид вуглецю; NG – природний газ; V – водяна пара; 1, 21, 23 – компресори; 2 – газовий двигун внутрішнього згоряння; 3 – електрогенератор; 4 – система охолодження; 5, 8 – утилізатори теплоти димових газів; 6 – радіатор; 7 – паровий котел; 9 – скруббер; 10, 28 – абсорбери; 11, 19, 29, 37 – насоси; 12, 30 – теплообмінники; 13, 31 – десорбери; 14, 22, 24 – холодильники; 15, 26, 32, 34 – дросельні вентиляти; 16 – блок очищення та осушення; 17, 33 – конденсатори; 18 – очисна колонка; 20 – блок осушення; 25 – конденсатор-випарник; 27 – збірник рідини; 35 – градирня; 36 – вентилятор

Таблиця 2 – Основні показники автономного енерготехнологічного комплексу №2

Найменування	Од. вим.	Виробництво	Споживання
Природний газ	нм ³ /год		280
Електрична потужність	кВт	650	100
Теплова енергія	кВт·год	2765	1655
Рідкий низькотемпературний діоксид вуглецю	кг/год	540	
Газоподібний азот	нм ³ /год	2100	

Технологічна схема автономного комплексу №3 зображено на рис. 3

Відмінною особливістю комплексу є використання теплового насоса замість паротурбінної установки (див. рис. 1) або парогенеруючої установки (див. рис. 2) що характерно для розглянутих раніше комплексів № 1, 2. До складу автономного комплексу № 3 входять:

1. Когенераційна установка (позиції 1...6, рис. 3), що виробляє електричну енергію за допомогою газового двигуна внутрішнього згоряння 2, що працює на природному газі, з електрогенератором 3, утилізаторами теплоти 4, 5 і радіатором 6.

2. Тепловий насос (позиції 7 ... 14, рис. 3) для виробництва пари, за рахунок використання теплоти гарячої води, виробленої в когенераційній

установці, і теплої води, що йде на охолодження в градирню 41.

3. Абсорбційно-десорбційна установка (позиції 15...26, рис. 3) для поділу димового газу на газоподібні CO_2 і N_2 з їх подальшим очищенням і осушенням.

4. Холодильна вуглекислотна установка (позиції 27...40, рис. 3) каскадного типу для виробництва рідкого низькотемпературного CO_2 , у верхньому каскаді якої використовується абсорбційна

аміачна холодильна машина (ААХМ, позиції 31, 34...40, рис. 3), що споживає тепло її роботи, а в нижньому каскаді – вуглекислотна установка (позиції 27 ... 33, рис. 3) з двоступеневим компресором середнього тиску.

Система зворотного водопостачання (позиції 41 ... 43, рис. 3) відводить низькопотенційну теплоту в навколишнє середовище. Технічні показники комплексу, зображеного на рис. 3, вказані у табл. 3.

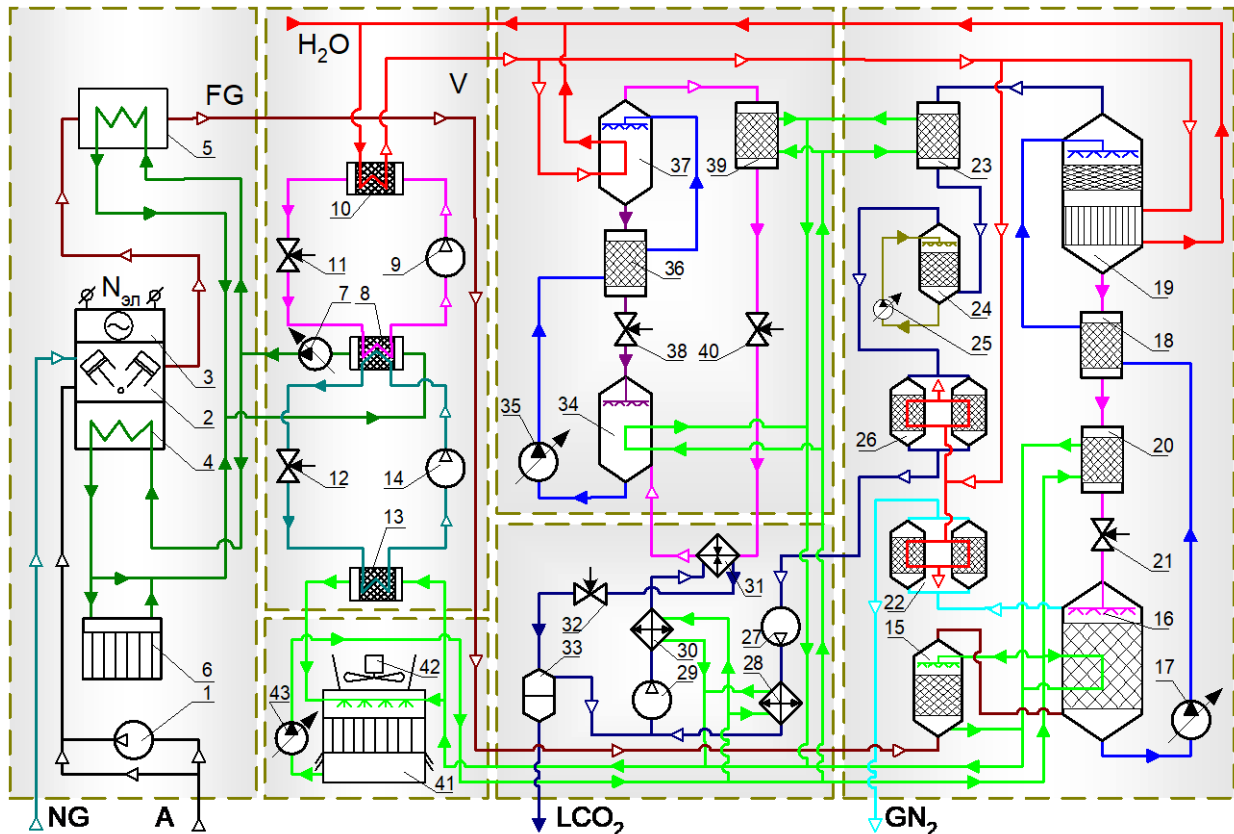


Рисунок 3 – Технологічна схема комплексу №3 (КУ + ТН + УС): КУ (позиції 1...6) – когенераційна установка; ТН (позиції 7...14) – тепловий насос; УС (позиції 15 ... 40) – вуглекислотна установка; А – повітря; FG – димовий газ; GN_2 – газоподібний азот; H_2O – вода; LCO_2 – рідкий низькотемпературний діоксид вуглецю; NG – природний газ; V – водяна пара; 1, 9, 14, 27, 29 – компресори; 2 – газовий двигун внутрішнього згоряння; 3, –електрогенератор; 4 – система охолодження; 5 – утилізатор теплоти димових газів; 6 – радіатор; 7, 17, 25, 35, 43 – насоси; 8, 10, 31 – конденсатори-випарники; 11, 12, 21, 32, 38, 40 – дросельні вентиляції; 13, 39 – конденсатори; 15 – скрубер; 16, 34 – абсорбери; 18, 36 – теплообмінники; 19, 37 – десорбери; 20, 23, 28, 30 – холодильники; 22 – блок очищення та осушення; 24 – очисна колонка; 26 – блок осушення; 33 – збірник рідини; 41 – градирня; 43 – вентилятор

Таблиця 3 – Основні показники автономного енерготехнологічного комплексу №3

Найменування	Од. вим.	Виробництво	Споживання
Природний газ	нм ³ /год		280
Електрична потужність	кВт	1070	570
Теплова енергія	кВт·год	1655	1655
Рідкий низькотемпературний діоксид вуглецю	кг/год	540	
Газоподібний азот	нм ³ /год	2100	

При споживанні 250 м³/год природного газу комплекс виробляє: 1032 кВт електроенергії, з якої 632 кВт використовуються для власне обладнання комплексу і 400 кВт можуть споживатися зовнішніми джерелами; кг/год рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю та 2600 м³/год чистого

газоподібного азоту.

При врахуванні приблизної оцінної вартості виробництва таких комплексів термін їхньої окупності становитиме від 11 до 13 місяців (див. табл. 4), що є переконливим показником їхньої високої рентабельності.

Таблиця 4 – Терміни окупності

Найменування	Комплекс №1	Комплекс №2	Комплекс №3
Вартість обладнання, млн. USD	1,45	1,20	1,40
Річний дохід, млн. USD	1,35	1,30	1,45
Термін окупності, міс.	13	11	12

3. Висновки

Створення енергоефективних автономних багатоцільових енерготехнологічних комплексів, що використовують лише природний газ з метою вироблення електроенергії, теплоти, рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю та чистого газоподібного азоту – перспективний напрямок в енергетиці та промисловості. Такі комплекси дозволяють: повністю використати значний енергетичний потенціал палива; забезпечити високий рівень утилізації виробленої теплоти; виготовити додатковий продукт – чистий газоподібний азот; забезпечити підприємство своєю електроенергією, теплою; розвинути інфраструктуру підприємства; знайти широке застосування у різних галузях промисловості. Вибір необхідного комплексу проводиться на основі ретельного техніко-економічного обґрунтування з урахуванням потреб підприємства. Більш детальний розгляд кожного виду запропонованого комплексу буде викладено нами у наступних публікаціях.

Особистий внесок авторів CRediT

Косой Б.В.: концептуалізація ідеї, формальний аналіз, написання – огляд та редагування, адміністрування. **Грудка Б.Г.:** методологія, дослідження, формальний аналіз, написання – оригінальний проект. **Гайдук С.В.:** постановка задачі, верифікація, аналіз та узагальнення даних, написання – огляд та редагування. **Чубенко В.В.:** перевірка, програмне моделювання, обробка даних, інформаційний пошук.

Acknowledgment

This project has received funding through the EURIZON project, which is funded by the European Union under grant agreement No.871072.

Література

1. United Nations on Climate Change. Global Warming General Convention. Kyoto, 1997. – 8 p.
2. N. Li, H. Zhang, X. Ren, J. Wang, J. Yu, C. Jiang, H. Zhang, Y. Li. Development status of supercritical carbon dioxide thickeners in oil and gas production: A review and prospects // Gas Science and Engineering. – 2024. – Vol. 125. – P. 205312. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2024.205312>.
3. F. Rosner, T. Bhagde, D. S. Slaughter, V. Zorba, J. Stokes-Draut. Techno-economic and carbon dioxide emission assessment of carbon black production // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Vol. 436. – P. 140224. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140224>.
4. D. Lu, F. Qu, C. Zhang, Y. Guo, Z. Luo, L. Xu, W. Li. Innovative approaches, challenges, and future directions for utilizing carbon dioxide in sustainable concrete production // Journal of Building Engineering. – 2024. – Vol. 97. – P. 110904. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110904>.
5. R. Zheng, L. Zhu, X. Zeng, Y. Huang, C. Zhang, Z. Wang. Thermodynamic and economic analysis of methane cycle carbon dioxide reforming thermally coupled with chemical looping combustion for liquid fuel production // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. – 2024. – Vol. 162. – P. 105583. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105583>.
6. Г.К. Лавренченко, В.А. Власюк, О.В. Копитін та ін. Аналіз енергетичних характеристик комплексу установок для виробництва діоксиду вуглецю та азоту з димових газів // Технічні газ. – 2001. – № 1; 2. – С. 38-43.
7. Лавренченко Г.К., Копитін О.В., Швець С.Г. Вдосконалення комплексів для рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю з димових газів. 1. Зниження енергоспоживання у циклах високого тиску // Технічні газ. – 2004. – № 1. – С. 38-47.
8. Лавренченко Г.К., Копитін А.В., Швець С.Г.

Вдосконалення комплексів для рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю з димових газів.

2. Зниження енергоспоживання у каскадних установках середнього тиску // Технічні гази. – 2004. – № 1. – С. 48-52.

9. **M. Nouri, M. Kavgic, K. Hinzer, A. B. Owolab.** Exergy and exergoeconomic analysis of a hybrid airborne wind and solar energy system for power, liquid nitrogen and carbon dioxide production // *Energy Reports*. – 2024. – Vol. 12. – P. 2123-2143. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.08.006>.

10. **Лавренченко Г.К., Копитін О.В.** Ефективність виробництва газоподібного діоксиду вуглецю та азоту з димових газів з використанням процесів абсорбції-десорбції // *Технічні гази*. – 2004. – № 3. – С. 12 - 22.

11. **M. Prathaban, R. Prathiviraj, R. Mythili, N. Sharmila Devi, M. Sobanaa, J. Selvin, C. Varadharaju.** Integrated bioprocess for carbon dioxide sequestration and methanol production // *Bioresource Technology*. – 2024. – Vol. 404. – P. 130847. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130847>

12. **Z. Sun, S. Liu, Y. Xu, J. Lu, H. Shi, S. Li, C. Luo, Q. Dong.** Urea impregnation into fungus pretreated corn stover to perform pyrolysis for production of nitrogen-containing bio-oil and nitrogen-doped biochar // *Bioresource Technology*. – 2023. – Vol. 376. – P. 128921. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128921>.

13. **Дункан Р.** Методи збільшення нафтовіддачі: практика проектування, закачування та експлуатації свердловин // *Нафтогазові технології* – 1995. – № 2. – С. 1-16.

14. **Дункан Р.** Реалізація методів збільшення нафтовіддачі: практика проектування, закачування та експлуатації свердловин // *Нафтогазові технології*. – 1995. – № 6. – С. 7-16.

15. **F. Gholami, M. Tomas, Z. Gholami, M. Vakili.** Technologies for the nitrogen oxides reduction from

flue gas: A review // *Science of The Total Environment*. – 2020. – Vol. 714. – P. 136712. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136712>

16. **J.M.F. de Almeida-Couto, K.K.B. Abrantes, N. Stevanato, W.R. da Silva, A. Wisniewski Jr., C. da Silva, V.F. Cabral, L. Cardozo-Filho.** Oil recovery from defective coffee beans using pressurized fluid extraction followed by pyrolysis of the residual biomass: Sustainable process with zero waste // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2022. – Vol. 180. – P. 105432. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105432>.

17. Довідник азотчика у двох томах. Том 1. За ред. **Є.Я. Мельникова**. – М.: Хімія, 1967. – 492 с.

18. Довідник азотчика у двох томах. Том 2. За ред. **Є.Я. Мельникова**. – М.: Хімія, 1967. – 444 с.

19. **S. Arhun, A. Bogajevskiy, A. Hnatov, N. Kunicina.** Improving the efficiency of frequency regulation for High-Power diesel generators // *Energy Conversion and Management*: X. – 2024. – Vol. 24. – P. 100785. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100785>.

20. Холодильна техніка. Довідник. За заг. ред. **А.В. Бикова**. – М.: Легка та харчова пром-сть, 1982. – 224 с

21. Теплові та конструктивні розрахунки холодильних машин. За заг. ред. **І.А. Сакуна**. – Л.: Машинобудування, 1987. – 423 с.

22. **G.E. Marin, B.M. Osipov, A.V. Titov, A.R. Akhmetshin.** Gas turbine operating as part of a thermal power plant with hydrogen storages // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48, Is. 86. – P. 33393-33400. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.109>.

23. **M.J. Zonouz, M. Mehrpooya.** Parametric study of a hybrid one column air separation unit (ASU) and CO₂ power cycle based on advanced exergy cost analysis results // *Energy*. – 2017. – Vol. 140, Part 1. – P. 261-275. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.118>.

Отримана в редакції 21.08.2024, прийнята до друку 16.09.2024

Autonomous complexes with hybrid trigeneration units

Boris Kosoy^{1✉}, Bohdan Hrudka², Sergey Gayduk³, Vitalii Chubenko⁴

¹⁻⁴Odesa National University of Technology, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: ¹bkosoy@yahoo.com

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0001-5353-8881>; ²<https://orcid.org/0000-0003-1200-5442>;

³<https://orcid.org/0000-0003-1627-2986>

Nowadays, trigeneration is one of the best technologies that allows achieving significant energy saving indicators, increasing the thermal efficiency of the energy complex to 80% or more, minimizing greenhouse gas emissions, as well as other contaminations into the atmosphere. Trigeneration is the most usa-

ble in areas where it is necessary to use cooling in technological processes. First of all, this is the food industry. The cold generated by a trigeneration unit is used to cool raw materials or finished products. Trigenation is also effective in enterprises where refrigeration capacity is expected to be used year-round. A trigeneration unit, as a more profitable and effective alternative to classic sources of heat, cold and energy supply, is also used in metallurgy, the chemical, oil industries and other industries. Trigenation is a fairly independent direction in the development of small-scale energy. It is characterized by individualism, since it is oriented towards meeting the needs of a specific facility in energy resources. The article considers the use of trigeneration systems in the production of low-temperature natural products. Carbon dioxide is a liquid product obtained from flue gases formed after the combustion of natural gas. The analysis shows that it is more profitable to first produce electricity and heat in a cogeneration plant operating on natural gas. Problems arise when creating such systems: the combustion products after the cogeneration unit contain 8-10% oxygen; the potential of the heat received is low. Several options for eliminating these shortcomings are proposed. This made it possible to create autonomously and effectively operating autonomous multi-purpose complexes that use only natural gas to produce electricity, heat, liquid low-temperature carbon dioxide and pure gaseous nitrogen. These complexes realize the high energy potential of the fuel.

Keywords: Trigenation; Autonomous multi-purpose complex; Natural gas; Electrical energy; Heat; Carbon dioxide; Nitrogen

References

1. (1997) United Nations on Climate Change. Global Warming General Convention. Kyoto, 8
2. **Li, N. et al.** (2024) Development status of supercritical carbon dioxide thickeners in oil and gas production: A review and prospects. *Gas Science and Engineering*, 125, 205312.
3. **Rosner, F. et al.** (2024) Techno-economic and carbon dioxide emission assessment of carbon black production. *Journal of Cleaner Production*, 436, 140224.
4. **Lu, D. et al.** (2024) Innovative approaches, challenges, and future directions for utilizing carbon dioxide in sustainable concrete production. *Journal of Building Engineering*, 97, 110904.
5. **Zheng, R. et al.** (2024) Thermodynamic and economic analysis of methane cycle carbon dioxide reforming thermally coupled with chemical looping combustion for liquid fuel production. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 162, 105583.
6. **Lavrenchenko, G.K. et al.** (2001) Analysis of energy characteristics of a complex of installations for the production of carbon dioxide and nitrogen from flue gases. *Industrial gases*, 1; 2, 38-43.
7. **Lavrenchenko, G.K. et al.** (2004) Improvement of complexes for liquid low-temperature carbon dioxide from flue gases. 1. Reduction of energy consumption in high-pressure cycles. *Industrial gases*, 1, 38-47.
8. **Lavrenchenko, G.K. et al.** (2004) Improvement of complexes for liquid low-temperature carbon dioxide from flue gases. 2. Reducing energy consumption in medium pressure cascade installations *Industrial gases*, 1, 48-52.
9. **Nouri, M. et al.** (2024) Exergy and exergoeconomic analysis of a hybrid airborne wind and solar energy system for power, liquid nitrogen and carbon dioxide production. *Energy Reports*, 12, 2123-2143.
10. **Lavrenchenko, G.K. et al.** (2004) Efficiency of production of gaseous carbon dioxide and nitrogen from flue gases using absorption-desorption processes. *Industrial gases*, 3, 12-22.
11. **Prathaban, M. et al.** (2024) Integrated bioprocess for carbon dioxide sequestration and methanol production. *Bioresource Technology*, 404, 130847.
12. **Sun, Z. et al.** (2023) Urea impregnation into fungus pretreated corn stover to perform pyrolysis for production of nitrogen-containing bio-oil and nitrogen-doped biochar. *Bioresource Technology*, 376, 128921.
13. **Duncan, R.** (1995) Methods of increasing oil recovery: practice of designing, pumping and operating wells. *Oil and gas technologies*, 2, 1-16.
14. **Duncan, R.** (1995) Implementation of methods of increasing oil recovery: practice of designing, pumping and operating wells. *Oil and gas technologies*, 6, 7-16.
15. **Gholami, F. et al.** (2020) Technologies for the nitrogen oxides reduction from flue gas: A review. *Science of The Total Environment*, 714, 136712.
16. **de Almeida-Couto, J.M.F. et al.** (2022) Oil recovery from defective coffee beans using pressurized fluid extraction followed by pyrolysis of the residual biomass: Sustainable process with zero waste. *The Journal of Supercritical Fluids*, 180, 105432.

-
17. (1967) The handbook of nitrogen engineer in two volumes. Volume 1. Edited by **E.Ya. Melnikov**. M.: Chemistry, 492.
18. (1967) The handbook of nitrogen engineer in two volumes. Volume 2. Edited by **E.Ya. Melnikov**. M.: Chemistry, 444.
19. **Arhun, S. et al.** (2024) Improving the efficiency of frequency regulation for High-Power diesel generators. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 100785.
20. (1982) Refrigeration technique. Handbook. Edited by **A.V. Bykov**. M.: Light and food industry, 224.
21. (1987) Thermal and structural calculations of refrigerating machines. Edited by **I.A. Sakun**. L.: Mechanical engineering, 423.
22. **Marin, G.E. et al.** (2023) Gas turbine operating as part of a thermal power plant with hydrogen storages. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 86, 33393-33400.
23. **Zonouz, M.J. et al.** (2017) Parametric study of a hybrid one column air separation unit (ASU) and CO₂ power cycle based on advanced exergy cost analysis results. *Energy*, 140, Part 1, 261-275.
-

Received 21 August 2024

Approved 16 September 2024

Available in Internet 30 September 2024