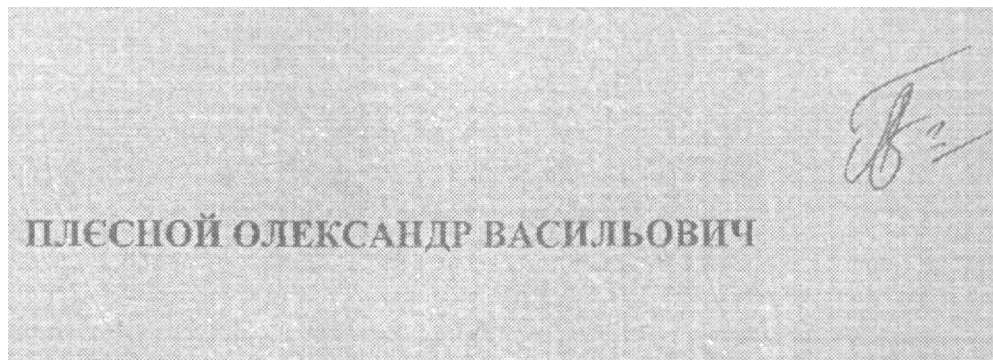


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ



УДК 621.593

**РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНИХ
ДЕТАНДЕР-КОМЯРЕСОРНИХ АГРЕГАТІВ
КРІОГЕННИХ ПОВІТРЯРОЗДІЛЮВАЛЬШІХ УСТАНОВОК
СЕРЕДНЬОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ**

Спеціальність

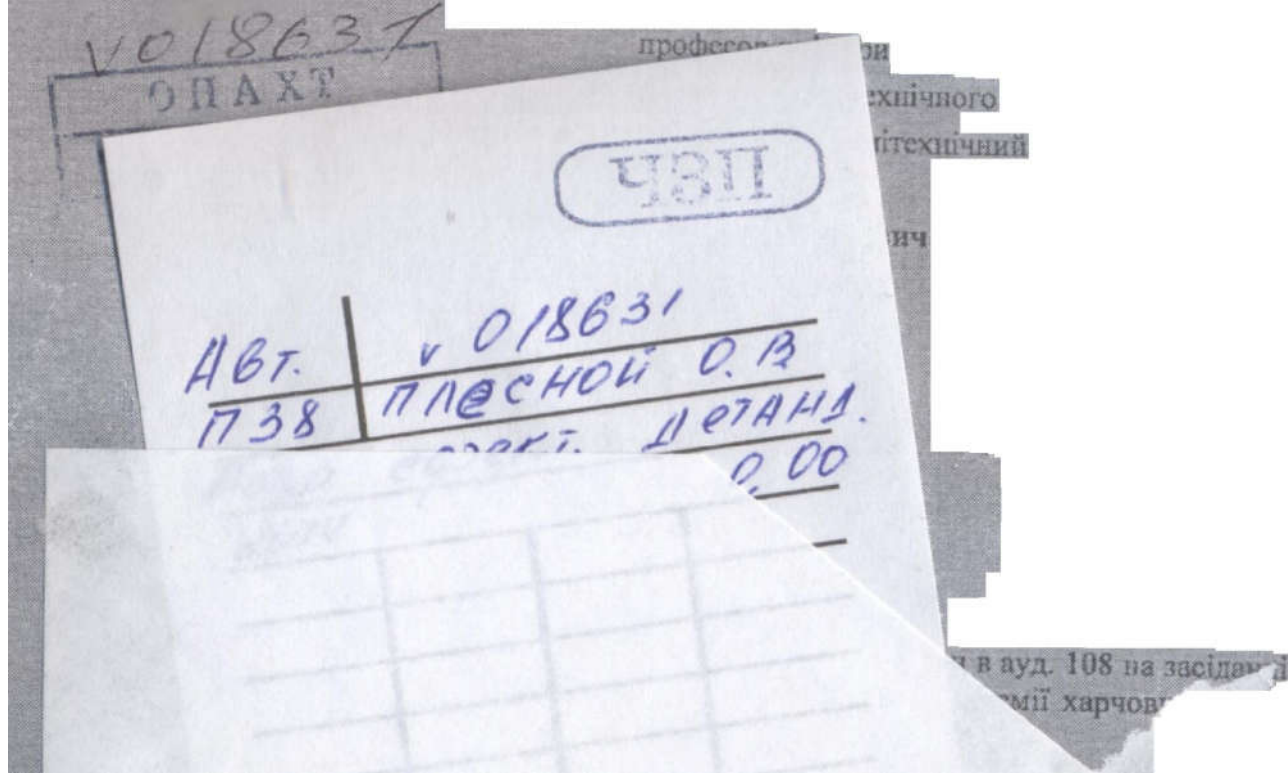
, 05.05.14 - «Холодильна, «вкуумпа та компресорна техніка, системи кондиціонування»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Orgca -

21!
T



Дисертація
рукопис
ОМ

* Щ

Робота виконана в Одеській Національній академії харчових технологій МОН України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор кафедри
криогенної техніки Одеської національної
академії харчових технологій МОН України
Гсвргій Костянтинович Лавренченко

Офіційні опоненти:

ОНАХТ **Автореф**
Розробка ефективних

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою
кондиціонування і рефрижераторії Національного
університету кораблебудування імені адмірала
Макарова МОН України
Микола Іванович Радченко

УО18631

111 «И

и щ і ш і ш ж \$: * і > р 1/1 щ &.:т
" /; # ■ ** >/

■ :

спеціа-
льдогій м

щеми харчових

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Повітрярозділювальні установки (ПРУ) середньої продуктивності для отримання зріджених і газоподібних продуктів розділення повітря (кисню і азоту) є найбільш масові та добре затребувані системи, що випускаються галуззю кисневого і кріогенного машинобудування. Необхідність розроблення нового покоління ПРУ середньої тоннажності ставить задачу пошуку резервів для подальшого поліпшення їх енергетичних показників. Один з них це ефективне використання енергії розширення повітря в турбодетандері для приводу дотискаючого повітряного турбокомпресора, об'єднаних в один детандер- компресорний агрегат (ДКА). Такі ДКА одновальної конструкції з успіхом використовуються в сучасних великотоннажних ПРУ низького тиску. Однак просте запозичення наявних теоретичних співвідношень і конструкторських розробок недостатньо для створення ДКА середньотоннажних ПРУ, так як детандерним і компресорним ступеням їх агрегатів притаманний ряд характерних особливостей. Так, вони є маловитратними і високооборотними. Це може викликати звукові і надзвукові течії в компресорних ступенях ДКА, що істотно знижує їх ефективність і, в цілому, ККД агрегату.

Аналіз показує, що незважаючи на наявність окремих методик розрахунку доцентрових турбодетандерів і відцентрових турбокомпресорів, користуватися ними безпосередньо неможливо, так як при створенні ДКА слід проводити розрахунки і оптимізацію по суті двох різних машин, об'єднаних в один загальний агрегат. Наприклад, при розрахунках компресорної ступені (КС), механічно пов'язаної з детандерним ступенем (ДС), необхідно розв'язувати складні зворотні задачі. Крім цього, методика повинна дозволяти вести розробку ДКА в тісному взаємозв'язку з проєктованою ПРУ, в якій він буде використовуватися. Необхідно також вести пошук нових схемних і конструкторських рішень, які були б більш прийнятні для компоновання ефективних ДКА, що входять в ПРУ середньої продуктивності.

Все це дозволяє визнати актуальною науковою задачею розробку ефективних ДКА в тісному взаємозв'язку з удосконаленням різних ПРУ середньої продуктивності. Використання отриманих результатів значно скоротить витрати на проєктування. ДКА, істотно розширить сферу їх застосування і дозволить створити ряд нових економічних середьотонажних ПРУ.

При виконанні досліджень по темі дисертації автор опирався на роботи в області турбомашин радіального типу М.М. Бухаріна, Ю.Б. Гальоркіна, О.Б. Давидова, В.І. Єпіфанової, О.Ш. Кобулашвілі, В.М. Кулакова, К.П. Селезньова, К.І. Страховіча, Ф.М. Чистякова, О.М. Шерспока та ін. Крім цього, використовувалися результати робіт по вдосконаленню ПРУ, виконаних О.М. Архаровим, Л.О. Акуловим, В.П. Беляковим, Є.І. Борзенко, В.М. Бродянским, С.С. Будневичем, Г.О. Головка, І.В. Горенштейном, Г.Б. Нарінським, Ю.Г. Писарєвим, С.М. Пуртовим та ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася з урахуванням наступних законодавчих актів: «Основні положення енергетичної стратегії України на період до 2030 р.», затверджені Кабінетом Міністрів України 15.03.06.; Закон України «Про енергозбереження», затверджений постановою Верховної Ради України №74/94 від 01.07.94.

Мета і завдання дослідження - постановка і вирішення завдань режимної і конструктивної оптимізації дво- і трьохвальних ДКА в тісному зв'язку з удосконаленням кріогенних ПРУ середньої продуктивності.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні завдання: - провести порівняльний аналіз можливих способів використання роботи розширення повітря в турбо- детандерах ПРУ для вибору найбільш ефективного методу включення ДКА в технологічні схеми зріджувачів повітря, що реалізують термодинамічні цикли середнього та низького тисків; - обґрунтувати необхідність розробки методики розрахунку ДКА як єдиного комплексу, що об'єднує детандерні і компресорні ступені, які входять

до його складу; - створити математичні моделі ДКА, що включають балансові рівняння, які пов'язують основні розрахункові характеристики детандерної і компресорної ступенів; - встановити взаємозв'язок між режимними і конструктивними параметрами детандерних і компресорних ступеней ДКА; - створити нові схеми компоновки ступенів двох- і багатовальних агрегатів, в яких компресорний і детандерний ступені будуть експлуатуватися з оптимальними частотами обертання; - поставити і вирішити задачу режимної і конструктивної оптимізації двох- і трьохвальних ДКА з одночасним знаходженням параметрів ПРУ, що відповідають мінімуму витрат енергії на одиницю маси зріджуємого продукту або обсягу умовного газу; - розробити процедури оптимізаційних розрахунків двох- і багатовальних ДКА з урахуванням схем їх компонування і способів включення до складу ПРУ; - розробити методику оцінювання ККД ДКА в складі багатопродуктової ПРУ при її роботі в нерозрахункових режимах; - виробити рекомендації по основним елементам проточних частин детандерних і компресорних ступенів з урахуванням їх роботи в складі ДКА; - створити середньотоннажну ПРУ з трьохвальним ДКА на основі тільки машин динамічного принципу дії.

Об'єктом дослідження є двох- і багатобальні ДКА кріогенних ПРУ середньої продуктивності.

Предмет дослідження - процеси одно- і двоступеневого розширення повітря з одночасним виробництвом холоду і роботи в детандерних ступенях ДКА, а також процеси дожимання повітря в компресорних ступенях агрегатів за рахунок роботи розширення повітря в детандерних ступенях.

Рішення сформульованих завдань виконувалося з використанням таких методів дослідження як: теоретичний опис реальних процесів розширення і стиснення, що протікають в детандерних та компресорних ступенях ДКА; математичне моделювання роботи ДКА з метою визначення його оптимальних конструктивних і режимних характеристик.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Обґрунтовано і підтверджено виконаними оптимізаційними розрахунками новий спосіб включення трьохвального ДКА в структуру ПРУ, який дозволяє використовувати роботу розширення повітря в двох детандерних ступенях агрегату для збільшення холодопродуктивності установки при тих самих витратах перероблюємого повітря, що відкриває можливість створення економічних рідинних кріогенних установок.

2. Вироблений підхід до спільної розробки детандерної (их) та компресорної ступеней двох- і багатовальних ДКА, заснований на обліку взаємного впливу їх параметрів один на одного, а також на показники повітрярозділювальних установок.

3. Вперше встановлені зв'язки між приведеними діаметрами робочих коліс детандерної (их) та компресорної ступеней двох- і трьохвальних ДКА на основі балансів потужностей ступеней та частот обертання їх валів в турборедукторах, що дає можливість спрощення розрахунків конструктивних параметрів агрегатів за рахунок зменшення числа змінних.

4. Показано, що для визначення основних режимних характеристик ДКА при роботі на нерозрахунковому режимі необхідно розв'язувати задачу його розрахунку, виходячи з оптимальних значень конструктивних параметрів агрегату, знайдених раніше з урахуванням умов основного розрахункового режиму роботи.

За результатами проведених досліджень сформульовано два наукових положення:

1. Оптимізацію ПРУ з використанням в її технологічній схемі ДКА можна звести до вирішення двох взаємопов'язаних завдань: до знаходження режимних і конструктивних показників агрегату, які відповідають максимуму його ККД, та визначення температури, частки повітря, яка подається на ДКА та інших режимних параметрів, що відповідають мінімуму питомого енергоспоживання ПРУ при виробництві продуктів розділення повітря в рідинному або газорідинному режимах. Така методика значно спрощує розробку ефективних дво- і багатобальних ДКА, а запропоновані оптимізаційні процедури дозволяють одночасно з цим удосконалювати ПРУ, до складу яких входять вказані агрегат.

2. Для ефективного використання енергії розширення повітря в середьотоннажних криогенних рідинних ПРУ слід застосовувати багатовальні детандер-компресорні агрегати з двоступеневим розширенням повітря та дожиманням його в компресорному ступені перед подачею в детандерну ступень низького тиску. Застосування у складі таких ПРУ двоступеневого розширення та дожимання повітря перед детандерним ступенем низького тиску створює принципові можливості для розробки економічних зріджуючих установок середньої продуктивності, які працюють за циклами середнього тиску з ефективними ДКА.

Крім цього, автор захищає результати режимної та конструктивної оптимізації декількох типів ДКА дво- і трьохвальних конструкцій.

Обґрунтованість і достовірність результатів дослідження підтверджується коректною постановкою наукових завдань, а також комплексним підходом до режимної та конструктивної оптимізації дво- і багатовальних детандер-компресорних агрегатів і повітряроз-ділювальних установок середньої продуктивності.

, Практичне значення отриманих результатів.

1. Створені методики розрахунку та оптимізації ДКА, які знаходяться в тісному зв'язку з удосконаленням ПРУ, дозволяють розробляти на їх основі ефективні агрегати для установок середньої продуктивності нового покоління.

2. Застосування отриманих співвідношень між приведеними діаметрами сприятиме спрощенню процесів оптимізації та проектування ДКА.

3. Підсумки розробки ефективних ПРУ та ДКА, призначених для роботи в їх складі, можуть використовуватися при створенні наступних економічних повітрярозділювальних установок нового покоління: - Кж-0,5 для виробництва 500 і більше кг/год зрідженого технічного кисню; - Кж-1 для вироблення 1000 і більше кг/год зрідженого технічного кисню; - КжАжКдАд-1 з відцентровими та доцентровими машинами динамічного принципу дії для роботи в рідинних та газорідинних режимах.

Особистий внесок здобувана полягає в розробці методик і рекомендацій щодо розрахунку та оптимізації малорозмірних ДКА криогенних ПРУ; виконання розрахунків різних ДКА для ПРУ середньої продуктивності, що базуються на термодинамічних циклах середнього тиску, з метою підтвердження надійності та достатньої точності створених методик розрахунку.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на наступних регіональних і міжнародних конференціях: Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Стан, досягнення та перспективи холодильної техніки і технології», 19 квітня, ОДАХ, Одеса, 2011р.; IX міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», 12 вересня, ОНАХТ, Оде-

са, 2013р.; XIV міжнародний семінар з актуальної проблеми «Підвищення ефективності і безпеки виробництв продуктів розділення повітря», 30 вересня - 4 жовтня, «УА-СІГМА», Одеса, 2013р.; Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології», г. Одеса, 22 квітня 2014 р.

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 5 статтях, опублікованих у наукових виданнях, які відповідають вимогам ДАК МОН України, а також входять до наукометричних баз elibrary.ru. Отримано шість патентів України на нові ефективні схеми криогенних повітрярозділювальних установок середнього тиску з детандер-компресорними агрегатами.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури, що складає 81 джерело і додатки. Зміст роботи викладено на 109 сторінках, які містять 10 таблиць та 39 малюнків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі відзначено актуальність наукової спрямованості дисертації, наведено зв'язок з державними програмами і темами, сформульовані мета і завдання дослідження. Приведено нові наукові результати, дані про апробацію результатів роботи, та відображено особистий внесок здобувача.

У першому розділі обґрунтовуються способи використання роботи розширення повітря в циклах криогенних і повітрярозділювальних установок середньої продуктивності. Розглядаються схемні і конструктивні питання реалізації пропонуємих способів.

Робота розширення повітря в детандер-компресорних агрегатах (ДКА) може використовуватися по-різному. Для обґрунтування найбільш ефективного з них наводяться результати порівняння показників двох способів включення ДКА в дросельно-детандерні цикли зріджувачів повітря середнього та низького тисків. Вибір зріджувача циклу, як базового, продиктовано тим, що в першу чергу проведені дослідження мають своєю метою створення економічних рідинних або газорідинних ПРУ. У першому способі весь потік повітря O після компресора дожимається в КС ДКА за рахунок роботи розширення в ДС тільки частини повітря O . У другому способі КС в ДКА використовується для дожимання деталіщного потоку повітря перед його розширенням в ДС. З балансів масових витрат випливає, що в першому способі $O_{дс} = Ш_{кг}$, а у другому - $O_{дс} = O_{у2}$, де $O_{дс}$, $O_{у2}$ - витрати повітря через ДС і КС агрегату; I_2 - частка детандерного потоку повітря від загальної подачі основним компресором. При Олсіет були розраховані коефіцієнти зрідження повітря $g_{ж}$, віднесені до витрати O . Було прийнято, що ККД ДКА $\eta_{гид} = \eta_{гид} = 0,75-0,80 = 0,60$, де $\eta_{гид}$ - адіабатний і ізентропійний ККД КС і ДС; тиск в кінці процесів розширення в ДС ДКА - 0,1 МПа; температури початку процесів розширення і частки детандерних потоків повітря в циклах середнього тиску 230 К, 0,70 (1-ий спосіб) і 0,73 (2-ий), а в циклах низького тиску -190 К, 0,72 (1-ий спосіб) і 0,77 (2-ий). Тиски прямих потоків прийняті 6,5 МПа (середній тиск) і 0,8 МПа (низький). Зріджувачам середнього та низького тисків з ДКА, в яких використовується 2-ий спосіб їх включення, властиві найбільші значення $\eta_{гид} = 0,258$ і $\eta_{гид} = 0,121$, відповідно, що на 16% і 23% більші в порівнянні з показниками базових схем.

ПРУ, призначені для виробництва зріджених продуктів розділення повітря. На відмінність від установок для отримання газоподібних O_2 та N_2 , повинні мати більш високу холодопродуктивність. В таких установках необхідно компенсувати не тільки втрати холоду від теплопришвидів і недорекупіритті, але і холод відведений з установки разом з зрідженим продуктом. Аналіз показав, що ефективність рідинної ПРУ середньої продуктивності можна підвищити при переход до циклу з двоступінча-

сшм розширенням повітря. У ньому розширення повітря з здійсненням зовнішньої роботи проводиться послідовно в двох детандерних ступенях високого ДС11 низького ДС2 тисків. Робота, вироблена в цих ступенях, використовується в компресорному ступені КС, пов'язаному механічно із ступенями розширення, для дотискання повітря перед подачею його в ступінь розширення низького тиску. Було визначено максимально можливі значення коефіцієнта зрідження $\varepsilon_{жс} = 0,298$ в циклі середнього тиску з ДКА. Порівняння цього показали, що його величина на 34,2% більше, ніж у базового циклу, і на 15,5% вище аналогічного показника у циклі середнього тиску з ДКА звичайної конструкції. В розрахунках циклів приймалося, що масові витрати повітря через компресорну, та дешндерну (або детандерні) ступінь (ступені) детандер-компресорних агрегатів є рівними.

Дрсліджєйша показали, що досить ефективні ДКА для ПРУ середньої продуктивності можна старіти на основі редукторних схем. ДКА матимуть двох- або трьохвальну конструкцію (див, рисунки 1 і 2). Це дозволить знижувати число обертів вала компресорної ступав до оптимального значення. При використанні турборедукторів в ДКА дещо знижується потужність, яка передається від детандерних ступенів до компресорного. Механічний ККД редуктора може бути розрахований як

$$\eta_{мех} = \frac{P_{компр}}{P_{детандер}} \quad (1)$$

де Пшдш » Лпірн ~ КПД і-ой пари підшипників і к-ой шестерні, відповідно.

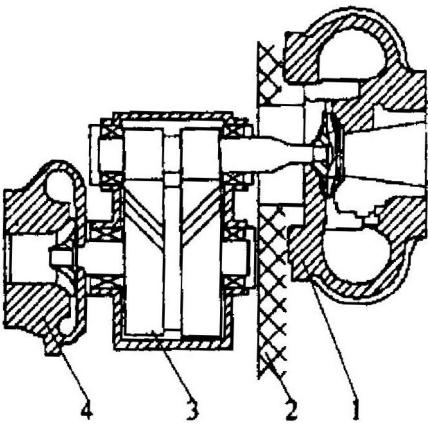


Рис.1. Редукторний двухвальний ДКА з розміщенням ДС в блоці розділення повітря: 1 - детандерна ступінь; 2 - теплоізоляція з перліту; 3 - турборедуктор; 4- компресорна ступінь

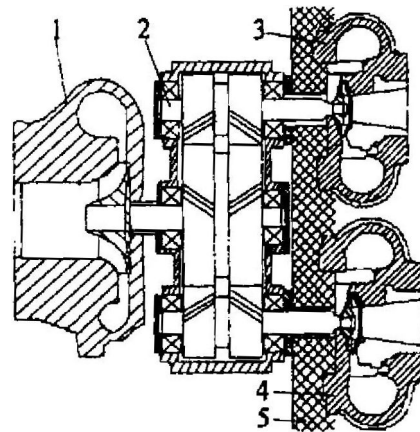


Рис.2. Редукторний трьохвальної ДКА з розміщенням ДС1 і ДС2 в блоці розділення повітря: 1- компресорна ступінь; 2 - турборедуктор; 3, 4 - детандерні ступені високого і низького тисків; відповідно; 5 - теплоізоляція з перліту Покажемо, як включення ДКА в схему ПРУ впливає на ріст її холодопродуктивності і, в підсумку, - на збільшення виробництва зрідженого кисню. Для цього визначимо вихід зрідженого кисню в ПРУ, спрощені схеми яких зображені нарис. 3.

З енергетичного балансу холодного контуру, позначеного пунктиром на рис. 3,а, впливає, що ПРУ з двухвальним ДКА виробляє

$$K_{жс} = \frac{1}{D_1' k_{жс}} [V_{ДГ} + V_{Д/}^{ад} + V_{ДД/}^{дідс} + V_{Д/Г} + V_{Д/}^{,км} - A(I, \Lambda, \Gamma, *) \sim \{2\tau\}] = \frac{1}{(V, / >_2, ДГ_9, Д_9)}, \quad (2)$$

де $A_{ig}=(/Hz)$ - ізотермічний дросель-ефект; $D_{i_{охол}}^i [(iз-й)^+(Д-^*Ц)]$ - зміна ентальпії при охолодженні прямого потоку в теплообміннику-зріджувачі і в БПП перед подачею повітря в ОТ; $D_{іхм}^{\wedge}Ои-Мб)$ - охолодження частки потоку повітря в НХМ; $D_{іГ)Дс}$ - питома холодопродук-

тивнісгь ДС двохвального ДКА; $t_{\text{дс}}$ - ізоентропійний ККД ДС; D/y - ізоентропійний дросель- ефект, обумовлений підвищенням тиску частини повітря ВЛ в КС агрегату з подальшим охолодженням в кінцевому холодильнику до температури навколишнього середовища $T_{\text{от}}$; $A(i, \Delta - i\text{£})$ - втрата від недорекуперації потоку відкиданого азоту на теплому кінці основно

го теплообмінника; 0^{\wedge} ~ загальний теплоприплив до холодної частини ПРУ; $D/x^{*} - (i^{\text{к}} - i^{\text{£}})$ - питома холодопродуктивність, необхідна для зрідження кисню в Ізобарному процесі.

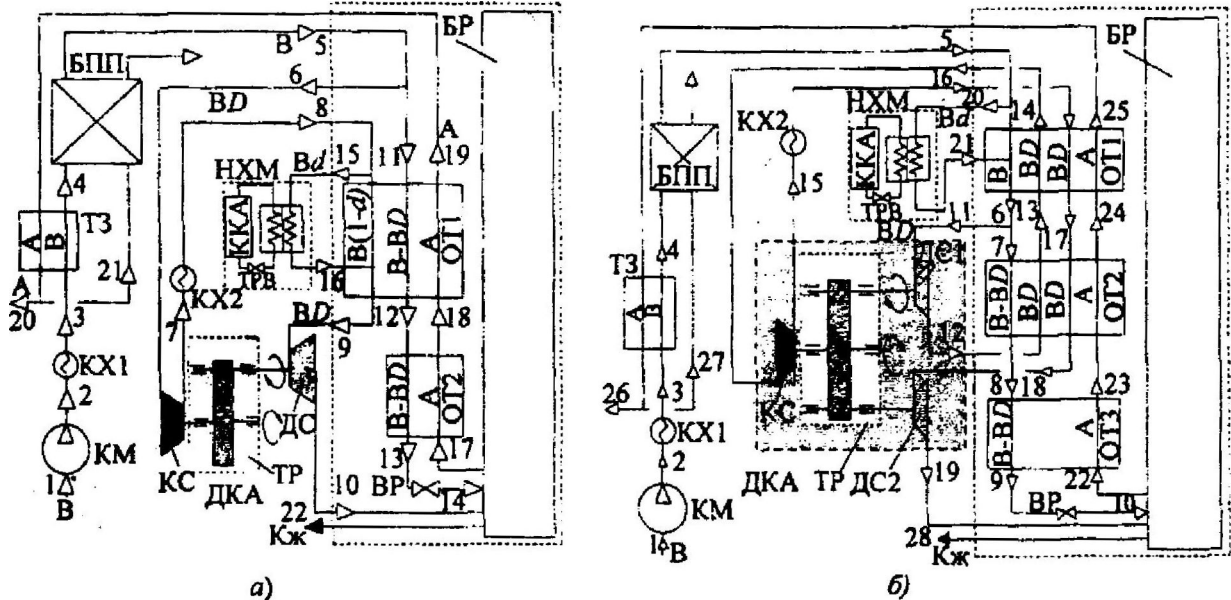


Рис.3. Схеми ПРУ з ДКА двох- (а) і трьохвальної (б) конструкції: КМ - компресор; КС, ДС - компресорна і детандерна ступені; ДС1, ДС2 - детандерна ступень високого і низького тисків; ТЗ - теплообмінник-зріджувач; БПП - блок підготовки повітря; КХ1, КХ2 - кінцеві холодильники; НХМ - низькотемпературна холодильна машина; ККА - компресорно-конденсаторний агрегат; ТРВ - терморегулюючі вентилі; ОТ1, ОТ2, ОТ3 - секції основного теплообмінника; ВР - регулюючий вентиль; БР - блок розділення; ТР - турборедуктор; В, А, Кж, ВО, БО - потоки ПП після компресорів; відкиданого азоту; продуктивного зрідженого кисню; повітря, яке направляєється до детандерного ступеня; повітря, яке охолоджується в НХМ

Аналогічним чином з балансу холодного кільця схеми (рис.3,б) визначимо, що виробництво зрідженого кисню в установці із двохступеневим розширенням повітря

$$K_{\text{ж}} = \Pi / D_{\text{ас}} [V \Delta i_1 + V \Delta i_2 + V \Delta i_3 + D' \Delta i_{\text{дс1}} + D' \Delta i_{\text{дс2}} + D' \Delta i_{\text{дс}}] - \Pi \Delta i_{\text{от}} - \Phi - 0 \text{ пЛ} = \Phi(V, P_i > V, T_y, P_{iy}, T_n, D_m), \quad (3)$$

де $D' \Delta i_{\text{дс1}}$, $D' \Delta i_{\text{дс2}}$ - питомі холодопродуктивності першої та другої детандерних ступенів трьохвальної ДКА; $D'_{\text{кхм}} (\Delta i_{\text{от}} - \Delta i_{\text{от}2})$ - охолодження частини потоку повітря в НХМ; $t_{\text{дс1}}$, $t_{\text{дс2}}$ - ізоентропійні ККД детандерних ступенів; $A(i, \Delta - i\text{£})$ - втрата від недорекуперації потоку від-

киданого азоту на теплому кінці основного теплообмінника; $\Delta i_{\text{от}} = (i^{\text{к}} - i^{\text{£}})$ - питома холодопродуктивність, необхідна для зрідження кисню в ізобаричному процесі.

З (2) і (3) можна зробити висновок, що використання ДКА в схемах ПРУ призводить до збільшення виходу $K_{\text{ж}}$, що викликано додатковим дросель-ефектом D/y повітря, яке дотискається в КС, а також зростанням теплоперепадів Δi , які можуть бути використані в кожній детандерній ступені. Із вказаного випливає, що для граничного збільшення додаткового дросель- ефекту потрібно КС розробляти на режим з максимально можливою мірою підвищення тиску, тобто для досягнення Яко^{TM} . При цьому потрібно враховувати, що максимізація холодопродуктивності ДС не тільки покращує показники ПРУ, але й збільшує роботу, яка передається КС.

У другому розділі обгрунтовується задача оптимізації ПРУ середньої продуктивності з використанням ДКА двох типів в її складі.

Оптимізація ПРУ з використанням в її технологічній схемі ДКА зводиться до вирішення двох

взаємопов'язаних завдань. У першому з них визначаються температура, частка повітря потоку D який подається на ДКА, та інші режимні параметри, що відповідають мінімуму питомого енергоспоживання I ПРУ при виробництві продуктів розділення повітря в рідинному або газорідинному режимах; у другому - знаходяться режимні та конструктивні показники агрегату, відповідні максимуму його $t_{ДКА}$.

Задача оптимізації ПРУ, працюючої, наприклад, в режимі видачі зрідженого кисню, полягає у визначенні ряду параметрів відповідно до умов

$$\text{орф}\} \rightarrow \text{тш}/(и), \text{ ие } V \quad (4)$$

при обмеженнях типу рівностей $m, (и)=0$ і нерівностей $2 < и(и) < L$, де $L(о)BI$ - цільова функція оптимізації, що представляє собою питомі витрати потужності на отримання зрідженого кисню $= IЖ/Кж$; $2Ж \sim$ сума витрат потужності в ПРУ, основна з яких витрачається на привід

КМ; u - компоненти вектора незалежних змінних V розмірності n ; $гн B$ - обмеження на змінні; $i=1,2$,

В якості основних обмежень $/и, \{и\}=0$ використовувалися наступні вирази, які характеризують режимні показники ПРУ, що розробляється:

- кількість виробленого зрідженого кисню при використанні у технологічній схемі установки двохвального ДКА згідно (2)

$$< \quad \text{т,}(и)=ДВ, P_2, Д T_0, P_0 y - KяHi \quad (5)$$

або трьохвального агрегату з урахуванням (3)

$$T_i^{(b)} = \Phi(B > L \text{ } A T_u, P \setminus, T \%, P \setminus l) - Kж=0; \quad (6)$$

- область зміни тиску нагнітання основним КМ

$$> *, (\text{в}) = P / < P_2 < Я_2, \text{ МПа}; \quad (7)$$

- якість зрідженого технічного кисню першого сорту

$$n\phi) ? y \& 99,7\%; \quad (8)$$

- недорекуперація потоків на теплом кінці основного теплообмінника

$$\text{ш}_4(и) = ДP_{нед} < 15K, \quad (9)$$

- мінімальні різниці температур між прямими і зворотними потоками в секціях ОТ

$$n\phi Y^* Д7 > 3K; \quad (10)$$

де P_2' и P_2'' - мінімальне і максимальне значення тиску нагнітання; 7 - концентрація рідкого кисню.

На початку оптимізаційних розрахунків ПРУ ефективність ДКА приймається на основі заданих значень $\eta_{дс}$ і $\%_c$ або $\Gamma_{да}$, $\eta_{дс2}$ і $\tau_{кс}$. Подальші розрахунки параметрів ДС і КС або ДС1, ДС2 і КС, використаних у складі ДКА, дозволяють отримати їх дійсні значення, на основі яких після цього уточнюються показники ПРУ. В ході розрахунків ДКА і його ступеней використовувались основні теоретичні положення, що описують процеси в доцентрових детандерах і відцентрових компресорах; були прийняті обмеження на конструктивні і режимні параметри ДКА, використані в ПРУ. У якості цільової функції оптимізації ДКА використовувався його ККД для двохвального агрегату

$$\text{ПдкА-ПдсЛксіуі}, \quad (10)$$

або, в разі застосування трьохвального агрегату -

$$\text{Лдал} \bar{\text{ЛдсіЛдсі}} \% c' \text{Пр}^T 1 \text{ } \text{ } \quad (12)$$

де Лдс.ЛдсмЛдсг - ізотропні ККД ДС, ДС1, ДС2; $\text{г}_{кс}$ - адіабатні ККД КС; $\text{ту}=1-\text{Д}^{\wedge} \text{дсі}-\text{Д} \text{Дда}$ - газодинамічний ККД ДКА, який показує, як впливають на Лдкл втрати тиску в комунікаціях і теплообмінних апаратах, які знаходяться між основним компресором і ДС або ДС1, компресорної ступені і ДС2; $\text{А Асі} = (\text{А} - P_u) / P_u$, AP $\text{леі} = (P_{i5} - P_{iяУР}) / 5$ - приведені втрати тиску в теплообмінних апаратах і комунікаціях ДКА; А. А або $\text{А, Аі} > P \setminus i$ - тиски після КМ і перед ДС або ДС1, після КС і до ДС2.

Задача оптимізації ДКА зводиться до знаходження його оптимальних режимних і конструктивних параметрів, які задовольняють умові

$$\text{орI}\{x\} \rightarrow \text{тахДх}, ; \text{сєЛ}'; \quad (13)$$

при обмеженнях типу рівностей $\text{£}, (x)=0$ і нерівностей $\text{г} < \text{А}(x) < \wedge$, $\text{ДсДх} = \text{т}$ ДСА - цільова функція оптимізації; x

- компоненти вектора незалежних змінних X розмірності n і δ - обмеження на змінні; $i=1,2,\dots/i$.

В якості обмежень $\#00=0$ використані вирази, що зв'язують основні режимні та конструктивні параметри ступенів ДКА:

- по потужності для двошального

$$\xi_i(*) = L_{ДСПМС} \cdot L_P - A_c \cdot O \quad (14)$$

або потужності для трьохшального ДКА, яка представляє суму робіт розширення повітря в ДС1 і ДС2 з урахуванням їх втрат в турборедукторі,

$$\xi_i(*) = M_{Л/ДС1} + L_{ДС1} \cdot L_{КС} - L_{КС} = 0; \quad (15)$$

- по витраті в двошальному

$$\xi_2(X) = L_{КС} - P_{ДС} = 0 \quad (16)$$

або трьохшальному ДКА

$$\#i(*) = L_{КС} - L_{ДС} = 0; \#ii(*) = L_{КС} - \text{Юдг} = 0; \xi^i(x) = m_{aa} - \text{ч}n_{ac} = 0; \quad (17)$$

- по частотах обертання ДС і КС з урахуванням передатного числа редуктора

$$\xi_{ii}(*) = L_{ДС} - P_{КС} M_{ред} = 0 \quad (18)$$

або частоти обертання валів турборедуктора для ДС1 і ДС2

$$\#(x) = L_{ДС1, ДС2} (A, \text{И}2) < 150 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}; \quad (19)$$

- по частоті обертання вала КС для відцентрових ступеней компресорів

$$\xi(x) = L_{КС} \cdot \omega_{КС} - 10^3 \text{ мин}^{-1}, \quad (20)$$

де $L_{ДС} = \text{Юдсі} \cdot L_{ДС}$; $M_{СС} \cdot \omega_{КС} \cdot L_{КС} \cdot L_{ДС} \cdot \omega_{ДС1} / L_{ДС} \cdot \omega_{ДС1} \cdot L_{ДС} \sim$ потужності на валах детандерних і компресорних ступенів двох- і трьохшальних ДКА; $L_{ДС}$, $L_{ДС1}$, $L_{ДС2}$ - ізоентропні роботи розширення в ДС або ДС1, ДС2 і адіабатного стиснення в КС; n_{ac} , n_{aa} , $n_{да}$, $n_{да}$, $n_{КС}$ - частоти обертання детандерних і компресорних ступенів; u_2 - окружна швидкість колеса; A - зовнішній діаметр робочого колеса (РК) для детандерних і компресорних ступенів.

Конструктивні розміри проточних частин ступенів та інших елементів ДКА залежать від ряду параметрів, які впливають на газодинамічні характеристики і зв'язки між зовнішніми діаметрами робочих коліс ступенів стиснення і розширення, а також всіма основними геометричними показниками турбомашин. До них можна віднести приведений діаметр $<L = \omega / B$ і частоту обертання n . Тому при розрахунках робочих-колес ДС і КС або ДС1, ДС2 і КС значення B прийняті як оптимізаційні величини. Вони за допомогою коефіцієнту витрати в пов'язані з

найважливішими показниками турбомашин: діаметром РК; абсолютними і відносними значеннями ширини РК; частотами їх обертання і ККД ступенів.

Вираз для ГДКА є неаналітичною функцією режимних і конструктивних параметрів агрегату, що по-різному впливає на ефективність ДКА. Його режимні параметри залежать від деяких показників, що характеризують роботу ПРУ, а конструктивні - від таких показників, як L_{dc} , L_{kc} або g_{da} , L_{dc1} , L_{dc} , а також i та $d_{кл}$. Ці параметри складним чином взаємопов'язані; до того ж має місце неоднозначний їх вплив і на ефективність ПРУ,

При об'єднанні з КС за допомогою редуктора однієї ДС або двох детандерних ступенів ДС1 і ДС2 в один агрегат слід знаходити оптимальні величини $s_{i\alpha}$ і $<I_{kc}$ або $<D_{DC1,1}/D_{DC1}$ та $s_{i\alpha}$, які знаходяться в різних діапазонах значень. Однак, як показав аналіз, в багатовальних ДКА існують цілком певні зв'язки між наведеними діаметрами компресорних і детандерних ступенів. В загальному вигляді вперше отримано вирази, які встановлюють зв'язки між ними в двох- і трьохвальних ДКА повітрярозділювальних установок. Як приклад приведено вираз, який описує зв'язок між приведеними діаметрами s_{dc} та s_{im} в двохвальному ДКА, отриманий залученням балансових співвідношень між потужностями, частотами обертання валів КС і ДС та витратами повітря через ступені:

$$\frac{C_{iDC}}{d_{kc}} = \frac{D_{де}^2}{D_{К}^2} \frac{K_{DC} Prf_{DC}}{C_{К} K_{kc} V_{KC}} \quad (21)$$

$$1-5 \quad \text{■} \text{tg}\beta_A, i=kc;dc; \quad (22)$$

де

D_{KC} , D_{ac} - зовнішні діаметри робочих коліс КС і ДС; τ_{Ac} , i_{dc} $\beta_{c/kc}$, β_{dc} и ρ^c , ρ^{dc} - коефіцієнти стиснення потоків, кути лопаток і щільності повітря на внутрішніх діаметрах робочих коліс КС і ДС; $\beta_{тксі} \beta_{тдс}$ - втулкові відношення.

У третьому розділі приведені результати оптимізації двох ПРУ середньої продуктивності з повітряною поршневою компресорною машиною (КМ) 4ВМ10-55/71. На основі цієї КМ проведена розробка двох ефективних ПРУ Кж-0,5М1 і Кж-0,5М2 для виробництва більш ніж 500кг/год зрідженого Ог. В ході чисельного експерименту знайдено оптимальний тиск нагнітання P_i спеціально змодельованої поршневої КМ, при якому вдасться підвищити ККД КС в двохвальному ДКА і збільшити вихід зрідженого Ог-

Для коректної оцінки ефективності розроблених ПРУ з двох- і трьохвальним ДКА була виконана оптимізація змодельованої повітрярозділювальної установки з турбодетандером, яка має масляне гальмо. В схему цієї ПРУ, позначеної як Кж-0,5, для збільшення її холодопродуктивності була включена НХМ. Враховувалися теплоприпливи до холодної частини ПРУ на рівні 188 кДж/кмоль, недорекуперація на теплому кінці основного теплообмінника 14-16К, а також забезпечувалась реалізованість теплообміну у всіх його секціях. Варіювання температури і частки відбору повітря D на детандер, а також частки відбору повітря d на НХМ дозволило встановити, що мінімум питомих витрат енергії в цій ПРУ $l = 1,17$ кВт год/кг рідкого Сб- При цьому вихід рідкого кисню - 620 кг/год при $T_{0,c} = 293$ К. Споживана КМ потужність при тиску нагнітання повітря 6,5 МПа разом з додатковими витратами на привід НХМ, регенерацію блоку комплексного очищення повітря тощо складає 726 кВт.

В схему першої з двох розроблених ефективних ПРУ Кж-0,5М1 (см. рис. 3, а) було включено двохвальний ДКА з турборедуктором. Оптимальні режимні та конструктивні параметри ступенів ДКА визначалися одночасно з перевіркою і виконанням обмежень, що накладаються на характеристики ПРУ і сам ДКА. При вирішенні задач оптимізації (4) і (13) необхідно було

реалізувати ряд розрахункових циклів для уточнення розрахунків параметрів, що обумовлено особливостями застосованого алгоритму. При оптимізації ДКА враховувалися вирази і умови (5), (7)–(10), (14), (16), (18) і (20), виконання яких має забезпечувати досягнення максимально можливої ефективності кисневої установки при реалізованості теплообміну в ОТ, допустимої не-дорекуперації на його теплому кінці і заданої чистоти виробляемого зрідженого кисню. У зв'язку з цим багато разів проводилися перерахунки характеристик ПРУ і ДКА при нових параметрах: витраті повітря $m_{ДКА}$, які проходять крізь ДКА; температурі відбору повітря на детандер T_9 ; ступеня підвищення тиску $L_{КС}$. При оптимізації параметрів і характеристик ДКА в тісному зв'язку з удосконаленням ПРУ застосовувався ітераційний алгоритм, який забезпечував збіжність розрахунків при відносно невеликому числі ітерацій. Результати оптимізаційних розрахунків наведені в табл.1. Витрачена потужність ПРУ при відключеній НХМ - 696 кВт.

Таблиця 1
Параметри вдувального ДКА и ПРУ Кж-0,5М1

Параметр	Значення
$L_{КС}$	0,36
$L_{ПС}$	0,82

При оптимізації ДКА одночасно з знаходженням оптимальних режимних параметрів ПРУ на першому етапі визначалися також такі конструктивні характеристики компресорного і детандерного ступенів агрегату, як наведені діаметри їх робочих коліс (РК) $d_{РС}$ і $L_{КС}$ (див. табл.1). Для проведення на другому етапі розробки конструкції КС

була створена методика конструювання її проточної частини. При визначенні конструктивних параметрів КС (рис.4) забезпечувалось їх узгодженість з вже знайденими на першому етапі режимними характеристиками як КС і ДС, так і ДКА в цілому. При конструюванні КС основним вважалася розробка РК, в якості якого було вибрано осірадіальне колесо напіввідчиненого типу. У колесі такого типу можна, використовуючи осірадіальну просторову решітку I підбираючи геометрію профілю, отримати високі тиски в умовах великих значень окружної швидкості.

При профілюванні лопаток РК особлива увага приділялась умовам входу повітря в його осьову частину, а також виходу потоку з лопаток колеса (рис.5). Для цього визначались оптимальні кути входу повітря на лопатки колеса (β_1 і β_2) виходу з них β_3 . Одночасно з цим встановлювалася і область стійкої роботи КС, яка відповідає оптимальному значенню η_2 . При цьому зміни η_2 співвідносилися з діапазоном приведених діаметрів c_1 кс. Кількість лопаток z з урахуванням того, що основним оптимізаційним параметром є $L_{КС}$, визначалося з виразу:

$$z = 2\pi c_1 (l/l)_{ср} \quad (23)$$

де (l/l) - густина решітки РК. При конструюванні проточної частини КС розроблялись і інші її ефективні елементи: всмоктувальна камера, дифузор і равлик. Знаходилися геометричні та газодинамічні параметри усіх елементів проточної частини. Перерахуємо деякі з них, які дають уявлення про оптимальні параметри робочого колеса КС ДКА: кути входу на лопатки колеса $\beta_1=34$ град і виходу з них $\beta_2=80$ град; кількість лопаток $z=12$; приведений діаметр $L_{КС} = 0,22$; $r_1=88,5$ мм; $r_2=19,5$ мм. Розроблена конструктивно КС забезпечує раніше обчислені $\eta_{КС}=1,347$ (див.табл.2), тиск повітря перед ДС $L=8,73$ МПа и $\eta_{КС}=36\%$. Останнє показує, що КС, яка входить до складу ДКА, всю роботу, вироблену в ДС, передає в ПРУ частини прямого потоку пові-

тря ξ з ефективністю 36%, стискаючи його з 6,5 до 8,73 МПа перед надходженням в ДС. Але навіть при такому відносно невисокому $L_{дал} / \text{кг} \cdot L_{дс} - P_{дкА} = 0,36 \cdot 0,82 \cdot 0,98 = 0,29$ питомі витрати I в ПРУ з ДКА при виробництві зрідженого кисню знижуються з 1,17 до 1,06 кВтч/кг в порівняній установці, в якій робота турбодетандера відводиться на масляне гальмо. Причому в Г1РУ з ДКА не використовується НХМ, застосування якої сприяло б досягненню ще більш низького / в цій установці. Разом з тим мале значення τ же обумовлено тим, що відносно невисоким є об'ємна витрата повітря крізь ступінь через високий тиск на вході до нього. КС в результаті цього виходить малорозмірною з великими швидкостями повітря і, як наслідок, з великими втратами.

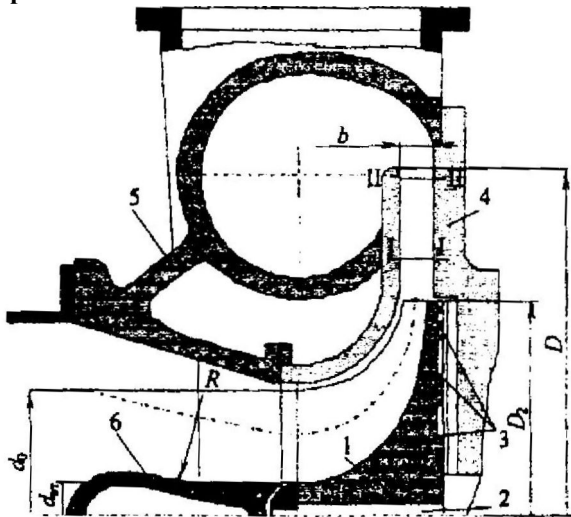


Рис. 4. Розрахункова конструкція проточної частини компресорного ступеня: 1- робоче колесо; 2- вал; 3 - лабиринтоне ущільнення; 4- дифузор; 5-равлик; 6-всмоктуючий патрубков

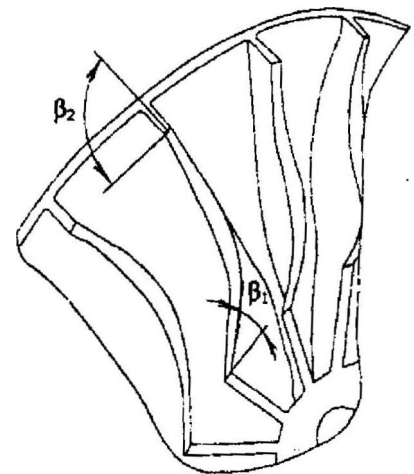


Рис. 5. Сегмент осірадіального сорної льиення; 4-дифузор; ми кутами профілю лопаток

, Подальше зниження I досягається у другій з розроблених ПРУ Кж-0,5М2, в схему які запроваджено трьохвальний ДКА з двома детандерними ступенями ДС1 і ДС2 (див. рис. 3,6). В ПРУ застосовується та ж КМ марки 4ВМ10-55/71 з тиском нагнітання $P_2 \sim 6,5$ МПа. Повітря за рахунок роботи двох детандерних ступенів в даній ПРУ компримується в КС від проміжного тиску 1,7/1,9 МПа для подальшої його подачі в ДС2. Для приводу КС використовується трьохвальний турборедуктор. На основі початкових певних показників ПРУ з урахуванням (4), (6)410 проводились розрахунки першої та другої детандерних ступенів. Початковими умовами для ДС1 і ДС2 служили знайдені із розрахунку ПРУ температури T_{u1} , T_{u2} , тиски P_{u1} , P_{u2} і витрата m^{\wedge} . Тиск кінця розширення в ДС1 знаходиться, виходячи з умов (6)-(10). Далі, у процесі варіації приведених діаметрів $c_{дс1}$ і $i_{дс2}$ досліджувались зміни основних розрахункових характеристик ДС1 і ДС2, з яких знаходились конструктивні параметри, що відповідають максимумам ізентропних ККД $\eta_{л1}$, $\eta_{л2}$ і, відповідно, найбільшій сумарній потужності обох ступенів розширення ДКА $L_{дс1}$ і $N^{\wedge}2$. Паралельно виконувались оптимізаційні розрахунки КС. Після врахування раніше використаних при розрахунку ПРУ величин (початкові температура T_{u1} і тиск P_{u1}) здійснювали при різних приведених діаметрах ($i_{кс}$ розрахунок тиску кінця стиснення в КС. З ряду із отриманих значень вибиралися лише ті, що задовольняють завданню оптимізації ДКА (13) з обмеженнями на режимні параметри (6)-(10). В цілому при рішеннях задач оптимізації ПРУ (4) і ДКА (13), в яких забезпечувалися одночасно мінімум I і максимум $\eta_{дал}$, реалізовувався ряд розрахункових циклів для уточнення та коригування визначених параметрів. На першому етапі оптимізації трьохвального ДКА змінювались також і значення проміжного тиску P^{\wedge} (тиску кінця процесу розширення в детандерній ступені високого тиску ДС1, згідно рис. 3,6). В результаті було встановлено, що при P

3,20/2,31 МПа числа обертів валів ДС1 і ДС2 зближаються і приймають в залежності від наявності або відсутності попереднього охолодження значення $n_{дс1}=n_{дс2}=92580/86500 \text{ мин}^{-1}$ (табл.2).

Рівність частот обертання валів ДС1 і ДС2 дозволяє замість трьохвального використовувати двохвальний ДКА, в якому два детандерні ступеня розміщуються на одному валу. В цьому випадку знижуються механічні втрати в турборедукторі з 12% до 7% із-за зменшення числа пар тертя. Однак аналіз показує, що ДКА з трьома валами хоча й трохи поступається по ефективності двохвальному (див. табл.2), його простіше реалізувати на відміну від двохвальної конструкції із ступенями ДС1 і ДС2 на одному загальному валу. Так, при трьохвальному компонованні холодна частина ДКА добре вписується в блок

Таблиця 2
Параметри ПРУ і ДКА з двома ступенями розширення

Параметри	Двохвальний ДКА	Трьохвальний ДКА
P_i , МПа	6,5	6,5
P_n , МПа	1,9/1,7	1,98/1,81
Рів, МПа	3,2/2,91	3,3/2,8
n	1,68/1,71	1,66/1,55
Π и K	225/233	213/219
$\Gamma, \text{в,к}$	175/163	170/159
4%	0/20	0/20
$L_{дс1}$, мин^{-1}	92580/86500	84100/82200
$L_{дс2}$, мин^{-1}	92580/86500	84100/82200
$L_{кс}$, мин^{-1}	47750/46940	46890/46380
$\bullet O_{дс}$ мм	52/58	46/49
$\blacksquare O_{дс2}$ мм	46/48	54/58
Окс, мм	108/118	129/140
$L_{дс1}$, кВт	31,9/30,4	30,0/26,3
$U_{дсз}$, кВт	38,2/34,4	29,4/31,88
$U_{кс}$, кВт	65,2/64,8	52,3/51,2
$L_{дс}$ %	80	80
$L_{дс2}$ %	81	81
$L_{кс}$ %	55/56	55/57
$L_{ДКА}$, %	33/35	32/33

розділення, однаковими будуть шестірні вали для ДС1 і ДС2. Виконана оптимізація ПРУ Кж-0,5М2 спільно з ДКА дозволила, як видно з табл.2, знизити питому витрату енергії до $\lambda=1,00-1,01$ кВтгод/кг зрідженого Ог, а також забезпечити роботу установки без використання НХМ. У випадку введення в ПРУ холоду НХМ реальне значення λ ще зменшується до 0,93-0,95 кВтгод/кг.

У двох ПРУ Кж-0,5М1 і Кж-0,5М2 в вузли ректифікації не вносились будь-які зміни. Вироблення в даних ПРУ відносно великої кількості холоду дозволяла розширення повітря в ДС завершувати з 2-3% рідкої фази. Такий двофазний потік повітря вносить в нижню колону ПРУ додатковий холод, який сприяє збільшенню коефіцієнта вилучення кисню до 0,84.

Аналіз характеристик розробленого для ПРУ Кж-0,5М1 ДКА двохвальної конструкції показує, що через відносно малі витрати повітря і підвищеного на всмоктуванні тиску не вдається створити ефективно працюючу КС ДКА, в якій процес стиснення повітря реалізовувався б з більш високим адіабатним ККД $\eta_{кс}$. В оптимізаційних розрахунках (див. табл.1) було отримано, що при тиску нагнітання компресора $P_{*2}=6,5$ МПа $L_{кс} \approx 0,36$. При такому значенні $\eta_{кс}$ невисоким виявляється і ККД ДКА. Розрахунковими дослідженнями характеристик ДКА при змінах параметрів повітря на вході в КС було

встановлено, що при деякому обґрунтованому зниженні P_2 можна очікувати зростання $\eta_{кс}$ через зменшення густини повітря на всмоктуванні в неї і збільшення його загальної витрати. Для підтвердження цього припущення досліджували, як зниження тиску нагнітання основного компресора, що входить в КМ 4ВМ10-55/71, буде позначатись на ефективності КС I, в цілому, на ДКА. При цьому, змінюючи P_2 з 6,5 до 2,5 МПа, підтримували на од-

йому і тому ж рівні, відповідному 6,5 МПа, споживану КМ потужність P_2 . Дійсна потужність змодельованого з урахуванням умови $\eta_{\text{км}} = \eta_{\text{с}} \eta_{\text{ет}}$ компресора дорівнюватиме $\eta_{\text{км}} = \eta_{\text{с}} \eta_{\text{ет}} \eta_{\text{пкз}}$, де $\eta_{\text{км}}$ і $\eta_{\text{пкз}}$ - дійсна потужність компресора при $P_2 = 6,5 \text{ МПа}$ і його ізотермічний ККД. Потужність відповідно до рис. 3, а $\eta_{\text{с}} = \frac{V}{V_0} \ln \left(\frac{T_0}{T_1} \right) = \frac{V}{V_0} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$, де T_0, T_1 - питомі значення ентропії і ентальпії на початку і кінці процесу ізотермічного стиснення. Оскільки при зниженні P_2 питома робота $l_{\text{в}}$ зменшується, то для забезпечення незмінності $\eta_{\text{км}}$ потрібно збільшувати витрату повітря через основний компресор В. Враховуючи, що при $P_2 = 6,5 \text{ МПа}$ потужність $\eta_{\text{км}} = 618 \text{ кВт}$, визначено значення V при наступних тисках нагнітання, МПа: 6,5; 6; 5,5; 5; 4,5; 4; 3,5; 3; 2,5. Використаний підхід до зміни тиску P_2 при збереженні $N_{\text{м}}$ цілком допустимо, так як дана КМ має в своєму складі синхронний електродвигун.

Очікуване збільшення виходу зрідженого O_2 при одночасному зниженні P_2 і зростанні витрати В неочевидне, так як при цьому, згідно (2), будуть знижуватись дросель-ефект повітря, ізентропійний перепад в ДС та ін. Аналітично дослідити вплив P_2 і В на вихід Кж складно, так як залежність Кж від вказаних параметрів носить нелінійний характер. Тому були проведені прямі розрахунки деяких показників як ДКА, так і ПРУ (рис. 3, а). Виконані оптимізаційні розрахунки дозволили при варіюванні P_2 з урахуванням $\eta_{\text{км}} = \eta_{\text{с}} \eta_{\text{ет}}$ визначити оптимальний тиск $P_2 = 4,6 \text{ МПа}$ і відповідну витрату повітря $V = 4280 \text{ кг/год}$ (108% від його витрати при $P_2 = 6,5 \text{ МПа}$). При шість параметрах проявляються одночасно два екстремуми: мінімум питомої роботи $l_{\text{тш}} = \text{кВтгод/кг}$ (точка b на кривій 1 рис. 6) і максимум виробництва кисню $K_{\text{жтг}} = \text{кг/год}$ (точка a на кривій 3 рис. 6). Характер зміни Кж на рис. 6 вказує на те, що при $\eta_{\text{км}} = \eta_{\text{с}} \eta_{\text{ет}}$ виробництво Кж «зверху», тобто при $P > P_2$ обмежено низьким ККД ДКА, а «знизу» - трансформацією циклу

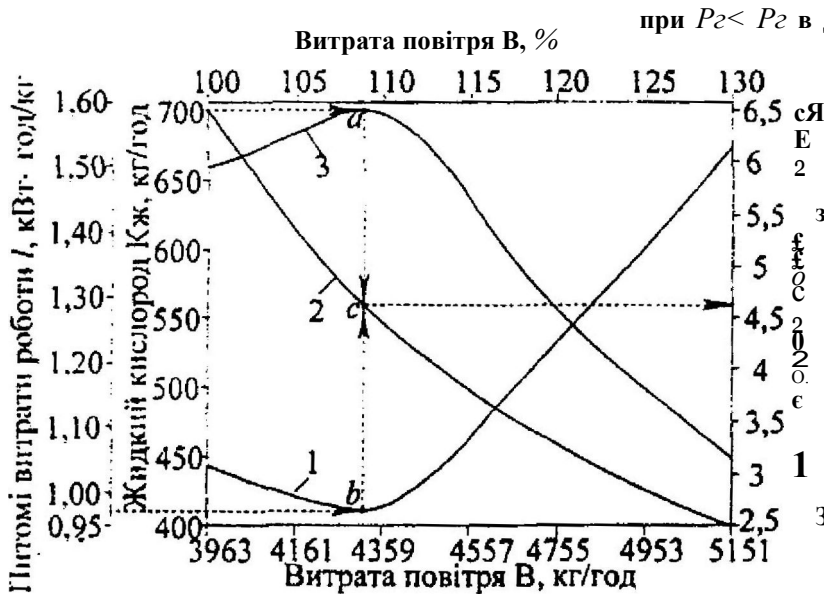


Рис. 6. Зміни характеристик ПРУ за умови $\eta_{\text{км}} = \eta_{\text{с}} \eta_{\text{ет}}$ залежно від витрати повітря В: 1 - питомі витрати енергії; 2 - тиск повітря P_2 ; 3 - продуктивність по рідкому кисню Кж

В четвертому розділі викладені результат розробки багаторежимної ПРУ середньої продуктивності для виробництва більш як 1000 кг/год зрідженого O_2 на основі машин динамічного принципу ліі. До складу ПРУ включено трьохвальний ДКА, в якому робота розширення частини повітря, яке переробляється - перетворюється в додаткову холодопродуктивність.

ПРУ в більшості випадків створюються для експлуатації в декількох режимах вироблення зрідженого і газоподібних продуктів розділення повітря. Розробку ПРУ проводять з урахуванням

при $P_2 < P_2$ в Дикл низького тиску. При низьких P_2 ,

незважаючи на зростання ККД ДКА, $\eta_{\text{с}}$ / росте, що впливає із рис. 6. При P_2 ККД $\eta_{\text{с}} = 46,8\%$, що перевищує значення ККД КС при $P_2 = 6,5 \text{ МПа}$ в 1,3 рази. У компресорній ступені при оптимальному P_2^* були збільшені перетини проточної частини і діаметр $D_{\text{с}}$ РК компресорної ступені (з 88,3 до 110 мм). Одночасно з дам з 50,5 до 57 мм зріс $O_{\text{ас}}$ РК детандерної ступені. Зменшення тиску P_2 веде також до зниження частот обертання лдс и $n_{\text{кв}}$ валів ДС і КС. При зниженні P_2 з 6,5 до 4,6 МПа $n_{\text{кв}}$ стає менше в 1,33рази, а $\eta_{\text{с}}$ - в 1,14 рази.

особливостей основного режиму роботи, що є найбільш витратним серед ряду можливих. Таким в ПРУ є режим виробництва зрідженого кисню. Для такого режиму розроблявся також і ефективний детандер-компресорний агрегат. Оптимізацію його конструктивних і режимних характеристик згідно (13) проводили в тісному зв'язку з оптимізацією і самої ПРУ з урахуванням (4). При використанні в подальшому розробленого ДКА в ПРУ, одо реалізує газорідні режими, вирішувались задачі визначення його характеристик в нерозрахункових умовах.

Створена ПРУ повинна виробляти такі продукти: рідкий А (1-ий або Кж-режим); А в газоподібному стані під тиском 3 МПа і частково у вигляді рідини (U-ой або КдКж-режим); зріджений N₂ (Ш-ий або Аж-режим); N₂ в газоподібному стані під тиском 3 МПа і частково у вигляді рідини (IV-ий або АдАж-режим). На рис. 7 приведена схема вказаної багаторежимної ПРУ з трьохвальним ДКА. В установку надходить 8170 кг/год ПП. Для його стиснення до тиску 4ДМПа застосовується чотирьохступеневий відцентровий компресор моделі С1050МХ4, що випускається компанією Ingersoll Rand (США). Потужність приводу компресора -1250 кВт при спожитій -1100 кВт.

У режимі видачі рідких продуктів використовується низькотемпературна холодильна машина АРЕ з компресором компанії Bitzer (Німеччина). Його холодопродуктивність бнхм=40 кВт при спожитій потужності $\wedge_{\text{кхм}} * 24,4$ кВт. При роботі в газорідних режимах з ПРУ видачі азоту або кисню під тиском використовувались відцентрові насоси моделі СО, що випускаються фірмою Cryostar (Франція), з продуктивністю 45 л/хв і тиском нагнітання 3 МПа. На привід насоса витрачається не більше 5 кВт.

Робота ПРУ в режимі видачі рідкого кисню (1-ий режим) аналогічна її роботі в режимі виробництва рідкого азоту (Аж-режимі). Єдина особливість останнього полягає в тому, що потік азотної флегми Ф, який відбирається з кишені нижньої колони, при проходженні переохолоджувана ТП1 охолоджується там на 11К нижче температури насичення і потім розділяється на дві частини. Один потік прямує в переохолоджувач ТПЗ, охолоджується в ньому до 82К і видається через ВР5 у вигляді Аж. Друга частина азотної флегми дрослюється в ВРЗ в міжтрубний простір переохолоджувана ТПЗ для охолодження Аж і потім надходить у верхню колону.

Оптимізація параметрів ДКА і ПРУ, згідно (4) і (13), виконувалася з урахуванням їх роботи в режимі виробництва зрідженого кисню, тобто в основному режимі. Після цього визначались їх характеристики при роботі в нерозрахункових режимах, коли в ПРУ отримують і інші продукти, такі як КдКж, Аж, АдАж. При розробці ДКА для ПРУ, що виробляє рідкий кисень, вирішувалося питання досягнення гранично можливо? холодопродуктивності, забезпечуємо! двома детандерними ступенями ДС1 і ДС2. Для цього потік повітря ВД що направляється в компресорну ступінь ДКА, стискається до більш високого тиску для збільшення роботи розширення в ДС2, яка передається на вал агрегату. Початковими показниками для ДС1 служать температура T^{\wedge} , тиск P_{12} і витрата m^{\wedge} . В процесі варіювання приведенного діаметра dm знаходились основні характеристики ДС1, з безлічі яких були обрані конструктивні і режимні параметри ступені, відповідні максимуму ізоентропного ККД ті де, і, відповідно, найбільшої потужності Уде, на валу ДС1 в режимі видачі зрідженого кисню Кж. Отримані значення діаметрів коліс і параметрів проточної частини А d приймалися такими ж і в подальших розрахунках ДКА в інших режимах роботи ПРУ при виробництві КдКж, Аж і АдАж. Подібно ДС1 оптимізувалась також і друга детандерна ступінь низького тиску ДС2. Початковими показниками для ДС2 служать температура T_{23} , тиск P_{23} і витрата $t_{\text{дал}}$.

Потім розроблялись робочі колеса і направляючі апарати ДС1 і ДС2. Після цього варіюванням приведених діаметрів De визначались характеристики КС. Використовувались в ході цих розрахунків отримані раніше показники схеми ПРУ: температура $T_{\text{п}}$ та тиск P_{17} . Із діапазону наведених діаметрів колеса були вибрані значення, які відповідають рівності потужностей на валах агрегату, тобто з умови $U_{\text{кк}} \wedge_{\text{де}} \wedge_{\text{Уда}} \text{УПм} \ll \wedge$ Отримане значення $5_{\text{кк}}$ для компресорної ступені ДКА дозволяє оцінити зміни характеристик КС в режимах

виробництва інших продуктів розділення повітря і визначити ефективність роботи ступені. Так, в режимах отримання тільки рідких продуктів ефективність роботи КС складе: Кж - $\eta_{КС}=62\%$, Аж - $\eta_{КС}=63\%$. В газорідних режимах: КдКж - $\eta_{КС}=52\%$, АдАж - $\eta_{КС}=53\%$ (див. табл. 3).

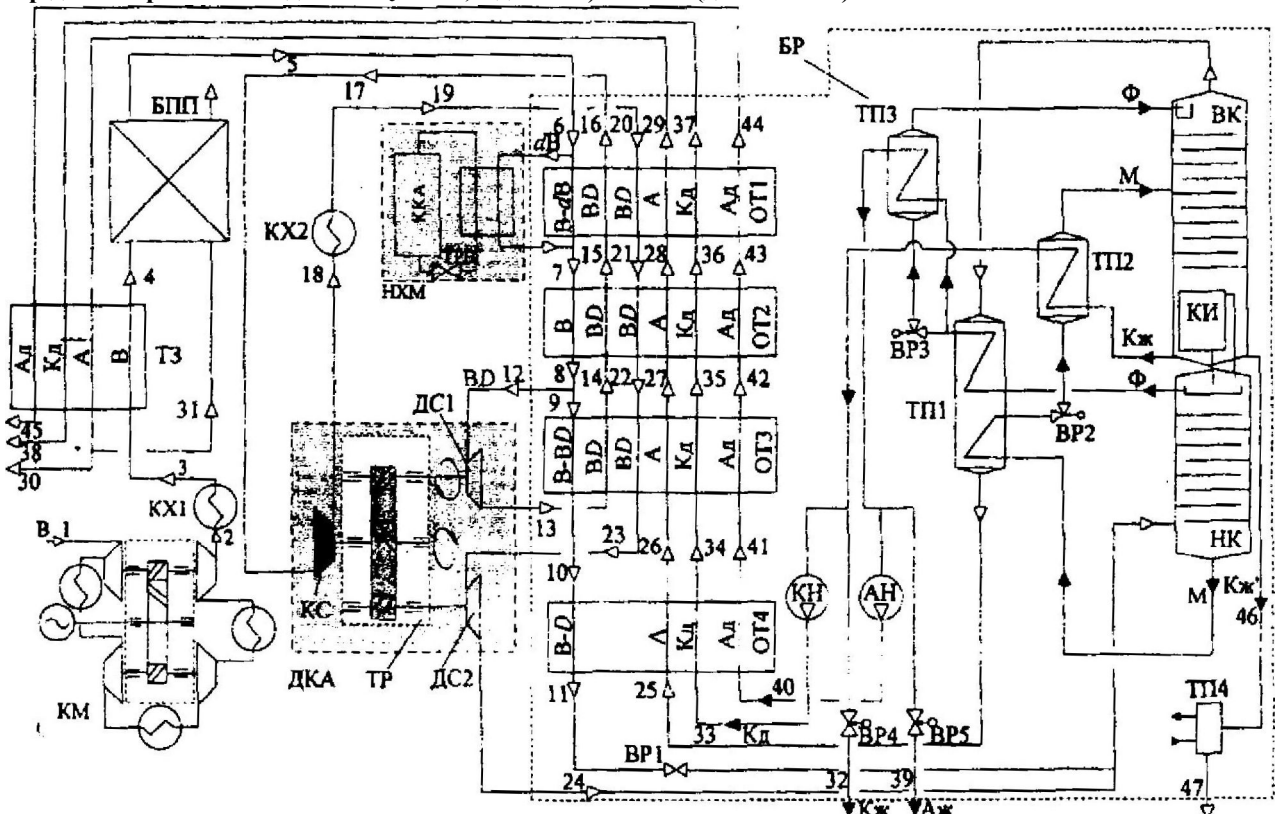


Рис.7. Схема газорідної ПРУ з ДКА трьохвальної конструкції: КМ - компресор; КХ1, КХ2 - кінцеві холодильники; КС - компресорна ступінь; ДС1, ДС2 - детандерні ступені високого і низького тисків; ТР - пгурборедуктор; ОТ1 - ОТ4 - секції основного теплообмінника; ТП1, ТП2, ТП3 - теплообмінники-переохолоджувачі блоку розділення; НК, ВК - нижня і верхня колони; ТП4 - теплообмінник-газифікатор; ВР1- ВР5 - регулюючі вентилі; КН, АН - насоси зріджених кисню та азоту; КВ - конденсатор-випарник; А, Кж, Аж, Кд, Ад, Кж' - потоки відкиданого азоту; рідких кисню та азоту під тиском; фракції безпеки. Решта позначень відповідають рис. 3, б.

Тиск нагнітання КС так само має різні значення. При тиску всмоктування $L_7=2,6$ МПа компресорна ступінь в залежності від режиму роботи забезпечує досягнення $P_{\&}$ при наступних ступенях підвищення тиску $\eta_{КС}$: Кж - $\eta_{КС}=1,7$; Аж - $\eta_{КС}=1,65$; КдКж - $\eta_{КС}=1,57$; АдАж - $\eta_{КС}=1,44$.

Знайдені конструктивні і режимні параметри ДС1, ДС2 і КС дають можливість визначити зміну характеристик ступенів агрегату як в основному, так і нерозрахункових режимах роботи ПРУ. При видачі рідкого кисню або азоту характеристики ДКА істотно не відрізняються: Кж - $\eta_{ДКА}=39\%$; Аж - $\eta_{ДКА}=40\%$. Це пояснюється близькими значеннями витрат повітря ВЦ через ступені агрегату (див. табл.3) і потужності, яка передається на вал КС.

При використанні установки в газорідному режимі роботи для виробництва кисню або азоту під тиском доводиться знижувати холодопродуктивність ДКА. Для цього відключається НХМ1 зменшується витрата повітря через ДКА приблизно в 2 рази. Таким чином, при однако-

них приведених діаметрах і зменшених витратах через ступені ДКА робота на валу агрегату у відповідних режимах складає: КДКж - $\eta = 55$ кВт, АДж - $M_{сж} = 41,8$ кВт. Ефективність агрегату при такій роботі знижується: КДКж - $\eta_{жк} = 31\%$; АДж - $\eta_{жк} = 31\%$.

Після розрахунку параметрів ДКА ступені редуції турборедуктора при передачі потужностей від детандерних ступенів до компресорної визначалися за виразами: $i_{жк} = \eta_{жк} / \eta_{сж}$

$\eta_{жк} = 1,19$; $\eta_{жк} = \eta_{сж} / \eta_{жк} = 1,19 > 1$. Використавши значення зовнішніх діаметрів робочих коліс (табл.3),

отримали наступні діаметри коліс на вході: $d_{жк} = d_{сж} \cdot i_{жк} = 26,2 \cdot 1,19 = 31,2$ мм, $d_{жк} = 31,2$ мм, $d_{жк} = 31,2$ мм, $d_{жк} = 31,2$ мм.

$d_{жк} = 31,2$ мм і $d_{жк} = 31,2$ мм.

Таблиця 3 При визначенні i враховувалися потужності, споживані

показники ПРУ і ДКА при різних режимах роботи

Показники	Режим роботи ПРУ			
	Кж	КжКд	Аж	АжАд

основним компресором, холодильним агрегатом НХМ і насосами зріджених $C > 2$ або N_2 . Розрахунки підтвердили можливість створення ефективної ПРУ для виробництва більш 1000 кг/год рідкого O_2 та ін.

продуктів на базі надійних відцентрових і доцентрових машин динамічного принципу дії.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

В дисертації розв'язана актуальна для кріогенної техніки науково-прикладна задача вдосконалення ПРУ середньої продуктивності шляхом їх оптимізації, а також режимів роботи та конструктивних характеристик ДКА.

1. Роботу розширення повітря в детан* дерному ступені двохвального ДКА доцільно використовувати для його дожимання в компресорному ступені агрегату перед подальшою подачею його в цю ж ДС. В трьохвальному ДКА повітря, додатково стиснене в КС за рахунок роботи обох детандерних ступенів і попередньо охолоджене, необхідно розширювати в детандерному ступені низького тиску до тиску в нижній колоні блоку розділення ПРУ.

2. Для підвищення ККД ДКА $\eta_{жк}$, призначених для роботи в складі ПРУ середньої продуктивності, слід створювати їх на базі двох- і трьохвальних турборедукторів, за допомогою яких вдається знизити частоту обертів валів КС до значень, які дозволяють розробляти ефективні вісі радіальні колеса напіввідчиненого типу.

3. Трьохвальний ДКА порівняно з двохвальним, в однакових умовах, характеризується більш високими значеннями ККД ДКА $\eta_{жк}$, що зумовлюється зростанням ККД КС в результаті подачі в КС повітря з тиском нижче тиску прямого потоку і з меншою щільністю.

4. Трьохвальні ДКА як базові агрегати для найбільш економічних ПРУ, можна перетворювати в двохвальні агрегати з розміщенням на одному валу двох детандерних ступеней високого і низького тисків. При цьому характеристики ДКА і ПРУ дещо зростають, оскільки підвищується механічний ККД турборедуктора.

5. Встановлені зв'язки між приведеними діаметрами робочих коліс детандерної (их) та ком* пресорної ступенів двох* і трьох вальних ДКА, що враховують баланси потужностей ступенів і частот обертання їхніх валів в турборедукторах та спрощують оптимізацію режимних та конструктивних характеристик ДКА.

6. Питомі витрати енергії I на виробництво зрідженого кисню в ПРУ Кж-0,5М1 з двохвальним ДКА можна знизити з 1,06 до 0,98 кВтгод/кг при зменшенні тиску повітря P_{2y} , що переробляється, з 6,5 до 4,6 МПа з одночасним збільшенням його витрати на 8% при збереженні на попередньому рівні (618 кВт) спожитої поршнеvim компресором потужності.

7. Створені принципи оптимізації ПРУ і використаного в її складі ДКА дозволили звести її до рішення двох взаємопов'язаних задач знаходження параметрів, одночасно відповідаючих максимуму ККД агрегату і мінімуму питомих витрат енергії / на виробництво продуктів розділення повітря в рідинному і газорідинному режимах.

8. В багаторежимних ПРУ з ДКА найбільш ефективна робота КС здійснюється в основному режимі виробництва продуктів розділення повітря. Запропонована методика розв'язання прямих і обернених задач розробки компресорних ступенів ДКА може використовуватися для оцінки їх характеристик при роботі як в основному, так і в нерозрахункових режимах експлуатації.

9. Багаторежимну ефективну ПРУ середньої тоннажності з трьохвальним ДКА типу КЖАЖКдАд-1 можна створювати на основі відцентрових і доцентрових машин і ступенів з динамічними принципами дії.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Лавренченко Г.К. Снижение удельного энергопотребления воздуходелительных установок среднего давления и малой тоннажноTM [Текст] / Г.К. Лавренченко, А.В. Плесной // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2013. — №5/8(65) - С.29-34. *Особистий внесок: розробка малотоннажної економічної ПРУ з продуктивністю 500 кг/год і вище рідкого кисню.*
2. Лавренченко Г.К. Разработка проточной части компрессорной ступени для ДКА двухвальной конструкции в составе ВРУ среднего давления [Текст] / Г.К. Лавренченко, А.В. Плесной // Технические газы. — 2013. — № 3,— С.26-32.
Особистий вклад: знаходження оптимальних конструктивних параметрів компресорної ступені, що працює в складі ДКА.
3. Лавренченко Г.К. Повышение эффективности детандер-компрессорных агрегатов, используемых в составе воздуходелительных установок среднего давления [Текст] / Г.К. Лавренченко, А.В. Плесной // Технические газы. — 2013. — №4. - С. 18-23,
Особистий внесок: визначення оптимального тиску основного компресора в ПРУ, яка містить двохвальний ДКА.
4. Лавренченко Г.К. Оптимизация много вального детандер-компрессорного агрегата воздуходелительной установки среднего давления [Текст] / Г.К. Лавренченко, А.В. Плесной // Технические газы. —2013. —№5 - С.15-24.
Особистий внесок: визначення видаткових характеристик ДКА трьохвальної конструкції при зміні тиску прямого потоку в ПРУ.
5. Лавренченко Г.К. Анализ показателей многорежимной ВРУ среднего давления с детандер-компрессорным агрегатом трехвальной конструкции [Текст] / Г.К. Лавренченко, А.В. Плесной // Технические газы. —2014. — №3 - С.40-46.
Особистий внесок: визначення характеристик ДКА трьохвальної конструкції в нерозрахованих умовах роботи ПРУ середньої продуктивності.

Публікації апробаційного характеру:

1. Лавренченко Г.К. Термодинамический анализ использования работы детандера в криогенных установках [Текст] / Г.К. Лавренченко, А.В. Тропенко, А.В. Плесной // Сборник тезисов докладов «Состояние, достижения и перспективы холодильной техники и технологии». — Одесса, 2011. -

C.137-138.

Особистий внесок: визначення методів і меж використання роботи розширення.

2. Лавренченко Г.К. Повышение эффективности воздуходелительных установок средней и малой тоннажной за счет использования работы расширения воздуха в детандере [Текст] / Г.К. Лавренченко, А.В. Плесной // Сборник тезисов докладов «Современные проблемы холодильной техники и технологии». — Одесса, 2013. - С. 166-168.

Особистий внесок: аналіз схем ПРУ з низькотемпературною холодильною машиною і ДКА в його складі

3. Лавренченко Г.К. Разработка жидкостных воздуходелительных установок средней производительности на основе машин динамического действия [Текст] / Г.К. Лавренченко, А.В. Плесной // Сборник тезисов докладов «Современные проблемы холодильной техники и технологии». — Одесса, 2014. - С.23-24.

Особистий внесок: результати оптимізації і рідких ПРУ з ДКА двох- і трьохвалевих турбодетандерів

Отримані патенти по темі дисертації:

1. Спосіб роботи криогенної установки для охолодження й зрідження потоку газу [Текст] : Деклараційний патент 56743 Україна : МІЖ F25J 5/00, F25B 9/06 / Лавренченко Г.К., Плесной О.В., Швець С.Г. ; заявник та патентовласник Одеська державна академія холоду. - № 201008368 ; заявл. 05.07.2010 ; публ. 25.01.2011, Бюл. №2. - 4 с.
2. Спосіб роботи криогенної повітрярозділювальної установки для виробництва рідких кисню або азоту [Текст] : Деклараційний патент 5760] Україна : МПК F25J 3/04, F25B 9/10 / Лавренченко Г.К., Плесной О.В., Швець С.Г. ; заявник та патентовласник Одеська державна академія холоду. - № 201008332 ; заявл. 05.07.2010 ; публ. 10.03.2011, Бюл. №5. - 4 с.
3. Спосіб роботи криогенного рефрижератора [Текст] : Деклараційний патент 59875 Україна : МПК F25J 3/06, F25B 9/10 і Лавренченко Г.К., Плесной О.В., Швець С.Г. ; заявник та патентовласник Одеська державна академія холоду. - № 201008333 ; заявл. 05.07.2010 ; публ. 10.06.2011, Бюл. №11. - 4 с.
4. Спосіб роботи криогенної повітрярозділювальної установки для виробництва рідких кисню або азоту [Текст] : Деклараційний патент 80519 Україна : МПК F25J 3/00, F25B 9/06 / Лавренченко Г.К., Плесной О.В., Штервдок А.С. ; заявник та патентовласник Одеська національна академія харчових технологій.-№201201552 ; заявл. 13.02.2012 ; публ. 10.06.2013, Бюл. №11.-4 с.
5. Спосіб роботи криогенної повітрярозділювальної установки для виробництва рідких кисню або азоту [Текст] : Деклараційний патент 82035 Україна : МПК F25J 3/00, F25B 9/06 / Лавренченко Г.К., Плесной О.В. ; заявник та патентовласник Одеська національна академія харчових технологій. - № 201201552 ; заявл. 17.02.2012 ; публ. 25.07.2013, Бюл. №14. - 4 с.
6. Спосіб роботи криогенної повітрярозділювальної установки для виробництва рідких кисню або азоту [Текст] : Деклараційний патент 82871 Україна : МПК F25J 3/00, F25B 9/06 / Лавренченко Г.К., Плесной О.В. ; заявник та патентовласник Одеська національна академія харчових технологій. - № 201201549 ; заявл. 13.02.2012 ; публ. 27.08.2013, Бюл. №16. - 4 с.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

А, Аж, К, Кж, Кд, Ад - азот газоподібний і рідкий; кисень газоподібний і рідкий; кисень і азот під тиском; БПП - блок підготовки повітря; БП - блок поділу; ПРУ - повітрярозділювальна установка; ДКА - детандер-компресорний агрегат; ДС1, ДС2 - детандерні ступені високого і низького тисків; ДС, КС - детандерна і компресорна ступені; КМ - компресорна машина; КХ - кінцевий холодильник; НХМ - низькотемпературна холодильна машина; ОТ - основний теплообмінник; ПП - переробляєме повітря; ТР - турбодетандер.

Анотація

Плесной А.В. Разработка эффективных детандер-компрессорных агрегатов криогенных воздуходелительных установок средней производительности. - Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05. 05. 14 - «Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования». - Одесская национальная академия пищевых технологий Министерства образования и науки Украины, Одесса, 2014г.

Диссертационная работа посвящается решению актуальной научной задачи, целью которой является разработка методики режимной и конструктивной оптимизации двух- и трехвалевых детандер-компрессорных агрегатов (ДКА) в тесной связи с совершенствованием воздуходелительных

установок (ПРУ) средней тоннажности для производства продуктов разделения воздуха - кислорода и азота в виде жидкости или в сжатом состоянии. В диссертации обоснован выбор наиболее рациональных способов использования работы расширения воздуха в ПРУ, схем установок и конструкций агрегатов для их реализации. Предложено создавать эффективные ДКА на основе турборедукторов. Это позволяет снижать число оборотов вала компрессорной ступени (КС) до её оптимального значения и тем самым повышать КПД агрегата. Поставлена и решена при разработках ряда эффективных ДКА задача оптимизации ПРУ средней производительности с нахождением режимных и конструктивных параметров агрегатов, соответствующих максимуму их КПД. В диссертации показано, что оптимизацию ПРУ и используемого в её составе ДКА можно свести к решению двух взаимосвязанных задач нахождения параметров установки и агрегата, одновременно обеспечивающих максимум КПД ДКА $\eta_{ДКА}$ и минимум удельных затрат энергии / на производство продуктов разделения воздуха в жидкостном и газожидкостном режимах. Приведены результаты оптимизации двух ПРУ средней производительности Кж-0,5М1 и Кж-0,5М2 с воздушной поршневой компрессорной машиной для производства 500 кг/ч жидкого Ог. В ходе численного эксперимента найдено оптимальное давление нагнетания в ПРУ со специально смоделированной поршневой компрессорной машиной, при котором достигается минимум удельных затрат на производство жидкого Ог. Для упрощения процедур режимной и конструктивной оптимизации ДКА установлены связи между приведёнными диаметрами рабочих колёс детандерных и компрессорных ступеней двух- и трехвальных агрегатов. С использованием полученных результатов разработана многорежимная эффективная ПРУ средней тоннажности с трехвальным ДКА типа КжАжКдАд - 1 на основе центробежных и центростремительных машин и ступеней с динамическими принципами работы.

Ключевые слова: детандер-компрессорный агрегат; криогенная воздухоразделительная установка; жидкие и газообразные кислород и азот; компрессорная и детандерные ступени; оптимизация; КПД агрегата; удельные затраты энергии на производство продуктов разделения воздуха.

Анотація

Плесной О.В. Розробка ефективних детандер-компресорних агрегатів криогенних повітря-розділювальних установок середньої продуктивності. - Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05. 05. 14 - «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування». - Одеська національна академія харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2014р.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної наукової задачі, метою якої є розробка методики режимної і конструктивної оптимізації двох-і трьохвальних детандер- компресорних агрегатів (ДКА) в тісному зв'язку з удосконаленням повітрярозділювальних установок (ПРУ) середньої тоннажності для виробництва продуктів розділення повітря - кисню та азоту у вигляді рідини або в стислому стані. У дисертації обґрунтовано вибір найбільш раціональних засобів використання роботи розширення повітря в ПРУ, схем установок і конструкцій агрегатів для їх реалізації. Пропонується створювати ефективні ДКА на основі турбо- редукторів. Це дозволяє знижувати число обертів вала компресорної ступені (КС) до його оптимального значення і там самим підвищувати ККД агрегату. Поставлена і розв'язана при розробках ряду ефективних ДКА задача оптимізації ПРУ середньої продуктивності із знаходженням режимних і конструктивних параметрів агрегатів, які відповідають максимуму їх ККД. У дисертації показано, що оптимізацію ПРУ і використаного в її складі ДКА можна звести до розв'язання двох взаємопов'язаних задач знаходження параметрів установки і агрегату, які одночасно забезпечуючи максимум ККД ДКА і мінімум питомих витрат енергії / на виробництво продуктів розділення повітря в рідинному і газорідинному режимах. Наведено результати оптимізації двох ПРУ середньої продуктивності Кж-0,5М1 і Кж-0,5М2 з повітряною поршневою компресорною машиною для виробництва 500 кг/год рідкого Сь. У ході чисельного експерименту знайдено оптимальний тиск нагнітання в ПРУ з використанням спеціально змодельованої поршневої компресорної машини, при якому досягається мінімум питомих витрат на виробництво рідкого Ог. Для спрощення процедур режимної і конструктивної оптимізації ДКА встановлено зв'язки між приведеними діаметрами робочих коліс детандерних і компресорних ступеней двох- і трьохвальних агрегатів. Використовуючи отримані результати розроблена багаторежимна ефективна ПРУ середньої тоннажності з трьохвальним ДКА типу КжАжК- дАд-1 на основі відцентрових і доцентрових машин і

ступенів з динамічними принципами дії. Ключові слова: детандер-компресорний агрегат, кріогенна повітрярозділювальна установка, зріджені та газоїдібні кисень і азот, компресорна і детандерна ступені, оптимізація, ККД агрегату, питомі витрати енергії на виробництво продуктів розділення повітря.

Abstract

Plesnoy A.V. Development of effective expander-compressor units of cryogenic air separation plants of average power productivity. - Manuscript Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specially 05.05.14 - "Refrigeration, vacuum and compressor equipment, air-conditioning system." - Odessa National Academy of Food Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2014.

The thesis is devoted to the solution of actual scientific problem, the purpose of which is working out the methodic of mode constructive optimization of two-and three-shaft expander- compressor units (ECU), in close connection with the improvement air separation plants (ASP) of the average tonnage for the production of air separation products - oxygen and nitrogen in a liquid or in a compressed state. In the thesis the choice of the most efficient methods of using the work of expansion of the air in ASP, schemes of the units and plants structures for their implementation. Proposed to create effective ECU based on turboreducers. This allows to reduce the rotational speed of the shaft of the compressor stage (CS) up to its optimum value, thus increasing the efficiency of the unit. Posed and solved while developing a range of effective ECU problem of optimization ASU average performance with finding mode and design parameters of units corresponding to the maximum of their efficiency. The thesis shows that the optimization of ASP and used in its structure ECU can be reduced to the solution of two inter-related problems of finding the parameters of the installation and assembly, while ensuring maximum efficiency COP of ECU η_{ECU} and the minimum specific energy consumption for the production of air separation products in liquid and gas-liquid modes. The results of optimization of two ASU average performance Kzh-0,5M1 and Kzh -0,5M2 piston air compressor machine for the production of 500 kg/h of liquid O₂. In the numerical experiment found the optimum injection pressure in ASP specially designed piston compressor machine, at which the minimum specific for unit costs production of liquid O₂. Mode facilitation and structural optimization of ECU established links between given impeller diameter expander and compressor stages to two and three-shaft units. Using the obtained results, worked out a multi-mode effective ASE average tonnage with a three-shaft ECU type KzhAzhKdAd - 1 on the basis of centrifugal and centripetal machines and stages with dynamic operation principles work.

Keywords: expander-compressor unit, cryogenic air separation plant, liquid and gaseous oxygen and nitrogen compressor and expander stage, optimization, efficiency of the unit, the specific cost of energy for the manufacturing of air separation products.