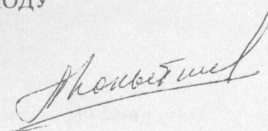


Автореферат Н

КВ5

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ



КОПИТІН ОЛЕКСІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 621.594

**ЕФЕКТИВНІ КОМПЛЕКСИ, ВИКОРИСТОВУЮЧИ ПРИРОДНИЙ ГАЗ,
ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ДІОКСИД ВУГЛЕЦЮ, АЗОТУ ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

Спеціальність

05.05.14 - «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Одеській державній академії холоду МОНМС України.

Науковий керівник: професор кафедри криогенної техніки
Одеської державної академії холоду МОНМС України
Георгій Костянтинович Лавренченко.

Офіційні опоненти: професор кафедри технічної термодинаміки
Одеської державної академії холоду МОНМС України
Олександр Вікторович Дорошенко;

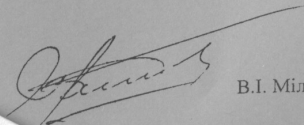
доктор технічних наук, професор, завідувачий кафедрою
теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
Одеського національного політехнічного університету
МОНМС України
Володимир Русланович Нікульшин.

Захист дисертації відбудеться «14» травня 2012 р. об 11⁰⁰ годині в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.41.087.01 в Одеській державній академії холоду (вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса).

Відгуки на автореферат у 2-ух примірниках прохання надсилати за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ОДАХ за вказаною адресою.

Автореферат розісланий «12» квітня 2012 року.


В.І. Мілованов

XV 1205
ІНСТИТУТ ХОЛОДУ
ОНАХГ
БІБЛІОТЕКА

Актуальність теми. Зростаюча безперервно емісія діоксиду вуглецю посилює прояв парникового ефекту, що викликає глобальне потепління. Основний внесок у ці процеси вносять різні димові гази. За оцінками «UNEP» в 2010 р. щорічні викиди діоксиду вуглецю в світі тільки від спалювання викопного палива склали 30 Гт. На Україною з цього обсягу викидів припадає 0,35 Гт. Незважаючи на значні викиди CO₂ в Україні, обсяги його виробництва для подальшого застосування в промисловості явно недостатні. У зв'язку з цим важливим завданням є розробка процесів, установок і енерготехнологій для економічного вилучення діоксиду вуглецю з продуктів згорання з метою подальшого поховання або використання, тощо діоксид вуглецю є висококліквідним продуктом.

Нааявні в даний час на підприємствах комплекси традиційного типу для виробництва рідкого CO₂ в переважній кількості випадків працюють на базі спалювання природного газу (ПГ) в котельних агрегатах (КА) для виробництва водяної пари і продуктів згорання, з яких отримують CO₂. Такі комплекси, які використовують ПГ і споживають електроенергію, вкрай неефективні. Крім цього, вони не дозволяють, поряд з одержанням CO₂, виробляти ще N₂ та електроенергію.

Застосування CO₂ і N₂ дає можливість інтенсифікувати видобуток і переробку вуглеводневих газів малодебітних свердловин. Використання діоксиду вуглецю при вирощуванні овочів і рослин різних сортів у тепличних умовах є перспективною технологією. Споживання діоксиду вуглецю і теплоти призводить до збільшення в кілька разів швидкості росту і набору рослинами біологічної маси, що сприяє підвищенню ефективності парникового господарства та зниження викидів CO₂. Діоксид вуглецю і азот, якщо їх отримання буде пов'язане з відносно низькими витратами енергії, ніж у використуваних зараз установках, можуть бути основними компонентами вітчизняних великотоннажних виробництв сечовини і різних вуглеамонійних сполук. Подальше їх використання дозволяє не тільки підвищувати врожайність сільськогосподарських культур, але і сприяє включенню вуглецю в його глобальний природний цикл. У зв'язку із значним актуальним завданням є розробка таких систем виробництва рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю та азоту, які б дали можливість отримувати їх автономно та одночасно, з відносно низькими витратами. Можливе підвищення ефективності існуючих комплексів, навіть кілька реконструйованих, обмежена. Необхідна розробка нових комплексів, що ефективніше використовують високе значення ексергії ПГ.

Аналіз показує, що найефективніше отримувати рідкий низькотемпературний діоксид вуглецю, а також і азот в енерговиробних комплексах, які споживають тільки ПГ. Розробкам і дослідженням таких комплексів поки не приділяється належної уваги, незважаючи на підвищення вартості ПГ. Ці комплекси для виробництва, поряд з CO₂ і N₂, ще й електроенергії раціонально створювати на основі випускаючих різними фірмами сучасних когенераційних установок. Однак просте їх включення до складу розроблюваних комплексів автономного типу без пошуку і реалізації миски рішень виявляється практично неможливим. Це обумовлено тим, що продукти згорання після газового двигуна містять відносно велику кількість кисню, що викликає полімеризацію застосовуваних у процесах абсорбції-десорбції CO₂ водних розчинів амінів. Крім цього, температурний потенціал і кількість теплоти, що виробля-

ється когенераційною установкою, виявляються істотно нижче, ніж потрібно для вилучення CO_2 з продуктів згорання.

Все це робить актуальним розробку нових ефективних енерготехнологічних комплексів (ЕТК) автономного типу для отримання рідкого CO_2 , газоподібного N_2 та електроенергії тільки за рахунок використання ПГ, а також створення необхідних методів розрахунку.

Термодинамічний і енергоекологічний аналізи процесів і схем розроблених комплексів проводився з використанням робіт таких вчених, як В.М. Бродяньський, О.П. Клименко, В.С. Мартиновський, Л.З. Мельцер, а також В.П. Железний, В.О. Мазур, О.І. Пятнічко, Н.М. Фіалко, А. Bejan, S. Fisher, G. Tsatsaronis та ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. При виконанні дисертаційної роботи враховувалися наступні основні керівні законодавчі документи: Закон України «Про енергозбереження» № 74/94-ВР від 01.07.94р.; Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу» № 2509-IV від 05.04.2005р.; Постанова Кабінету Міністрів України від 2.09.93 № 699 «Про заходи щодо ефективного використання газу та інших паливно-енергетичних ресурсів в народному господарстві»; Постанова Кабінету Міністрів України від 01.03.2010 № 243 «Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності на 2010-2015 роки»; Закон України № 1430-IV від 04.02.2004р. «Про ратифікацію Кіотського протоколу до Рамкової Конвенції Організації Об'єднаних націй про зміну клімату»; «Регіональна цільова економічна програма створення в Одеській області інноваційної інфраструктури на 2009-2013 роки».

Мета і завдання дослідження. Метою є розробка схем та методик розрахунків ефективних енерготехнологічних комплексів для одночасного виробництва рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю, газоподібного азоту та електроенергії.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити наступні **завдання**: - виявити основні джерела втрат від незворотності, що зумовлюють низьку ефективність виробництва рідкого низькотемпературного CO_2 з димових газів (ДГ), що утворюються в результаті згорання ПГ, в установках традиційного типу (ТУ); - виконати оптимізацію робочих характеристик зріджувача діоксиду вуглецю (ЗДВ), яка в загальному випадку зводиться до визначення умов, що відповідають максимуму коефіцієнта зрідження; - знайти оптимальний склад циркулюючого амінового розчину абсорбентів в абсорбційно-десорбційній установці (АДУ) з метою мінімізації витрат теплоти на його регенерацію; - визначити необхідну та достатню кількість ПГ, що направляється в генератор димових газів стехіометричного складу (ДГСС), для забезпечення теплою процесу регенерації розчину абсорбентів і отримання димових газів стехіометричного складу, необхідних для виробництва технологічного азоту; - розробити методику розрахунку коефіцієнта надлишку повітря і кількості ПГ, що подається в когенераційну установку (КУ), для знаходження її робочих характеристик; - знайти способи ефективного включення КУ до складу ЕТК та організації процесу горіння ПГ в середовищі кисню димових газів в генераторі ДГСС для виробництва, поряд з електричною енергією, рідкого низькотемпературного CO_2 і газоподібного N_2 ; - дослідити можливість ефективного використання теплоти в паротурбінній установці (ПТУ), що працює на неводних парах, з метою виробництва додаткової кількості електричної енергії в ЕТК; - визначити характеристики

ЕТК в режимі переробки додаткових сторонніх ДГ; - створити методики розрахунку основних характеристик окремих установок, які входять до складу комплексу і всього комплексу в цілому; - визначити енергетичні характеристики і продуктивність ЕТК, що підтверджують здатність комплексу працювати автономно з високою термодинамічною ефективністю; - підтвердити на основі розрахунку ТЕWІ вищі енергоекологічні показники розроблених ЕТК.

Об'єктом дослідження є процеси отримання CO_2 в рідкому вигляді в різних схемах зріджувача діоксиду вуглецю; процеси згорання ПГ в КА, генераторі ДГСС і КУ; процеси абсорбції CO_2 з димових газів і десорбції його з розчину абсорбентів.

Предметом дослідження є параметри процесів згорання ПГ в КА і КУ з визначенням витрат і складів продуктів згорання для організації витягу з них CO_2 з наступним його зрідженням, а також виробництвом азоту, електроенергії та теплоти.

Методи дослідження: термодинамічні методи розрахунку складів і витрат продуктів згорання ПГ, кількості одержуваної теплоти і виробленої електроенергії, складу і витрати абсорбенту для вилучення CO_2 з ДГ, характеристик установок і всього комплексу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Розроблено принципову схему та методику розрахунку енерготехнологічних комплексів, які споживають природний газ, для автономного виробництва рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю, газоподібного азоту та електроенергії. Створені комплекси орієнтовані на споживання ПГ $G_{\text{ПГ}}^{\text{ЕТК}}$ від 100 до 550 м³/год., виробництво $LTLCO_2$ від 200 до 1500 кг/год., газоподібного азоту $G_{\text{N}_2}^{\text{ЕТК}}$ від 800 до 6000 м³/год., видачу зовнішньому споживачеві електричної потужності $W_{\text{ел}}^{\text{ЕТК}}$ від 25 до 500 кВт.

2. Вирішені завдання стикування когенераційної установки з абсорбційно-десорбційною установкою за допомогою генератора димових газів стехіометричного складу, що забезпечує каталітичне горіння ПГ з одночасним виробництвом теплоти для регенерації розчину абсорбентів і отримання димових газів стехіометричного складу. Визначено діапазон раціонального розподілу ПГ між КУ ($V_{\text{ПГ}}^{\text{КУ}}$ від 55,5 до 62,5%) і генератором ДГСС ($V_{\text{ПГ}}^{\text{ДГСС}}$ від 37,5 до 44,5%).

3. Запропоновано методику визначення умов досягнення максимуму коефіцієнта зрідження CO_2 в зріджувачі діоксиду вуглецю (ЗДВ), що працює по циклу високого тиску (ЦВТ).

4. Поставлена і вирішена задача знаходження оптимального складу амінового розчину абсорбентів, що містять МЕА $\xi_{\text{МЕА}} = 10\%$ мас. і МДЕА $\xi_{\text{МДЕА}} = 40\%$ мас., який відповідає мінімальному питомому споживанню теплоти на регенерацію розчину $q_{\text{мин}}^{\text{АДУ}} = 4500$ кДж/кг CO_2 .

5. Встановлено, що використання надлишкової теплоти в паротурбінній установці, що працює на пентані, в разі включення її до складу ЕТК, дозволить збільшити вироблену електричну потужність майже на 50%. Показано, що ЕТК має у своєму розпорядженні достатню електричну потужність і теплоту для автономної переробки сторонніх ДГ, при цьому продуктивність по рідкому низькотемпературному CO_2 і газоподібному N_2 може збільшитися в 1,5 рази.

6. Підтверджені високі значення показників термодинамічної ефективності розроблених ЕТК ($\eta_e^{\text{ЕТК}} = 21\%$) у порівнянні з ТУ ($\eta_e^{\text{ТУ}} = 0,7\%$) та енергоекологічної ефективності, що проявляється в зниженні емісії CO_2 в навколишнє середовище від 40 до 70%, залежно від режиму роботи ЕТК, при однаковому споживанні ПГ.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджуються: коректною постановкою вирішених у дисертації завдань; розробкою методики розрахунку характеристик продуктів згорання природного газу в залежності від його складу, результати якої збігаються з відомими надійними експериментальними даними; створенням методик розрахунку робочих характеристик зріджувача діоксиду вуглецю, що дозволяє визначити дійсні витрати на зрідження CO_2 , порівнянні з літературними даними; розрахунками абсорбційно-десорбційної установки з вилучення діоксиду вуглецю та азоту з димових газів, характеристики якої відповідають експлуатаційним показникам сучасних вуглекислотних станцій традиційного типу; розрахунками когенераційної установки, показники якої дають гарну збіжність із середніми значеннями дійсних характеристик сучасних когенераційних установок.

Усі створені методики засновані на досить точних даних про властивості речовин, показниках дійсних процесів і термодинамічних циклів. Використовувалися сучасні методи термодинамічного і енергоекологічного аналізу, програмні засоби рішення задач.

Практична цінність отриманих результатів підтверджується: розробкою рекомендацій по вдосконаленню вуглекислотних комплексів, котрі знаходяться в експлуатації. Дані рекомендації підготовлені і передані для впровадження у ВАТ «Одеський припортовий завод» (м. Южне, Одеська обл., Україна). Впровадження їх дозволить отримати значний економічний ефект, що полягає в зниженні собівартості виробленого рідкого низькотемпературного CO_2 на 40%; передачею методик розрахунку енерготехнологічних комплексів, що використовують природний газ, ВКФ «Кріопром» ТОВ (м. Одеса, Україна) та ЗАТ «Завод «Уралтехгаз» (м. Єкатеринбург, РФ) для їх проектування, розробки технічної документації та подальшого виготовлення; отриманням трьох патентів України на енерготехнологічні комплекси та способи отримання рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю і газоподібного азоту.

Особистий внесок здобувача. Наведені в дисертації результати досліджень отримані здобувачем самостійно з використанням консультацій наукового керівника. У друкованих працях у співавторстві здобувачеві належать основні результати в розробці математичних моделей, методів вирішення завдань і створення програм розрахунків схем і устаткування установок з виробництва, з використанням природного газу, електричної енергії і теплоти, а також рідкого низькотемпературного CO_2 і газоподібного N_2 .

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи та її основні положення доповідалися та обговорювалися на науково-технічній конференції аспірантів ОДАХ «Сучасні проблеми низькотемпературної техніки», м. Одеса 2002р.; Конференції співробітництва Росії та Європейського Союзу «Інноваційна і стійка експлуатація родовищ вуглеводнів», м. Москва, 2004р.; I-му та II-му міжнародних форумах інвестицій та інновацій, м. Одеса, 2004 і 2005рр.; міжнародній науковій конференції «Технічні та технологічні гази. Компресорне обладнання у технологічних процесах», м. Суми, 2006р.; V-му - VIII-му міжнародних семінарах «Підвищення ефективності та безпеки виробництв продуктів поділу повітря», м. Одеса (2004 - 2007рр.); I-му - IV-ом міжнародних семінарах «Підвищення ефективності та екологотехнологічної безпеки виробництва та використання діоксиду вуглецю», м. Одеса (2005 - 2011рр.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 11 робіт, серед них 8 статей у фахових журналах, а також 3 патенти України.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 3-х розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та 4-х додатків. Вона містить 148 сторінок тексту, 26 малюнків, 32 таблиці, список літератури з 86 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі відображена актуальність роботи, сформульовані цілі та завдання дослідження, що випливають із сучасного стану використання ПГ для отримання діоксиду вуглецю, відзначені недоліки використовуваних для цього комплексів, сформульована наукова новизна, вказані основні результати роботи та визначена їх практична цінність.

У першому розділі розглянуті і термодинамічно проаналізовані основні характеристики роботи традиційних установок, які виробляють рідкий низькотемпературний CO_2 з продуктів згорання ПГ. Встановлені основні недоліки експлуатованих ТУ та виявлені джерела втрат від незворотності. Сумарні втрати теплоти згорання палива становлять не менше 81,3%. Теплота в основному втрачається після парового котла, десорбера CO_2 і в холодильнику розчину. Питомі витрати електроенергії на виробництво рідкого низькотемпературного CO_2 в ТУ, що працюють за циклом високого тиску, мають високі значення і становлять 0,365 кВт·год./кг CO_2 , а ексергетичний ККД АДУ, не перевищує 3%, що свідчить про низьку ефективність реалізованих процесів і циклів. Основний виявляється втрата, обумовлена використанням пара низьких параметрів з температурою 408 К, який виробляється в КА при горінні ПГ з температурою 1523 К. Вказана незворотність КА з урахуванням термодинамічних втрат також в АДУ і ЗДВ знижує значення загального ексергетичного ККД установки до 0,7%, що підтверджує низьку ефективність використання ексергії ПГ.

Намічені шляхи вдосконалення та підвищення ефективності роботи ТУ. Для зниження втрат від незворотності, викликані різницею температур спалювання ПГ і температурою, необхідною для процесу десорбції CO_2 , а також для збільшення ексергетичного ККД всієї установки пропонується використовувати КУ для одночасного виробництва електроенергії, тепла й додаткового продукту - азоту. Однак включення КУ до складу вуглекислотного комплексу не дасть бажаного результату, так як виникають проблеми їх стикування, обумовлені наступним: 1. Продукти згорання після КУ містять від 8 до 10% кисню, що неприпустимо, тому що, по-перше, починає активно полімеризуватися абсорбент (водний розчин МЕА) і відкладатися в трубному та міжтрубному просторах апаратів, по-друге, погіршуються його абсорбційні властивості, втретє, неможливо здійснити отримання чистого газоподібного N_2 , поряд з CO_2 . 2. Потенціал виробленої в КУ гарячої води на рівні всього 367 К виявляється недостатнім для виділення діоксиду вуглецю з розчину абсорбенту, так як для здійснення процесу десорбції CO_2 потрібна температура не нижче 408 К. Димових же газів з температурою до 773 К когенераційна установка видає відносно небагато.

Для створення нових ефективних енерготехнологічних комплексів сформульована миска завдань підлягаючих вирішенню. Крім цього, необхідно дати відповідь на питання, поставлене професором В.С. Мартинівським в його монографії «Цикли, схеми та характеристики термотрансформаторів» в наступному вигляді: «Если использовать холод, вырабаты-

ваемый установкой, для ликвидации загрязнений от собственной котельной, то останется ли холода для очистки воздуха от загрязнений, создаваемых другими источниками?».

У другому розділі роботи розглядаються ефективні енерготехнологічні комплекси, які використовують ПГ для виробництва рідкого низькотемпературного CO₂, газоподібного N₂ та електроенергії. Наведені схеми розроблених комплексів та описані методики розрахунків основних характеристик установок, які входять до їх складу, а також самих ЕТК. Визначені оптимальні умови та режими роботи ЕТК. Отримані значення їх енергетичних характеристик, підтверджена висока термодинамічна ефективність ЕТК.

Загальна принципова схема розробленого ЕТК, який складається з трьох основних установок: когенераційної установки (КУ), абсорбційно-десорбційної установки (АДУ), що включає в себе генератор димових газів стехіометричного складу (ДГСС) і зріджувач діоксиду вуглецю (ЗДВ), представлена на рис. 1. ЕТК при використанні тільки ПГ виробляє рідкий низькотемпературний CO₂, газоподібний N₂ та електричну енергію. Як видно з рис.1, ПГ $G_{ПГ}^{ЕТК}$, що надходить в комплекс, ділиться на дві частини: одна $G_{ПГ}^{KV}$ направляється в КУ для вироблення електроенергії $W_{ел}^{KV}$, гарячої води $Q_{ГВ}^{KV}$ та димових газів $G_{ДГ}^{KV}$, інша $G_{ПГ}^{ДГСС}$ - в генератор ДГСС. ЕТК здатний також переробляти сторонні ДГ. Тому димові гази після КУ $G_{ДГ}^{KV}$ попередньо змішуються з ПГ $G_{ПГ}^{ДГСС}$, які направляються в генератор ДГСС, і сторонніми ДГ $G_{ДГ}^{КА}$ від зовнішнього КА, після чого подаються в генератор ДГСС ($G_{ДГ}^{ДГСС}$). В генераторі ДГСС за рахунок застосування каталізатора відбувається каталітичне горіння ПГ в середовищі кисню ДГ. Внаслідок виділяється теплота, яка використовується для регенерації розчину абсорбентів, і димовий газ стехіометричного складу, що дозволяє отримувати поряд з CO₂ технологічний газоподібний азот. Генератор ДГСС виконує функцію кип'ятильника АДУ. Після генератора ДГСС димові гази направляються в АДУ для поділу на газоподібний діоксид вуглецю, який подається в ОДУ для подальшого зрідження та видачі у вигляді продуктового рідкого низькотемпературного CO₂, і газоподібний N₂, котрий попередньо осушується та стискається до 0,8 МПа і видається споживачеві. Таким чином, ЕТК, витрачаючи тільки ПГ, може виробляти електроенергію, рідкий низькотемпературний CO₂ і газоподібний N₂.

Для забезпечення високих показників ЕТК необхідно вирішити миску завдань. ЕТК орієнтований на виробництво рідкого низькотемпературного CO₂ як найбільш зручного продукту з точки зору його зберігання, транспортування та газифікації в місцях споживання. При його створенні необхідно оптимізувати роботу ЗДВ. Для цього, як показав аналіз, до складу ЗДВ потрібно включити низькотемпературну холодильну машину для переохолодження рідкого CO₂ перед його дроселюванням в ізотермічну ємність, а пари CO₂, що утворюються після

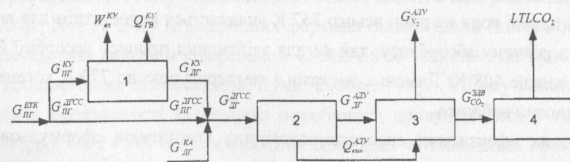


Рис. 1. Принципова блок-схема ЕТК:

1 - когенераційна установка, 2 - генератор ДГСС; 3 - абсорбційно-десорбційна установка, 4 - зріджувач діоксиду вуглецю

дроселювання, направляти на регенерацію та охолодження адсорберів БО з подальшою їх подачею на всмоктування в КМ (рис. 2).

Завдання оптимізації роботи ЗДВ в загальному випадку зводиться до визначення умов максимуму коефіцієнта зрідження при наступних припущеннях:

1. Необхідно компенсувати втрати газоподібного CO₂ в КМ і конденсаторі за рахунок збільшення потоку вхідного газу до його значення

$$G_{CO_2}^{KM} = \frac{1}{k_{CO_2}^{KM} \cdot k_{CO_2}^{конд}} \cdot G_{CO_2}^{ADU} \quad (1)$$

2. Слід збільшення витрати газоподібного CO₂ через компресор здійснювати за рахунок організації циркулюючого потоку у ЗДВ, необхідного для регенерації БО,

$$G_{CO_2}^{KM} = G_{CO_2}^{ADU} + G_{CO_2}^{рег} \quad (2)$$

3. Потрібно забезпечувати витрату регенеруючого газу постійним і рівним кількості газу, що подається на охолодження адсорберів БО, тобто

$$G_{CO_2}^{рег} = G_{CO_2}^{конд} = idem \quad (3)$$

Відповідно до прийнятих припущень вираз для коефіцієнта зрідження ЗДВ ЕТК буде мати наступний вигляд:

$$z_{зрідж}^{ЗДВ} = \prod_{i=1}^n (1 - k_{отр}^i) = (1 - x_{CO_2}) = y_{CO_2} \quad (4)$$

Критерієм працездатності ЗДВ ЕТК є виконання нерівності, яке характеризує роботу БО:

$$\tau_{адс} - \tau_{пр} \geq \tau_{нагр} + \tau_{охол} + \tau_{нід} + \tau_{скнд} \quad (5)$$

де $\tau_{адс}$, $\tau_{пр}$, $\tau_{нагр}$, $\tau_{охол}$, $\tau_{нід}$, $\tau_{скнд}$ - час адсорбції, паралельної роботи, нагрівання, охолодження, підйому і скидання тиску, відповідно, год. Для забезпечення (5), а також мінімізації капітальних та експлуатаційних витрат необхідно встановити залежність $V_{адс} = f(\tau_{адс})$.

На основі (1)-(5) була розроблена методика розрахунку основних показників роботи ЗДВ відповідних до умов максимуму коефіцієнта зрідження, а також виконано оцінку ефективності роботи ЗДВ ТУ і ЕТК, що працює за ЦВТ при використанні компресора марки 2УП (табл.1). Для розрахунку основних характеристик ЗДВ в режимі максимуму коефіцієнта зрідження необхідно знати технічні характеристики КМ і ХМ, параметри і склад газоподібного CO₂, що подається на зрідження, тип і характеристики застосовуваного в БО адсорбенту. На першому етапі на основі вхідних даних розраховуються характеристики КМ і пере-

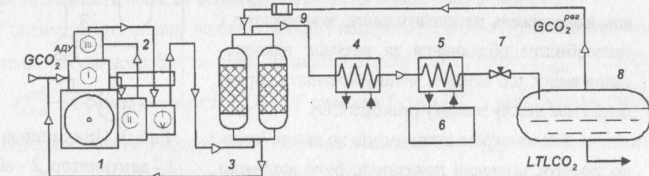


Рис. 2. Принципова схема зріджувача діоксиду вуглецю ЕТК:

1 - вуглекислотна КМ, 2 - холодильник; 3 - блок осушки; 4 - водяний конденсатор, 5 - випарник ХМ; 6 - низькотемпературна ХМ; 7 - дросельний вентиль; 8 - ізотермічна ємність; 9 - електричний обігрівач БО

віряється умова працездатності. На другому етапі виконується розрахунок циклограми роботи БО і підтверджується його працездатність. Третій етап розрахунків характеризується визначенням кількості теплоти, що відводиться від CO₂ у водяному конденсаторі і в випарнику ХМ, з подальшим вибором низькотемпературної ХМ, що забезпечує необхідну холодопродуктивність ЗДВ. Наприкінці проводиться розрахунок основних характеристик ЗДВ.

З табл.1 видно, що ЗДВ ТУ володіє низькою ефективністю виробництва LTLCO₂, яка становить $\eta_e^{ЗДВ} = 15\%$. Це обумовлено низьким коефіцієнтом зрідження 0,52 і, відповідно, високими питомими енерговитратами (0,365 кВт·год./кгCO₂). Розрахунок характеристик ЗДВ ЕТК, що працює по ЦВТ, показав, що при збільшенні енергоспоживання на 13% за рахунок установки низькотемпературної ХМ та організації циркуляції необхідного і достатньої кількості регенеруючого газу (див. рис.2), ефективність виробництва LTLCO₂ зростає на 62% і $\eta_e^{ЗДВ, ЕТК}$ складе 25%, що призведе до зниження питомих енерговитрат на 38% з 0,365 до 0,226 кВт·год./кг CO₂. Ефективність виробництва LTLCO₂ по ЦСТ ($\eta_e^{ЗДВ} = 26\%$) порівнянна з ефективністю ЗДВ, що працює по ЦВТ ($\eta_e^{ЗДВ} = 25\%$), і залежить від основного від потужності, споживаної ХМ.

Аналіз різних процесів амінового вилучення CO₂ з димових газів (рис. 3) дозволив сформулювати основні вимоги, що пред'являються до абсорбенту. Обраний для АДВ абсорбент повинен забезпечувати:

1. Зниження кількості циркулюючого аміну за рахунок переходу на менш корозійно-активний абсорбент, що допускає більш високу концентрацію і ступінь насичення CO₂.
2. Зменшення розмірів і зниження теплових навантажень на кип'ятильник, конденсатор і теплообмінне обладнання за рахунок використання аміну, що вимагає меншу кратність циркуляції і має нижчу теплоту реакції з CO₂.

Так як окремі типи амінів не дають істотно знизити зазначені показники, було вирішено використовувати водну суміш моноетаноламіна (МЕА) і метилдіетаноламіна (МДЕА). Завдання оптимізації складу водного розчину абсорбентів в загальному випадку зводиться до визначення

Таблиця 1
Основні характеристики ЗДВ

Установка	ТУ	ЕТК	
Цикл	ЦВТ	ЦВТ	ЦСТ
$N_{ел}^{КОМ}$, кВт	46,32	46,32	26,36
$N_{ел}^{БО}$, кВт	0,38	0,38	0,38
$N_{ел}^{ХМ}$, кВт	-	6,05	25,21
$N_{ел}^{ЗДВ}$, кВт	46,69	52,75	51,95
$z_{зрідж}$	0,52	0,95	0,95
$N_{пит}^{ЗДВ}$, кВт·год./кг	0,365	0,226	0,22
$\eta_e^{ЗДВ}$, %	15	25	26

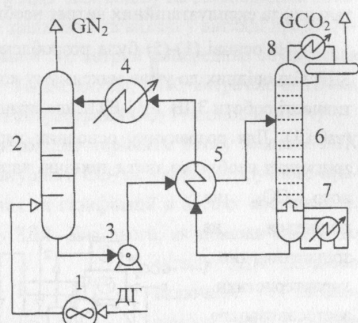


Рис. 3. Принципова схема АДВ ЕТК:
1 - вентилятор, 2 - абсорбер; 3 - насос, 4 - холодильник розчину; 5 - теплообмінник, 6 - десорбер; 7 - кип'ятильник, 8 - конденсатор

$$\xi^* = \text{opt}\{\xi\} \rightarrow \min f(q_{\text{sun}}^{ALV}), \quad (6)$$

де ξ^* - оптимальний склад водного розчину абсорбентів;

$$\xi = \sum_{i=1}^n \xi_i = \sum_{i=1}^n \xi_i^{амин} + \xi_{CO_2} + \xi_{H_2O} = \xi_{МЕА} + \xi_{МДЕА} + \xi_{CO_2} + \xi_{H_2O}, \quad (7)$$

$\xi_i^{амин}, \xi_{CO_2}, \xi_{H_2O}$ - концентрації амінів (МЕА, МДЕА), CO₂ і води, відповідно, % мас;

$$\xi_{CO_2} = \sum_{i=1}^n \xi_i^{амин} \cdot x_{амин} = \xi_{МЕА} \cdot x_{МЕА} + \xi_{МДЕА} \cdot x_{МДЕА}, \quad (8)$$

$x_{амин} = f(k_{CO_2}^{ALV}, k_{рег}^{ALV})$ - ступінь карбонізації аміну (кг CO₂/кг аміну або моль CO₂/моль аміну), що залежить від необхідного ступеня вилучення CO₂ з ДГ, $k_{CO_2}^{ALV}$ і витрати теплоти на регенерацію розчину, що характеризується коефіцієнтом регенерації аміну $k_{рег}^{ALV} = 0,8...0,95$; $k_{CO_2}^{ALV} = (C_{CO_2}^{ДГ} - C_{CO_2}^{N_2}) / C_{CO_2}^{ДГ} = f(C_{CO_2}^{ДГ}, C_{CO_2}^{N_2})$ - ступінь вилучення CO₂ з ДГ; $q_{\text{sun}}^{ALV} = f(G_p, k_{рег}^{ALV})$ - питома витрата теплоти на регенерацію розчину амінів в кип'ятильник; $G_p = f(C_{CO_2}^{ALV}, \xi_i^{амин})$ - витрата циркулюючого розчину абсорбенту, що залежить від необхідної продуктивності по газоподібному діоксиду вуглецю $G_{CO_2}^{ALV}$ і концентрації амінів в розчині $\xi_i^{амин}$.

При заданій продуктивності газоподібного діоксиду вуглецю $G_{CO_2}^{ALV}$ питома витрата циркулюючого розчину

$$g_p = \frac{1}{k_{рег}^{ALV}} \cdot \left[\left(\sum_{i=1}^n \xi_i^{амин} / \xi_{CO_2} \right) + 1 \right] / \left(\sum_{i=1}^n \xi_i^{амин} + \xi_{CO_2} \right). \quad (9)$$

При вирішенні оптимізаційної задачі вводилися обмеження на зміст амінів. Так, МЕА, як правило, використовується у вигляді 10...20% розчинів, і ступінь насичення кислими компонентами обмежується 0,45 моль CO₂/моль МЕА. Більш високі концентрації і ступеня насичення є причиною підвищеної корозії обладнання. Концентрація МДЕА в розчині становить, як правило, 20...50%, ступінь насичення кислими компонентами до 0,3 моль CO₂/моль МДЕА. Використання суміші амінів дозволяє вдало поєднувати сильні сторони різних складових: низьку корозійну активність МДЕА, що дозволяє підтримувати високу концентрацію амінів у розчині і його ступінь насичення кислими компонентами, і підвищену реакційну здатність МЕА до CO₂, що дає можливість досягти необхідного ступеня очищення ДГ від CO₂.

При пошуку оптимального складу водного розчину абсорбенту, згідно (7), враховувалися також обмеження: температура десорбції не повинна перевищувати 125°C, тобто, $t_{0, \max}^{ALV} \leq 125^\circ C$; $t_{0, \max}^{ALV} \leq T_{0, \max}^{ALV}$, $t_{0, \max}^{ALV} - t_{0, \max}^{ALV} \leq 0$; продуктивність CO₂ з ДГ повинна бути $G_{CO_2}^{ALV} = \text{idem}$; концентрація CO₂ у потоці газу (N₂) підходящого з абсорбера не повинна змінюватися ($C_{CO_2}^{N_2} = \text{idem}$); концентрація амінів в розчині абсорбенту повинна бути в межах, що забезпечують мінімальну корозійну активність розчину для кожного з обраних амінів, і не перевищувати 50% мас. для всього розчину, тобто повинні виконуватися умови: $0 \leq \xi_i^{амин} \leq \xi_{i, \max}^{амин}$; $1 - \sum_{i=1}^n \xi_i^{амин} = 0,5$.

При вирішенні (6) використовувалось наступне балансове рівняння, кДж/кг:

$$q_{\text{кун}}^{\text{АДВ}} = q_{\text{хлм}} + q_p + q_{\text{ам.п.}} + q_{\text{ам.л.}}, \quad (10)$$

де $q_{\text{хлм}} = f(\xi_i^{\text{ам.лн}})$ - питома кількість теплоти, що витрачається на реакцію хімічного розкладу карбонатів амінів; $q_p = f(G_p, \Delta t, \xi_i^{\text{ам.лн}})$ - питома витрата теплоти, що витрачається на нагрівання розчину до температури десорбції; $q_{\text{ам.п.}} = f(t_{\text{н.п.}}, P_0)$ - питома кількість теплоти, витрачаєма з вторинними водяними парами; $q_{\text{ам.л.}} = f(q_{\text{хлм}}, q_p, q_{\text{ам.п.}})$ - питома втрата теплоти.

Розрахунки різних складів абсорбентів і питомих витрат насичених розчинів з урахуванням вищевикладених умов і розробленої методики, а також мінімальної корозійної активності розчину дозволили прийняти як оптимальну концентрацію: МЕА 10%; МДЕА - 40% мас. При даних значеннях досягається мінімальна витрата теплоти на регенерацію розчину, котра становить 4500 кДж/кг CO₂, що суттєво нижче витрат теплоти в ТУ (12900 кДж/кг CO₂). Ексергетичний ККД АДВ ЕТК складає 5,63%, якій більше ніж у ТУ. Це обумовлено не тільки зниженням витрат теплоти на регенерацію розчину в результаті оптимізації його складу, але також виробництвом додаткового продукту - газоподібного N₂.

Поставлена і вирішена задача стикування КУ з генератором ДГСС, який є кип'ятильником АДВ. У загальному випадку умови стикування можна формалізовано уявити як

$$\left. \begin{aligned} C_i^{\text{ДГ}} &= f(C_i^{\text{ПГ}}, \alpha^{\text{КУ}}) \rightarrow \min C_{O_2}^{\text{ДГ}} \rightarrow \max C_{CO_2}^{\text{ДГ}}, \\ \alpha^{\text{КУ}} &= f(q_{\text{кун}}^{\text{АДВ}}), \\ W_{\text{ел}}^{\text{КУ}} &\geq N_{\text{ел}}^{\text{ЕТК}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{ел}}^i = N_{\text{ел}}^{\text{КУ}} + N_{\text{ел}}^{\text{АДВ}} + N_{\text{ел}}^{\text{ЗДВ}} + N_{\text{ел}}^{\text{А}}, \\ W_{\text{ел}}^{\text{КУ}} &= f(V_{\text{ПГ}}^{\text{КУ}}), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де $C_i^{\text{ДГ}}, C_i^{\text{ПГ}}$ - складки компонентів ДГ і ПГ; $V_{\text{ПГ}}^{\text{КУ}}, V_{\text{ПГ}}^{\text{ДГСС}}, V_{\text{ПГ}}^{\text{ЕТК}}$ - кількість ПГ, який витрачається в КУ, генераторі ДГСС і в ЕТК; $\alpha^{\text{КУ}}$ - коефіцієнт надлишку повітря в КУ; $C_{O_2}^{\text{ДГ}}, C_{CO_2}^{\text{ДГ}}$ - змісту O₂ і CO₂ в ДГ; $q_{\text{кун}}^{\text{АДВ}}$ - питома теплове навантаження кип'ятильника АДВ; $N_{\text{ел}}^{\text{КУ}}, N_{\text{ел}}^{\text{АДВ}}, N_{\text{ел}}^{\text{ЗДВ}}, N_{\text{ел}}^{\text{А}}$, $N_{\text{ел}}^{\text{ЕТК}}$ - споживані електричні потужності КУ, АДВ, ЗДВ, азотним компресором і ЕТК; $W_{\text{ел}}^{\text{КУ}}$ - вироблена електрична потужність у КУ. При вирішенні поставленого завдання приймалося до уваги виконання балансових співвідношень, що враховують реакцію горіння ПГ. Це дозволило знайти такі важливі параметри як $V_{\text{ПГ}}^{\text{КУ}}, V_{\text{ПГ}}^{\text{ДГСС}}, V_{\text{ПГ}}^{\text{ЕТК}}$ та $\alpha^{\text{КУ}} = f(V_0)$.

Встановлено розподіл потоку ПГ між КУ і генератором ДГСС в залежності від коефіцієнта надлишку повітря, яке дозволяє привести сумарні продукти згорання ПГ до стехіометричного складу, що необхідно для виконання умови (11) та забезпечення працездатності АДВ (рис. 4). В результаті отримано: коефіцієнт надлишку повітря

$$\alpha^{\text{КУ}} = \left[1 - \frac{q_{\text{кун}}^{\text{АДВ}} \cdot g_{CO_2}}{Q_n^3 \cdot z_{\text{зрідж}}} \right]^{-1} = \alpha_{\text{мін}} = f(q_{\text{кун}}^{\text{АДВ}}); \quad (12)$$

кількість ПГ, що подається в генератор ДГСС,

$$V_{\text{ПГ}}^{\text{ДГСС}} = \frac{q_{\text{кун}}^{\text{АДВ}} \cdot g_{CO_2}}{Q_n^3 \cdot z_{\text{зрідж}}}; \quad (13)$$

кількість ПГ, що направляється в КУ,

$$V_{\text{ПГ}}^{\text{КУ}} = \frac{1}{\alpha^{\text{КУ}}} \cdot V_{\text{ПГ}}^{\text{ЕТК}}. \quad (14)$$

З рис. 4 видно, що мінімальна кількість ПГ, що подається в генератор ДГСС - кип'ятильник АДВ складе 26,5%, що відповідає $\alpha^{\text{КУ}} = 1,36$ та $q_{\text{кун}}^{\text{АДВ}} = \min$. Отримані дані дозволяють зробити декілька висновків. По-перше, стандартні КУ, що працюють з $\alpha^{\text{КУ}} = 1,65$ в складі ЕТК, в змозі забезпечити працездатність АДВ, так як кількість ПГ, що подається в генератор ДГСС, становить 40%, що більше мінімально необхідного для роботи АДВ 26,5%. По-друге, можлива переробка сторонніх димових газів. По-третє, як слідує з рис. 4, кількість ПГ, що направляється в КУ, має бути в діапазоні $55,5\% \geq V_{\text{ПГ}}^{\text{КУ}} \leq 62,5\%$, а в генератор ДГСС - $37,5\% \geq V_{\text{ПГ}}^{\text{ДГСС}} \leq 44,5\%$.

Переробка сторонніх ДГ є актуальним та перспективним завданням, розв'язуванням при розробці ЕТК, так як вона дозволяє позитивно відповісти на поставлене проф. В.С. Мартиновським питання. Крім цього, робота ЕТК в режимі переробки сторонніх ДГ дозволить поліпшити як екологічну, так і економічну ефективність виробництва $LTLCO_2$. Максимальна питома кількість виробленого CO₂ визначалася як

$$g_{CO_2}^{\text{max}} = \frac{Q_n^3 \cdot z_{\text{зрідж}}}{q_{\text{кун}}^{\text{АДВ}}} \cdot \frac{\alpha^{\text{КУ}} - 1}{\alpha^{\text{КУ}}}. \quad (15)$$

При цьому питому додаткову кількість CO₂, виробленого із сторонніх ДГ, при їх переробці $\Delta g_{CO_2}^{\text{ДГ}} = g_{CO_2}^{\text{max}} - g_{CO_2}$. Так, при роботі ЕТК з КУ, котрі мають $\alpha^{\text{КУ}} = 1,65$ та $\alpha_{\text{мін}} = \alpha_{\text{кун}}^{\text{АДВ}} = 1,36$, кількість додатково виробленого CO₂ збільшиться на 48,7% і складе $\Delta g_{CO_2}^{\text{ДГ}} = 1,34$ кгCO₂/кг ПГ. Кількість додатково виробленого газоподібного N₂ визначається з урахуванням складу сторонніх ДГ. Прийємо складу ДГ відповідно до стандартного коефіцієнту надлишку повітря, що використовуються в КА, $\alpha^{\text{КА}} = 1,05$. На основі цих даних розраховуємо кількість ПГ, що направляється в генератор ДГСС, і кількість виробленого азоту по наступним залежностям:

$$V_{\text{ПГ}}^{\text{ДГСС}} = \left[\left(\alpha^{\text{КУ}} + \frac{\Delta g_{CO_2}^{\text{ДГ}}}{2,75} \cdot \frac{\alpha^{\text{КА}} - 1}{\alpha^{\text{КА}}} - 1 \right) \right] / \left[\left(\alpha^{\text{КУ}} + \frac{\Delta g_{CO_2}^{\text{ДГ}}}{2,75} \cdot \frac{\alpha^{\text{КА}} - 1}{\alpha^{\text{КА}}} \right) \right]; \quad (16)$$

$$V_{\text{ПГ}}^{\text{КУ}} = 1 - V_{\text{ПГ}}^{\text{ДГСС}}; \quad (17)$$

$$g_{N_2} = 13,28 \left(\alpha^{\text{КУ}} \cdot g_{CO_2} + \alpha^{\text{КА}} \cdot \Delta g_{CO_2}^{\text{ДГ}} \right). \quad (18)$$

В наслідок розрахунків розподіл ПГ буде наступним: $V_{\text{ПГ}}^{\text{ДГСС}} = 40,23\%$ та $V_{\text{ПГ}}^{\text{КУ}} = 59,77\%$, а кількість виробленого азоту $g_{N_2} = 20$ кг N₂/кг ПГ.

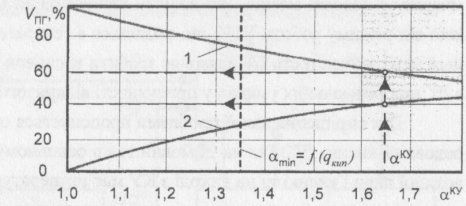


Рис. 4. Розподіл загальної витрати ПГ між КУ та генератором ДГСС в залежності від $\alpha^{\text{КУ}}$:

- 1 - кількість ПГ, що направляється в КУ;
2 - кількість ПГ, що надходить в генератор ДГСС

Однією з важливих завдань, що вирішуються при розробці ЕТК, є отримання димових газів стехіометричного складу. Для цього необхідно створити умови стабільного горіння ПГ в середовищі кисню ДГ, що подаються в генератор ДГСС, які залежать від концентрації ПГ і температури газової суміші. Розрахунки концентрацій ПГ у газовій суміші (3,74% і 2,5%), залежно від режиму роботи ЕТК, що подається в генератор ДГСС, показали, що вони нижче нижньої межі займистості. Це дозволяє зробити висновок про те, що займання і горіння суміші ПГ з ДГ при нормальних умовах у присутності відкритого вогню неможливо.

Для вирішення даної проблеми пропонується організувати каталітичне горіння ПГ в середовищі кисню ДГ. Так як димовий газ в основному складається з діоксиду вуглецю, азоту, водяної пари і кисню та на виході з КУ має температуру близько 500°C, то доцільно проводити парокисневу каталітичну конверсію природного газу. Для цього димовий газ змішується в змішувачі з природним газом і подається в трубний простір генератора ДГСС, який заповнений каталізатором. В наслідок процесу каталітичної конверсії виходить водень H_2 і оксид вуглецю CO . Кисень димового газу в реакції з H_2 і CO утворює пари води і CO_2 .

В якості каталізатора пропонується використовувати каталізатор на нікель-алюмінієвій основі, котрий містить палладій. Застосування даного типу каталізатора зумовлено його високою активністю при спалюванні ПГ при низьких температурах 500...850°C. Масова частка компонентів каталітичного шару складається з 5,5% - Pd/Al₂O₃; 70,5% - Ni та 24% - Al, де Pd міститься 0,9%. Для забезпечення працездатності каталізатора і каталітичного горіння ПГ в генераторі ДГСС необхідно, щоб $t_{ГС}^{ДГСС} \geq t_{раз}^{кам}$, де $t_{раз}^{кам} = 300^\circ C$ - температура розігріву каталізатора, після досягнення якої почне протікати екзотермічна каталітична реакція; $t_{ГС}^{ДГСС}$ - температура газової суміші на вході в генератор ДГСС. Розрахунки підтвердили, що як в першому, так і в другому випадках умова розігріву каталізатора виконується, тобто $t_{ГС}^{ДГСС} \geq t_{раз}^{кам}$. Таким чином, забезпечується повне згорання ПГ в генераторі ДГСС та отримання димових газів, що не містять кисню. Конструктивно генератор ДГСС суміщений з кип'ятильником АДУ і являє собою одне ціле. Таким чином, кількість теплоти, що утворюється при каталітичному горінні ПГ в середовищі кисню ДГ, безпосередньо передається розчину абсорбенту для його регенерації. Для забезпечення автономної роботи ЕТК необхідно визначити кількість виробленої електричної потужності в КУ та порівняти її значення із сумарною споживаною потужністю ЕТК, яке повинно задовольняти наступній умові:

$$W_{ес}^{КУ} \geq N_{num}^{ЕТК} = \sum_{i=1}^n N_{num}^i = N_{num}^{КУ} + N_{num}^{АДУ} + N_{num}^{3ПВ} + N_{num}^A \quad (19)$$

Кількість виробленої електричної потужності в КУ визначалася як

$$W_{ес}^{КУ} = V_{ПГ}^{КУ} \cdot Q_{н}^3 \cdot \eta_{зг}^{КУ} \cdot \alpha = f \left(\frac{q_{sum}^{АДУ}}{\alpha^{КУ}} \right) \quad (20)$$

Створена методика розрахунку КУ дає хорошу збіжність із середніми значеннями характеристик сучасних установок. Це дозволяє використовувати її для моделювання процесів, що протікають в установці, і отримувати дійсні її показники. Методика орієнтована на розрахунки когенераційних установок з електричною потужністю від 100 до 2000 кВт і витратою природного газу від 100 до 550 м³/год., що забезпечує їх застосування у складі ЕТК з продуктивністю до 1500 кг/год. $LTLCO_2$.

Результати розрахунку виробленої електричної потужності в КУ і сумарної споживаної потужності ЕТК показали, що умова автономної роботи комплексу здійснима. Для оцінки максимальної ефективності ЕТК необхідно розглянути корисне використання теплоти ЕТК ($Q_{ГВ}^{КУ}$, $Q_{CO_2}^{АДУ}$, $Q_{ДГ}^{ДГСС}$) в ПТУ з метою виробництва додаткової кількості електроенергії (рис. 5).

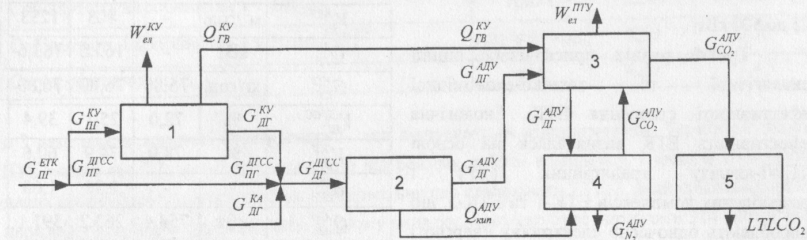


Рис. 5. Принципова блок-схема ЕТК з ПТУ: 1 – когенераційна установка; 2 - генератор ДГСС; 3 - паротурбина установка, 4 - АДУ, 5 - зріджувач діоксиду вуглецю

Кількість виробленої електричної потужності в ПТУ $W_{ес}^{ПТУ}$ визначалася як

$$W_{ес}^{ПТУ} = G_{p.m.}^{ПТУ} \cdot \left(\frac{\eta_s^T}{\eta_{зг}^T} \Delta i_s^T - \frac{1}{\eta_s^H \eta_{зг}^H} \Delta i_s^H \right) \quad (21)$$

Величина цієї потужності для конкретного робочого тіла залежить від його витрат, які, в свою чергу, - неявно від температур підведення та відведення теплоти і значень самих теплових потоків, тобто

$$G_{p.m.}^{ПТУ} = f(Q_{ГВ}^{КУ}, Q_{ДГ}^{ДГСС}, Q_{CO_2}^{АДУ}, Q_{p.m.}^{ПТУ}) \quad (22)$$

В наслідок розрахунків в якості найбільш ефективного робочого тіла ПТУ був обраний пентан. Це дозволило збільшити кількість виробленої електроенергії комплексом майже на 50%. При цьому ексергетичний ККД ЕТК склали: $\eta_e^{ЕТК-1} = 30\%$, $\eta_e^{ЕТК-2} = 28\%$. Незважаючи на можливість вироблення значної кількості енергії рішення про використання ПТУ в складі ЕТК має прийматися в наслідок техніко-економічних розрахунків.

Описані методики розрахунків основних характеристик ЗДВ, АДУ, складів продуктів згорання ПГ, розподілу потоку ПГ між КУ і генератором ДГСС, виробленої електричної потужності в КУ, кількості утилізованих сторонніх ДГ, використані для створення програмного комплексу для розрахунку характеристик ЕТК. Високі показники ЕТК підтверджуються відповідними розрахунками (табл. 2). З метою економії основних капітальних витрат на будівництво ЕТК розрахунок проводився з урахуванням його схеми, зображеної на рис. 1. У даному комплексі крім вироблених продуктів ($LTLCO_2$, GN_2 та $W_{ес}^{ЕТК}$) корисно використовується теплота системи охолодження КУ $Q_{ГВ}^{КУ}$ для потреб опалення.

З табл. 2 видно, що ексергетичний ККД ЕТК складають $\eta_e^{ЕТК-1} = 21\%$ та $\eta_e^{ЕТК-2} = 17\%$, відповідно, в залежності від режиму роботи. Ексергетичний ж ККД ТУ $\eta_e^{ТУ} = 0,7\%$. В результаті вирішення поставлених завдань розроблені ЕТК, які орієнтовані на споживання ПГ $G_{ПГ}^{ЕТК}$ від 100

до 550 м³/год., виробництво $LTLCO_2$ від 200 до 1500 кг/год., газоподібного азоту $G_{N_2}^{ETK}$ від 800 до 6000 м³/год., видачу зовнішньому споживачу електричної потужності $W_{эл}^{ETK}$ від 25 до 500 кВт.

Третій розділ присвячений оцінці екологічної та техніко-економічної ефективності створення ЕТК. Екологічна ефективність ЕТК визначалася на основі TEWI-аналізу традиційних (ТУ) і розроблених комплексів ЕТК-1 та ЕТК-2, що виробляють одночасно електричну енергію і тепло, діоксид вуглецю і азот (табл. 3). Для цього пропонується використовувати модифікований вираз TEWI-критерію в наступному вигляді:

$$TEWI = GWP_{CO_2} \cdot \left[G_{CO_2}^{ALV} - G_{CO_2}^{DL} \right] - \alpha_{CO_2} \cdot LCO_2 - \beta \cdot \left(\sum_{i=1}^n W_{ел,i} - \sum_{j=1}^m W_{ел,j} \right) - \gamma \cdot \left(\sum_{i=1}^n Q_i - \sum_{j=1}^m Q_j \right) \cdot \tau. \quad (23)$$

З табл. 3 видно, що при експлуатації ТУ основний внесок в глобальне потепління вносять продукти згорання ПГ (86,5%), з яких витягують основний продукт - CO₂. Непрямий внесок емісії CO₂, пов'язаний зі споживанням електроенергії, складас 13,5%. При експлуатації ТУ річна емісія CO₂ в навколишнє середовище складе 1954 т.

При роботі ЕТК, котрі ефективно використовують ексгергію ПГ в КУ для вироблення електроенергії і теплоти, а також переробки сторонніх ДГ, емісія CO₂ в навколишнє середовище буде знижена на 43% для ЕТК-1 і на 70% для ЕТК-2 в порівнянні з ТУ. В наслідок річна емісія CO₂ в навколишнє середовище при роботі комплексу в режимі ЕТК-1 складе 1110 т, а при роботі комплексу в режимі ЕТК-2, що характеризується переробкою сторонніх ДГ, 586 т.

На основі проведеного TEWI-аналізу можна зробити висновок, що найбільш ефективним комплексом з точки зору екологічної ефективності є енерготехнологічний комплекс ЕТК-2. За інших однакових умов він володіє найменшою емісією CO₂ в навколишнє середовище, яке становить 586 т CO₂/рік. Економічна ефективність створення ЕТК визначалася на основі техніко-економічного розрахунку (табл. 4).

З табл. 4 видно, що собівартість виробництва рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю буде становити від 30 до 45% ринкової вартості CO₂ в залежності від режиму роботи ЕТК, а собівартість виробництва електроенергії 0,3 грн./кВт·год., що майже

Таблиця 2
Основні розрахункові показники ЕТК

Позначення	Од.вим.	ТУ	ЕТК-1	ЕТК-2
$LTLCO_2$	кг/год.	109,82	200	314
$V_{N_2}^{ALV}$	м ³ /год.	-	803	1233
$Q_{ГВ}^{KV}$	кВт	-	163,6	163,6
$G_{ПГ}^{ETK}$	кг/год.	76,80	76,80	76,80
$V_{ПГ}^{DLCC}$	%	72,0	25,1	39,4
$V_{ПГ}^{KV}$	%	28,0	74,9	60,6
α^{KV}	-	-	1,36	1,65
$Q_{кин}^{ALV}$	кВт	754,4	263,2	391,1
$W_{ел}^{KV}$	кВт	-	247,8	247,8
$N_{ел}^{ETK}$	кВт	47,20	144,22	214,0
$W_{ел}^{ETK}$	кВт	-	103,6	33,8
η_e	%	0,7	21	17

Таблиця 3

Результати розрахунку емісії CO₂

Складові TEWI, т CO ₂ /рік	ТУ	ЕТК-1	ЕТК-2
$GWP_{CO_2} \cdot (G_{CO_2}^{ALV} - G_{CO_2}^{DL}) \cdot \tau$	1690	1690	724
$GWP_{CO_2} \cdot \beta \cdot \left(\sum_{i=1}^n W_{ел,i} - \sum_{j=1}^m W_{ел,j} \right) \cdot \tau$	264	580	138
TEWI	1954	1110	586

Таблиця 4

Результати розрахунків техніко-економічної ефективності створення ЕТК

Основні показники економічної ефективності	Од.вим.	ЕТК-1	ЕТК-2
Собівартість виробництва 1 т $LTLCO_2$	грн./т	1364	868
Собівартість виробництва 1 т GN_2	грн./т	224	143
Собівартість виробництва 1 кВт·год. $W_{эл}^{KV}$	грн./кВт·год.	0,30	0,30
Строк окупності ЕТК	рік	4,35	2,45

в 3 рази нижче вартості електроенергії, що відпускається підприємствам. Термін окупності ЕТК складе від 2,5 до 4,5 років залежно від режиму роботи комплексу. З аналізу отриманих даних можна зробити висновок, що найбільш вигідно створювати ЕТК-2, який орієнтований на переробку сторонніх димових газів. В цьому випадку комплекс буде виробляти 314 кг/год. рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю, 1200 м³/год. газоподібного технологічного азоту, стиснутого до тиску 0,8 МПа, та 30 кВт електричної енергії, яка видається зовнішньому споживачеві. Термін окупності ЕТК не перевищує 2,5 року, при цьому щорічний прибуток складе 4 116 754 грн., що свідчить про високий ступінь повернення грошових коштів.

Практичне значення результатів роботи полягає в тому, що розроблена схема і створена методика розрахунку основних характеристик ЕТК може застосовуватися для забезпечення автономної роботи інших виробництв. Наприклад, включення до складу ЕТК-1 повітрозподільної установки дає можливість поряд з виробництвом рідкого низькотемпературного CO₂ виробляти рідкий O₂. За попередніми розрахунками термін окупності такого комплексу, який виробляє автономно і одночасно 520 кг/год. рідкого O₂ та 1000 кг/год. рідкого низькотемпературного CO₂, складе 3,5 року, при цьому щорічний прибуток - 30 млн. грн. У таких комплексах особливо зацікавлені виробники технічних газів. Крім цього, ЕТК можуть інтегруватися в існуючі виробництва рідкого низькотемпературного CO₂ з метою зниження собівартості виробленого продукту і підвищення ефективності роботи підприємства в цілому.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне обґрунтування і вирішення наукової задачі, що складається в розробці схем, методик оптимізації та розрахунків ефективних енерготехнологічних комплексів, що використовують природний газ, для одночасного виробництва рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю, газоподібного азоту та електроенергії. На основі проведених досліджень таких комплексів можна зробити наступні висновки.

1. Необхідність отримання рідкого низькотемпературного CO₂ і N₂ обумовлює структуру енерготехнологічних комплексів, що включає когенераційну установку, абсорбційно-десорбційну установку та зріджувач діоксиду вуглецю. Взаємозв'язок установок і працездатність всього комплексу забезпечується розробленими умовами стикування та відповідними методиками розрахунків їх основних характеристик.

2. Стиковка когенераційної установки з абсорбційно-десорбційною установкою в комплексі повинна здійснюватися за допомогою генератора димових газів стехіометричного складу, який також виконує функції кип'ятильника розчину. У зв'язку з цим природний газ, споживаний комплексом

сом, ділиться на дві частини. Одна частина подається в когенераційну установку для вироблення електроенергії і теплоти, інша - в генератор димових газів стехіометричного складу. Внаслідок розрахунків визначено діапазон розподілу потоку природного газу між когенераційною установкою (від 55,5 до 62,5%) і генератором димових газів стехіометричного складу (від 37,5 до 44,5%).

3. Виробництво рідкого низькотемпературного CO₂ в зріджувачі діоксиду вуглецю, який працює по циклу високого тиску з його переохолодженням перед дроселюванням, характеризується високою термодинамічною ефективністю. Визначена на основі розробленої методики умова максимуму коефіцієнта зрідження дозволяє збільшити продуктивність і, відповідно, знизити питомі енерговитрати установок на 38% с (0,365 до 0,226 кВт-год/кг CO₂) в порівнянні з існуючими зріджувачами.

4. Ефективність роботи абсорбційно-десорбційної установки залежить від кількості теплоти, що витрачається на процес регенерації циркулюючого розчину абсорбенту. В установках традиційного типу, що працюють на водному розчині МЕА, витрати теплоти досягають 12900 кДж/кг CO₂. Для її зниження була поставлена та вирішена задача визначення оптимального складу амінового розчину абсорбентів, що складається з МЕА та МДЕА. У результаті знайдений оптимальний склад (10% МЕА та 40% МДЕА, інше - вода), що відповідає мінімальному питомому споживанню теплоти на процес регенерації розчину (4500 кДж/кг CO₂).

5. Кількість виробленої електричної енергії та теплоти в когенераційній установці достатньо для забезпечення не тільки автономної роботи комплексу, а ще і для переробки сторонніх димових газів. При роботі комплексу в такому режимі продуктивність по рідкому низькотемпературному CO₂ і газоподібному N₂ може зрости в 1,5 рази. Це дозволяє позитивно відповісти на поставлене проф. В.С. Мартиновським питання, яке полягає у створенні комплексу, спроможному утилізувати як власні викиди, так і переробляти сторонні димові гази.

6. Розробленим комплексам властива наявність декількох потоків надлишкової теплоти. Використання цієї теплоти в паротурбінній установці, що працює на пентані, в разі включення її до складу комплексу, дозволить збільшити вироблену електричну потужність майже на 50%.

7. Енерготехнологічні комплекси характеризуються високими значеннями термодинамічної ($\eta_e^{ETK} = 21\%$) та екологічної ефективності. При цьому емісія CO₂ в навколишнє середовище знижується на 40...70% за рахунок вироблення власної електричної енергії та переробки сторонніх димових газів.

8. Розроблені схеми та методики розрахунку характеристик енерготехнологічних комплексів призначені для їх створення з метою автономного виробництва рідкого низькотемпературного CO₂ від 200 до 1500 кг/год., газоподібного N₂ від 800 до 6000 м³/ч. При цьому ними буде споживатися від 100 до 550 м³/год. природного газу, а стороннім споживачам видаватися від 25 до 500 кВт електроенергії.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Копитін О.В. Эффективность производства газообразного диоксида углерода и азота из дымовых газов с использованием процессов абсорбции-десорбции / Лавренченко Г.К., Копытин А.В. // Технические газы. – 2004. - № 3. – С. 8 – 17.

Особистий внесок: виконано термодинамічний аналіз і дана оцінка ефективності виробництва діоксиду вуглецю та азоту з димових газів.

2. Копитін О.В. Снижение энергопотребления при производстве жидкого низкотемпературного диоксида углерода из дымовых газов на основе компрессора высокого давления / Лавренченко Г.К., Копытин А.В. // Холодильная техника и технология. – 2004. - № 1(87). – С. 27 – 35.

Особистий внесок: розглянуто ефективні способи поліпшення робочих характеристик АДУ і ЗДВ. Створена методика розрахунку ЗДВ з компресором багатоступінчастого стиснення.

3. Копитін О.В. Снижение энергопотребления при производстве жидкого низкотемпературного диоксида углерода из дымовых газов на основе компрессора среднего давления / Лавренченко Г.К., Копытин А.В. // Холодильная техника и технология. – 2004. - № 3(89). – С. 5 – 10.

Особистий внесок: створена методика розрахунку ЗДВ, які працюють за ЦСТ.

4. Копитін О.В. Повышение эффективности комплексов для производства жидкого диоксида углерода и газообразного азота из дымовых газов / Лавренченко Г.К., Копытин А.В. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. - № 5. – С. 19-22.

Особистий внесок: на основі експертного аналізу існуючих комплексів розроблені та обґрунтовані пропозиції щодо підвищення їх ефективності з метою одночасного виробництва рідкого діоксиду вуглецю і газоподібного азоту.

5. Копитін О.В. Энерготехнологические комплексы на природном газе с когенерационной и паротурбинной установками для производства электрической энергии, жидкого диоксида углерода и газообразного азота/Лавренченко Г.К., Копытин А.В.//Технические газы. – 2005. - № 2. – С. 11 – 21.

Особистий внесок: знайдені способи ефективного включення КУ і ПТУ до складу енерготехнологічного комплексу. Розроблено методики розрахунків їх основних характеристик.

6. Копитін О.В. Эффективные многоцелевые энерготехнологические комплексы на природном газе для одновременного производства электрической и тепловой энергии, жидкого диоксида углерода и азота / Лавренченко Г.К., Копытин А.В. // Технические газы. – 2004. - № 4. – С. 11 – 17.

Особистий внесок: розроблено та запропоновано декілька варіантів схем автономної ефективно діючих енерготехнологічних комплексів.

7. Копитін О.В. Оптимизация состава абсорбента вода-амины узла извлечения CO₂ из дымовых газов / Лавренченко Г.К., Копытин А.В., Пятничко А.И., Иванов Ю.В. // Технические газы. – 2011. — № 1. — С. 31-40.

Особистий внесок: досліджено вплив складу абсорбенту на характеристики процесу десорбції CO₂. Знайдений оптимальний склад абсорбенту, відповідний мінімальним затратам теплоти на процес регенерації розчину.

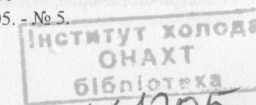
8. Копитін О.В. Энергоэкологические проблемы производства и использования диоксида углерода / Лавренченко Г.К., Копытин А.В. // Технические газы. – 2005. - № 4. – С. 2 – 14.

Особистий внесок: проаналізована екологічна ефективність виробництва CO₂. Розроблена та запропонована форма модифікованого ТЕWI -критерію стосовно ЕТК.

9. Копитін О.В. Декларационный патент Украины № 7356 «Способ одержання рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю і газоподібного азоту» / Лавренченко Г.К., Копитін О.В.// Бюл. - 2005. - №6.

Особистий внесок: розроблено спосіб отримання рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю і газоподібного азоту в енерготехнологічному комплексі.

10. Копитін О.В. Декларационный патент Украины № 6836 «Комплекс для виробництва електроенергії, теплоти, а також чистих рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю й газоподібного азоту» / Лавренченко Г.К., Копитін О.В. // Бюл. — 2005. - № 5.



Особистий внесок: розроблено схему та визначено характеристики комплексу з виробництва електроенергії, теплоти, рідкого низькотемпературного CO₂ і газоподібного N₂.

11. Копитін О.В. Патент України № 48408 «Комплекс для автономного виробництва рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю, газоподібного азоту та рідких кисню або азоту» / Лавренченко Г.К., Копитін О.В., Целовальник А.А., Гурін В.П. // Бюл. - 2010. - № 5.

Особистий внесок: розроблено схему автономного енерготехнологічного комплексу з виробництва електроенергії, теплоти, рідкого низькотемпературного CO₂, рідкого O₂ та N₂.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АДУ - абсорбційно-десорбційна установка; БО - блок осушення; ДГ - димовий газ; ДГСС - димовий газ стехіометричного складу; КА - котельний агрегат; КМ - компресорна машина; КУ - когенераційна установка; МДЕА - метилдіетаноламін; МЕА - моноетаноламін; ЗДВ - зріджувач діоксиду вуглецю; ПГ - природний газ; ПТУ - паротурбінна установка; ТУ - традиційна установка; ХМ - холодильна машина; ЦВТ - цикл високого тиску; ЦСТ - цикл середнього тиску; ЕТК - енерготехнологічний комплекс; *LTLCO₂* - рідкий низькотемпературний CO₂.

АНОТАЦІЯ

Копитін О.В. Ефективні комплекси, використовуючи природний газ, для виробництва діоксиду вуглецю, азоту та електроенергії. - Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 - «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування». - Одеська державна академія холоду МОНМС України, Одеса, 2012р.

Дисертаційна робота присвячена розробці схем та методик розрахунку ефективних енерготехнологічних комплексів, які споживають природний газ від 100 до 550 м³/год., для автономного виробництва рідкого низькотемпературного діоксиду вуглецю від 200 до 1500 кг/год., газоподібного азоту від 800 до 6000 м³/год. та електроенергії від 25 до 500 кВт, що видається зовнішньому споживачеві. У дисертації проаналізовані та виявлені основні джерела втрат від необоротності в існуючих вуглекислотних комплексах, які знижують ексергетичний ККД до 0,7%. Розроблено методику визначення умов, отримання максимуму коефіцієнта зрідження CO₂ в зріджувальній установці, яка працює по циклу високого тиску. Поставлена та вирішена задача знаходження оптимального складу циркулюючого амінового розчину в абсорбційно-десорбційної установці, що містить 10% МЕА та 40% МДЕА, якій відповідає мінімальному споживанню теплоти на регенерацію розчину 4500 кДж/кг CO₂. Розроблено методику розрахунку коефіцієнта надлишку повітря та кількості природного газу, що подається в когенераційну установку, для знаходження її робочих характеристик. Знайдено та обґрунтовано способи ефективного включення когенераційної установки до складу енерготехнологічного комплексу та організації процесу горіння природного газу в середовищі кисню димових газів. Досліджено можливість ефективного використання надлишку теплоти у паротурбінної установки, що працює на неводних парах, з метою виробництва додаткової кількості електричної енергії, яка дозволить збільшити вироблену електричну потужність майже на

50%. Визначено характеристики енерготехнологічного комплексу у режимі переробки додаткових сторонніх димових газів. При цьому продуктивність по рідкому низькотемпературному CO₂ і газоподібному N₂ може збільшитися в 1,5 рази. Створено методики розрахунку основних характеристик окремих установок, які входять до складу комплексу і всього комплексу в цілому. Визначені енергетичні характеристики та потужність комплексів, що підтверджують здатність комплексу працювати автономно з високою термодинамічною ефективністю ($\eta_e = 21\%$). Підтверджені на основі розрахунку *TEWI* вищі екологічні показники комплексів, у яких зниження емісії CO₂ в навколишнє середовище становить 40 ... 70% за рахунок вироблення власної електричної енергії та переробки сторонніх димових газів.

Ключові слова: енерготехнологічний комплекс, природний газ, діоксид вуглецю, азот, електроенергія, ексергетичний ККД, екологічна ефективність.

АННОТАЦІЯ

Копытин А.В. Эффективные комплексы, использующие природный газ, для производства диоксида углерода, азота и электроэнергии. – Рукопись. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 - «Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования». – Одесская государственная академия холода МОНМС Украины, Одесса, 2012г.

Диссертационная работа посвящена разработке схем и методик расчёта эффективных энерготехнологических комплексов, потребляющих природный газ от 100 до 550 м³/ч, для автономного производства жидкого низкотемпературного диоксида углерода от 200 до 1500 кг/ч, газообразного азота от 800 до 6000 м³/ч и электроэнергии от 25 до 500 кВт, выдаваемой внешнему потребителю. В диссертации проанализированы и выявлены основные источники потерь от необратимости в существующих углекислотных комплексах, которые снижают эксергетический КПД до 0,7%. Разработана методика определения условий, соответствующих максимуму коэффициента оживления CO₂ в оживителе диоксида углерода, работающего по циклу высокого давления. Поставлена и решена задача определения оптимального состава циркулирующего аминного раствора в абсорбционно-десорбционной установке, содержащего 10% МЭА и 40% МДЭА, который отвечает минимальному удельному потреблению теплоты на регенерацию раствора 4500 кДж/кг CO₂. Разработана методика расчёта коэффициента избытка воздуха и количества природного газа, подаваемого в когенерационную установку, для нахождения её рабочих характеристик. Найден и обоснован способ эффективного включения когенерационной установки в состав энерготехнологического комплекса и организации процесса горения природного газа в среде кислорода димовых газов. Исследована возможность эффективного использования избытка теплоты в паротурбинной установке, работающей на неводных парах, с целью производства дополнительного количества электрической энергии, которая позволит увеличить производимую электрическую мощность почти на 50%. Определены характеристики энерготехнологического комплекса в режиме переработки дополнительных сторонних димовых газов. При этом производительность по жидкому низкотемпературному CO₂ и газообразному N₂ может увеличиться в 1,5 раза. Созданы методики расчёта основных характеристик отдельных установок, входящих в состав комплекса и всего комплекса в целом. Определены энергетические

характеристики и производительность ЭТК, подтверждающие способность комплекса работать автономно с высокой термодинамической эффективностью ($\eta_e = 21\%$). Подтверждены на основе расчёта *TEWI* более высокие экологические показатели комплексов, в которых снижение эмиссии CO_2 в окружающую среду составляет 40...70% за счёт выработки собственной электрической энергии и переработки сторонних дымовых газов.

Ключевые слова: энерготехнологический комплекс, природный газ, диоксид углерода, азот, электроэнергия, эксергетический КПД, экологическая эффективность.

ABSTRACT

Копытин А.В. Effective complexes are using natural gas for the production of carbon dioxide, nitrogen and electrical energy. - Manuscript. Thesis for a candidate's degree of technical science on a specialty 05.05.14 - "Refrigeration, vacuum and compressor technique, conditioning system." – Odessa State Academy of Refrigeration, Odessa, 2012.

This thesis is devoted to the schemes and techniques development for calculating the effective energotechnological complexes that consume natural gas from 100 to 550 Nm^3/h , for the autonomous production of low-temperature liquid carbon dioxide from 200 to 1500 kg/h of gaseous nitrogen from 800 to 6000 Nm^3/h of electric power from 25 to 500 kW, given out by the external customer. The main sources of irreversibility losses in the existing carbon dioxide complexes, which reduce the exergy efficiency up to 0.7% were analyzed and identified in the thesis. A method of determining the conditions, corresponding to the maximum coefficient of liquefaction CO_2 in the carbon dioxide liquefier, working on a cycle of high pressure. The optimal composition determination problem of the circulating amine solution in the absorption-desorption unit containing 10% of MEA and 40% of MDEA, which corresponds to the minimum specific heat consumption for the regeneration of 4500 kJ/kg solution CO_2 is posed and solved. A method of calculating the coefficient of excess air and the amount of natural gas supplied to the cogeneration unit, to find its characteristics is developed. There are found and proved how effective inclusion of the cogeneration unite in energotechnological complexes and the burning process of natural gas organization in oxygen flue gases. The effective use possibility of excess heat into steam-turbine unit working on anaquatic pairs, to produce additional quantities of electrical energy, which will allow to increase the electrical energy produced by nearly 50%, was investigated. The characteristics of the energotechnological complexes in the mode of processing additional external flue are considered. In this low-temperature performance of liquid CO_2 and gaseous N_2 may increase by 1.5 times. Procedures for calculating the main characteristics of individual units that make up the complex and the entire complex as a whole are created. The energy characteristics and performance of the energotechnological complexes are determined to work autonomously with a high thermodynamic efficiency ($\eta_e = 21\%$). The higher environmental performance of the complex in which the reduction of CO_2 emissions into the environment is 40...70% by production its own electric energy and processing of external flue were confirmed by calculating *TEWI*.

Keywords: energotechnological complex, natural gas, carbon dioxide, nitrogen, electrical energy, exergy efficiency, environmental effectiveness.