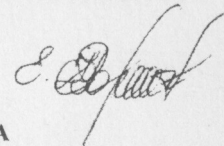


Авторефер
К 66

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ



КОРЖ ЄЛИЗАВЕТА ГРИГОРІВНА

УДК 536. (043.3); 621.565:621.59, 661.9

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В УСТАНОВКАХ
ОТРИМАННЯ КРИПТОНОКСЕНОНОВОГО КОНЦЕНТРАТУ**

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 національній академії харчових технологій (ОНАХТ) Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук
Бондаренко Віталій Леонідович,
професор кафедри криогенної техніки
Одеської національної академії харчових
технологій МОН України

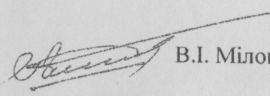
Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лавренченко Георгій Костянтинович,
президент Української асоціації виробників
технічних газів «УА-СІГМА»

кандидат технічних наук
Петухов Ілля Іванович,
доцент кафедри аерокосмічної теплотехніки
Національного аерокосмічного університету
ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» МОН України

Захист дисертації відбудеться «16» березня 2015 р. в 14.30 в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.088.03 при Одеській національній академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, г. Одеса, Україна, 65082.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ОНАХТ за адресою:
вул. Дворянська, 1/3, г. Одеса, Україна, 65082.

Відомості розіслані «28» січня 2015 р.

 В.І. Мілованов

xv 761

ІНСТИТУТ ХАРЧОВИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

1

Автореферат
К66

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час важкі інертні гази криптон і ксенон є цінними промисловими продуктами, що знаходять все більш широке застосування в різних галузях промисловості і науки. Сумішами на основі важких інертних газів заповнені лампи прожекторів, оптичних печей, імпульсні джерела світла і осередки плазмових дисплеїв. У медицині ксенон затребуваний в якості ефективного і безпечного анестезуючого засобу, а суміші Kr і Xe – робочого тіла ексімерних лазерів, які також застосовуються в медицині. Для корекції орбіт супутників зв'язку часто використовують ксенонові іонні двигуни.

Єдиним промисловим джерелом важких інертних газів (Kr і Xe) є атмосферне повітря. Для зниження витрат на очищення рідких газів і підвищення ступеня вилучення необхідно вдосконалювати всю технологічну послідовність отримання криптону і ксенону від початкових стадій збагачення сировини в повітрерозподільній колоні до виробництва чистих товарних продуктів. Особливо актуально це для перших ступенів технології, оскільки через низьку концентрацію Kr і Xe зазначені етапи є найбільш енерговитратними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження систем збагачення криптоноксенонової суміші виконано згідно Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11.07.2001, № 2623 – III, в якому особливу увагу приділено напрямку: «Новітні та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та АПК».

Представлені в дисертації матеріали використані в процесах вдосконалення нових установок збагачення первинної Kr-Xe-суміші, що експлуатуються чи створюються та впроваджуються на кисневих виробництвах різних підприємств.

Мета і завдання дослідження. *Мета дослідження* – вдосконалення технології збагачення первинної криптоноксенонової суміші шляхом зниження питомого енергоспоживання за рахунок оптимізації тепломасообмінних процесів і апаратів, що входять в систему. В рамках загального напрямку *основними завданнями* дослідження є:

- вивчення технології вилучення інертних газів криптону і ксенону з повітря і викидних потоків хімічних підприємств, виявлення «вузьких» місць в технологічній послідовності отримання чистих продуктів;
- критичний розгляд технологій збагачення Kr і Xe;
- оптимізація конструкцій рекуперативних теплообмінних апаратів, що входять до складу установок збагачення криптоноксенонової суміші нового покоління;
- дослідження безмашинних методів збільшення тиску потоку і особливостей їх використання на етапі збагачення Kr-Xe-суміші;
- створення експериментальної установки для дослідження парліфтного нагнітання і отримання його витратних характеристик;
- створення методики розрахунку витратних характеристик безмашинних нагнітачів на основі парліфта;
- структуризація витрат на отримання первинної Kr-Xe-суміші, що вилучається в процесі отримання основних продуктів розділення повітря, визначення її собівартості;
- розрахунок собівартості криптоноксенонового концентрату на виході з уста-

новки вторинного збагачення;

– визначення економічного ефекту від впровадження безмашинної ступені збільшення тиску на основі парліфта в установках збагачення криптооксенової суміші.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є технологія отримання криптооксенового концентрату з первинної Кг-Хе-суміші, вилучаємої на ПРУ. Предмет дослідження – характеристики і конструкції теплообмінних апаратів, що входять до складу системи збагачення, зокрема, теплообмінників-рекуператорів, конденсаторів-випарників, насадкових ректифікаційних колон, а також безмашинних струменевих нагнітачів на основі парліфта.

Методи дослідження. Теоретичні – при розробці схемних і конструктивних рішень і аналітичного дослідження роботи парліфтного нагнітача; розрахункові – при розробці програм розрахунків рекуперативних теплообмінних апаратів і конденсаторів-випарників; експериментальні – в процесі створення стенду і дослідження витратних характеристик парліфтного нагнітача.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Доведено в результаті порівняльного аналізу характеристик кожухотрубних витих та U-подібних теплообмінних апаратів, що найбільш ефективні рекуператори в установках збагачення криптооксенових сумішей слід створювати на основі прямо трубних U-подібних теплообмінних апаратів з оребреними дротом трубками.

2. Встановлено при дослідженні впливу на питому поверхню тепловіддачі та масу прямо трубних конденсаторів-випарників їх конструктивних параметрів, що зазначені питомі характеристики, по-перше, не залежать від числа труб у трубному пучку, по-друге, досягають найкращих значень при шаховому розташуванні кільцевих каналів.

3. Отримано вперше на експериментальній установці, яка не має аналогів, витратні $G-Q-h-d$ і $G-x-d$ -характеристики парліфтного нагнітача на температурному рівні 77,4...80 К при використанні рідкого азоту як модельної речовини.

4. Знайдена за допомогою обробки експериментальних даних залежність теплового навантаження, необхідного для забезпечення заданого напору і витрати рідини при певних значеннях геометричних розмірів напірної труби.

5. Удосконалена відома методика, запропонована професором В.М. Бродяньським, розрахунку собівартості криптооксенової суміші при одночасному виробництві декількох продуктів розділення повітря і виконана оцінка собівартості вилучення криптооксенової суміші у багатотонажних ПРУ з урахуванням рівнів оплати праці на різних металургійних підприємствах.

За результатами проведених досліджень можна сформулювати такі наукові положення:

1. Залежність витрати рідкого азоту та його напору від необхідної кількості теплоти, отримана при обробці результатів дослідження безмашинного нагнітача на основі парліфта, може використовуватися для розробки подібного нагнітача, що працює на рідкому кисні. Такий висновок дає можливість відмовитися від проведення експериментів з рідким киснем з-за його високої вибухонебезпечності.

2. Комплекс апаратів, що складається з стовпного конденсатора, парліфтного нагнітача і випарника, який забезпечує підвищення тиску криптооксе-

нової суміші до 0,6 МПа, замінює компресор в холодному блоці установки збагачення суміші. Виключення компресора з технологічної схеми установки знижує експлуатаційні витрати на одиницю продукту більше, ніж у 1,5 рази.

Крім цього, автор захищає:

– оригінальні конструктивні і схемні рішення, використані в експериментальній установці з дослідження парліфта, а також методику експерименту і обробки дослідних даних;

– дані експериментального визначення характеристик парліфтного нагнітача при використанні змінних трубок довжиною 6 м і внутрішнім діаметром 8-16 мм.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується задовільним збігом отриманих результатів розрахункових досліджень теплообмінних апаратів з даними інших авторів і експериментальних досліджень парліфтного нагнітача з параметрами роботи безмашинного пристрою підвищення тиску в умовах експлуатації дослідно-промислових установок для збагачення первинного криптооксенового концентрату нового покоління.

Наукове значення роботи.

На спеціально створеному стенді для дослідження безмашинного пристрою для підвищення потенційної енергії потоку на основі парліфта з рідким азотом у якості робочої речовини отримані витратні характеристики парліфтного нагнітача в області криогенних температур. Ці результати дозволили створити методику розрахунку теплового навантаження, що забезпечує задані напірно-витратні характеристики нагнітача при цілком певних геометричних параметрах напірної труби. Запропоновано спосіб перенесення отриманих результатів на інші робочі речовини.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Отримані значення коефіцієнтів перехресної взаємодії рівняння Редліха-Квонга-Соава дозволяють описувати властивості багатокомпонентних сумішей на основі криптоу і ксенону.

2. Розроблені методики та комп'ютерні програми для розрахунків теплообмінних апаратів, зокрема, теплообмінників-рекуператорів різних конструкцій, прямо трубних конденсаторів-випарників дають можливість спростити проектування криогенних установок для збагачення важких рідких газів.

3. Створена експериментальна установка для дослідження на рідкому азоті парліфтного нагнітача може використовуватися для отримання напірно-витратних характеристик з урахуванням інших умов роботи установки вторинного збагачення криптооксенової суміші.

4. Розроблена методика розрахунку витрат на вилучення криптооксенової суміші може застосовуватися для їх розрахунку в умовах отримання декількох продуктів розділення повітря в ПРУ. Дана методика дозволяє визначати витрати при отриманні криптооксенового концентрату в установках вторинного збагачення типу «Хром».

Особистий внесок здобувача полягає у вирішенні основних методичних, теоретичних і практичних питань, у тому числі:

– розробка алгоритмів (програм) розрахунку теплообмінних апаратів (рекуперативних теплообмінників, конденсаторів-випарників);

– проектування стендового обладнання для дослідження процесів в струмене-

вому безмашинному нагнітачі рідкого азоту.

Автору також належать: математична модель, результати експериментальних досліджень витратних характеристик парліфтного нагнітача при температурі 77,4 К і методика розрахунку теплового навантаження, забезпечуючого задані напірно-витратні характеристики парліфта з різними геометричними розмірами напірних труб.

Особистий внесок автора підтверджується публікаціями, підготовлених у спів-авторстві з науковим керівником. В них розкриваються основні напрямки досліджень, викладені в дисертаційній роботі. Виготовлення та випробування парліфтного нагнітача проведено з використанням лабораторно-аналітичної бази кафедри кріогенної техніки ОНАХТ та обладнання підприємства ТОВ «Айсблік», м. Одеса.

Апробація результатів дисертації. Основні положення, результати та висновки дисертації доповідались на V-ій міжнародній науково-технічній конференції «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 2011), I-ій міжнародній науково-практичній конференції «Технические науки – основа современной инновационной системы» (Йошкар-Ола, 2012), 14-ому міжнародному семінарі «Повышение эффективности и безопасности производств продуктов разделения воздуха» (Одеса, 2013), щорічній Науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології» (Одеса, 2011, 2012, 2013, 2014), Міжнародній конференції «Промышленные газы» (Москва, 2014).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковані в 5 статтях та 8 матеріалах конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаної літератури з 183 найменувань і містить 131 сторінку основного тексту, 22 таблиці і 65 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, відображений зв'язок з державними програмами, сформульовані мета та завдання дослідження. Приведені нові наукові результати, особистий внесок здобувача, відомості про апробації результатів дисертації.

Перший розділ. Дефіцит енергоресурсів змушує знижувати їх споживання. Зважаючи на постійне збільшення вартості енергоносіїв, зниження питомого енергоспоживання в різних технологічних процесах стає все більш актуальним. У кріогенній техніці необхідно підвищувати ефективність і економічність систем сепарації шляхом застосування перспективних схемних і конструкторських рішень, обліку властивостей компонентів сумішей, оптимізації процесів розподілу і вилучення цінних продуктів.

У першому розділі проведено аналіз технологій отримання інертних газів криптону і ксенону, сировиною для промислового виробництва яких є атмосфера Землі.

Технологічні прийоми вилучення Kr і Xe умовно розділені на дві групи в залежності від характеру фізичних процесів: адсорбційні і процеси фазової сепарації (дефлегмація, ректифікація, десублімація). У технологіях отримання інертних газів

вони використовуються в певній послідовності впродовж всього технологічного ланцюга: від ректифікації рідкого атмосферного повітря до отримання чистих товарних речовин (рис. 1).

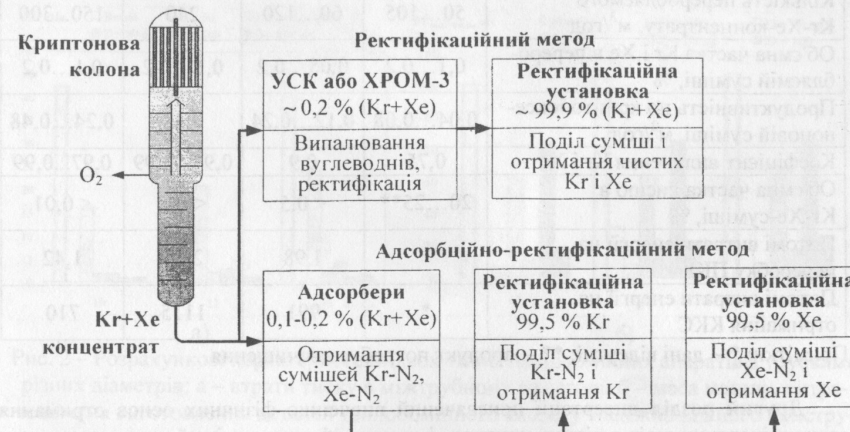


Рис. 1 – Основні етапи реалізації двох технологій вилучення криптону і ксенону

Основними етапами технології отримання чистих криптону і ксенону у відповідності з ректифікаційною технологією є:

- 1) виділення первинного концентрату, що містить 0,1...0,5 % Kr і Xe;
- 2) збагачення первинного концентрату, видалення з нього вибухонебезпечних домішок вуглеводнів та отримання чистої криптоноксенонової суміші;
- 3) поділ цієї суміші і виробництво чистих криптону і ксенону.

Найбільш витратним за величиною експлуатаційних витрат є другий етап технології. Це пов'язано з низьким вмістом цінних продуктів в первинному концентраті (обмеження викликані наявністю вибухонебезпечних домішок) і низьким надлишковим тиском $P < 0,02$ МПа. Для забезпечення технологічного перепаду тисків, необхідного для реалізації подальших операцій очистки, його недостатньо.

Отримання криптоноксенонової суміші до теперішнього часу здійснювалося на застарілих установках типу УСК, які характеризуються відносно низькою ефективністю. Більшість подібних установок виробили свій ресурс. Для їх заміни було розроблено більш прогресивне обладнання (табл. 1).

Одним із способів зниження експлуатаційних витрат зазначених систем може бути відмова від використання компресорів і перехід до безмашинних способів підвищення тиску потоку.

У першому розділі також розглянуті основні прийоми теплохолодопостачання ректифікаційних і сорбційних установок на базі різних кріогенних циклів і каскадних систем охолодження, а також наведено огляд типів теплообмінних апаратів і масообмінних поверхонь, що використовуються в насадкових ректифікаційних колонах.

Таблиця 1 – Основні характеристики установок збагачення Кг-Хе-суміші

Показник	УСК-1	УСК-1М	УСК-0,45	«Хром-3»
Кількість переробляемого Кг-Хе-концентрату, м ³ /год	50...105	60...120	240	150...300
Об'ємна частка Кг і Хе в переробляемій суміші, %	0,1...0,2	0,05...0,2	0,1...0,2	0,1...0,2
Продуктивність по криптоноксеноновій суміші, м ³ /год	0,04...0,08	0,12...0,24	0,48	0,24...0,48
Коефіцієнт вилучення Кг і Хе	0,75	0,9	0,97...0,99	0,97...0,99
Об'ємна частка кисню в Кг-Хе-суміші, %	20...25**	< 0,5	< 0,5	< 0,01
Питомі витрати енергії на переробку ПКК	*	1,98	2,35	1,42
Питомі витрати енергії на отримання ККС	*	991	1175	710

Примітки: * – дані відсутні; ** – продукт потребує доочищення

Другий розділ дисертації присвячений вивченню фізичних основ отримання важких інертних газів з різних криптон- і ксенон-містких сумішей, отриманих з повітря.

Властивості Кг-Хе-сумішей були описані з використанням рівняння стану Редліха-Квонга-Соава з класичним правилом змішування Ван-дер-Ваальса. Порівняння результатів розрахунку для сумішей Кг-Хе, Кг-О₂ і Кг-Н₂, отриманих на базі представленої методики, виявило, що вони добре узгоджуються з даними інших авторів в рамках експериментальної похибки. У роботі отримані коефіцієнти перехресної взаємодії, придатні для розрахунків властивостей багатокомпонентних сумішей на основі криптону і ксенону.

Теплообмінні апарати є невід'ємною складовою частиною технологічних процесів, пов'язаних з сепарацією газових сумішей. У дисертації було проведено аналіз роботи кожухотрубних апаратів для охолодження прямого потоку: витих з розрізаною навивкою і прямотрубних U-подібних. Результати розрахунків поверхні теплообміну, опору в міжтрубному просторі і металоємності апаратів показали, що U-подібні теплообмінні апарати для заданих умов є більш ефективними, ніж виті (рис. 2, а). Для виготовлення U-подібних теплообмінників потрібно значно менше матеріалу, ніж для витих апаратів (рис. 2, б). З досліджених апаратів оптимальним поєднанням можна вважати прямотрубний U-подібний теплообмінник з 27-ми оребрених дротом трубок діаметром 12 мм з діаметром кожуха 80 мм.

Ефективність роботи конденсаторів-випарників оцінювалася за їх питомими характеристиками: поверхню теплообміну і металоємність.

Питома поверхня теплообміну

$$f = \frac{F}{V} = \frac{4nD_3}{D_{\text{об}}^2}, \quad (1)$$

Питома металоємність

$$m = \frac{M}{V} = f \delta \rho, \quad (2)$$

де F – теплообмінна поверхня, м²; V – об'єм трубного простору, м³; n – число труб в

апараті, шт.; D_3 – зовнішній діаметр труби, м; $D_{\text{об}}$ – діаметр обичайки, м; M – маса апарата, кг; δ – товщина стінки труби, м; ρ – густина матеріалу, з якого виготовлені труби, кг/м³.

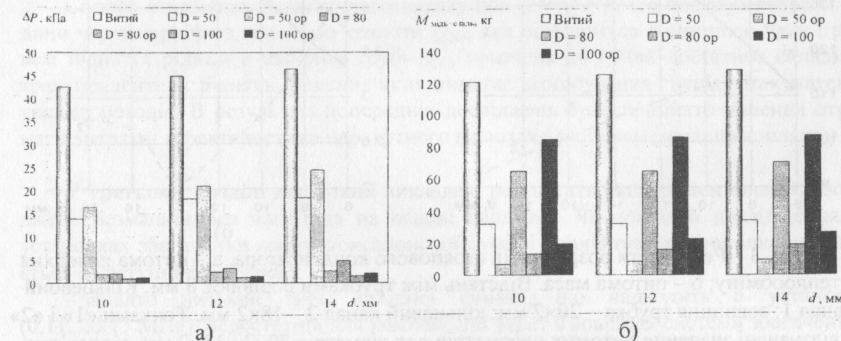


Рис. 2 – Розрахункові характеристики двох типів теплообмінних апаратів з трубками різних діаметрів: а – втрати тиску в міжтрубному просторі; б – маса металу, витраченого на виготовлення деталей теплообмінного апарату, залежно від його конструкції та наявності оребрення

У технологічному обладнанні використовують три основних способи розміщення труб в пучку: коридорне, шахове і радіальне. Вибір конкретної структури пучка задається наявним сортаментом труб і обмежений технологією з'єднання елементів трубної решітки. Мінімальна відстань між трубками знаходиться в інтервалі 6-10 мм.

В процесі дослідження трубчастих конденсаторів-випарників, що використовуються в якості стовпового конденсатора установки «Хром-3», було виявлено, що питома поверхня теплообміну, в цілому, зменшується з ростом діаметра трубок (рис. 3, а). Однак для одиночних труб Ø8×1 мм спостерігається оптимум. При цьому питома поверхня максимальна і дорівнює 113,4 м².

Для питомої маси пучка виявляється оптимум (мінімум, рис. 3, б) для труби 14×1 мм. Питома маса при цьому дорівнює 2,1 т/м³.

У цьому ж розділі викладені результати моделювання процесів в безмашинному пристрої підвищення тиску на основі парліфта.

Робота парліфта заснована на законі сполучених судин, заповнених різними по густині рідинами. Різниця густин створюється за рахунок випаровування частини рідини в одній з судин. Зазначені апарати перспективні для застосування в різних системах сепарації і особливо ефективні в установках, працюючих на криогенному рівні температур.

В даний час не існує суворої моделі для розрахунку витратних характеристик парліфта, що пов'язують тепловий потік, який підводиться до установки, з геометричними розмірами підйомної ділянки, що обмежує використання парліфта в низькотемпературних системах сепарації.

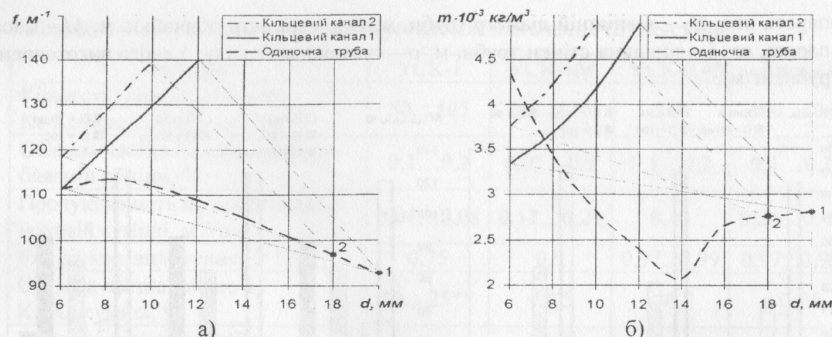


Рис. 3 – Результати розрахунків стовпового конденсатора. а – питома поверхня теплообміну; б – питома маса. Відстань між трубками дорівнює 8 мм. Кільцевий канал 1: зовнішня трубка – 20×2 мм; кільцевий канал 2 – 18×2 мм. Точками «1» і «2» відзначені значення питомих параметрів для діаметрів 20×2 і 18×2 мм, відповідно

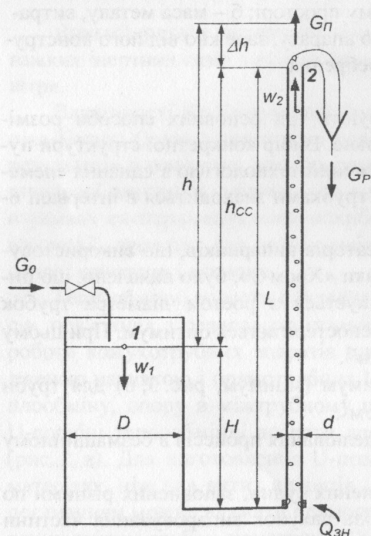


Рис. 4 – Схема роботи пристрою підвищення тиску потоку на основі парліфта

r – теплота випаровування досліджуваної речовини, кДж/кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; σ – коефіцієнт поверхневого натягнення, Н/м.

У процесі створення моделі були виділені такі характерні режими роботи описаного вище парорідкісного нагнітача:

1. При недостатній кількості парової фракції або маси заправленої рідини її рівень в підйомній трубці не досягне верхньої точки ($h < h_{cc}$ або $(H+h) < L$, рис. 4). Через це система не є проточною, описаний режим практикується в деяких вимірювальних приладах. Відповідно з відомими співвідношеннями для сполучених посудин (без урахування теплопритоків) отримаємо:

$$h = H \varphi \frac{\rho_p - \rho_{п}}{\rho_{см}} = H \varphi \frac{\rho_p - \rho_{п}}{(1 - \varphi) \rho_p + \varphi \rho_{п}}. \quad (3)$$

де $\rho_{п}$, ρ_p і $\rho_{см}$ – густини парової, рідкої фаз і суміші пар-рідини, відповідно, кг/м³; h і H – рівні підняття рідини у відповідності з рис. 4.

Об'ємний паровміст

$$\varphi = \frac{1,08 Q_{зн}}{d^2 r \rho_{п} \sqrt{\sigma g \frac{\rho_p - \rho_{п}}{\rho_p^2}}}, \quad (4)$$

де $Q_{зн}$ – зовнішнє теплове навантаження, Вт; d – внутрішній діаметр трубопроводу, м;

2. Рівень підняття парорідкісної суміші перевищує довжину підйомної труби ($h > h_{cc}$ або $(H+h) > L$). Вище підйомної ділянки рідина відділяється від пари і може бути подана в інші апарати системи сепарації.

Спроба отримання аналітичного виразу при $(H+h) > L$, що пов'язує витрати рідини через парліфт з кількістю теплоти $Q_{зн}$, яка підводиться в одиницю часу і рівнем підняття рідини в напірній трубці h_{cc} , призвела до появи достатньо складних трансцендентних рівнянь, рішення яких вимагає застосування спеціальних математичних методів. В результаті попередніх досліджень було прийнято рішення отримати витратні характеристики парліфтного нагнітача експериментальним шляхом.

У третьому розділі дисертації викладені результати експериментальних досліджень безмашинного нагнітача на основі парліфта. Як показали дослідження, в установках збагачення криптооксенонової суміші парліфтна ступінь використовується в наступних випадках:

- занадто низький тиск вихідної суміші, що надходить в установку (0,11...0,13 МПа), недостатній для компенсації втрат в апаратах системи збагачення;
- недостатній рівень в стовповому конденсаторі;
- існує необхідність інтенсифікувати тепломасообмінні процеси в установці.

У 2011-2013 рр. на кафедрі кріогенної техніки Одеської національної академії харчових технологій був розроблений стенд для дослідження роботи парліфтного нагнітача в області низьких температур (77,4...80 К). Виготовлення деталей, складання та випробування були проведені на технічній базі підприємства ТОВ «Айсблік» (м. Одеса). В якості робочого тіла був обраний рідкий азот внаслідок його безпеки для навколишнього середовища, нешкідливості для людини і відносно низької вартості.

Безмашинний нагнітач, що функціонує на кріогенному рівні температур, влаштований таким чином (рис. 5): ліва судина 1 діаметром 80 мм і висотою 4 м з'єднана з правою (напірною ділянкою) вентилем 3. Зона підведення тепла являє собою ємність діаметром 80 мм і висотою 350 мм з вбудованими ТЕНами 4. На кришці ємності розміщений вузол для підключення труб різного діаметру (8-16 мм). Особливостями стенду є:

- установка працює при атмосферному тиску;
- конструкція передбачає можливість заміни підйомної ділянки, повна довжина якої складає 6 м;
- тип пористої ізоляції – Армафлекс. Її товщина $\delta = 80$ мм;
- рідкий азот подається з кріоциліндра 11, розмішеного поряд з нагнітачем.

Оскільки дослідження проводилися в області низьких температур, на початку експериментів була зроблена оцінка величини теплопритоків до установки для врахування їх впливу на витратні характеристики пристрою. Результати показали задовільну збіжність розрахункових і експериментальних даних.

На другому етапі досліджували залежність витратних характеристик при змінному (спадному) рівні рідини в живильній судині 1. Для цього подачу рідкого азоту з кріоциліндра 11 закривали і фіксували зміну маси судини Дьюара 6 в рівні проміжки часу. Таким чином, була обчислена масова витрата речовини $G_p = (dm/dt)$. При цьому h_{cc} визначали як різницю довжини підйомної ділянки 2 і рівня суцільної рі-

дини в живильній судині 1. Витратні характеристики $G_p = f(h_{cc})$ при змінному рівні представлені на рис. 6 (лінія 1). Характеристика отримана при нульовій потужності електронагрівачів $Q_{zn} = 0$, коли випаровування азоту досягалося виключно за рахунок теплопритоків через ізоляцію підійомної труби 2.

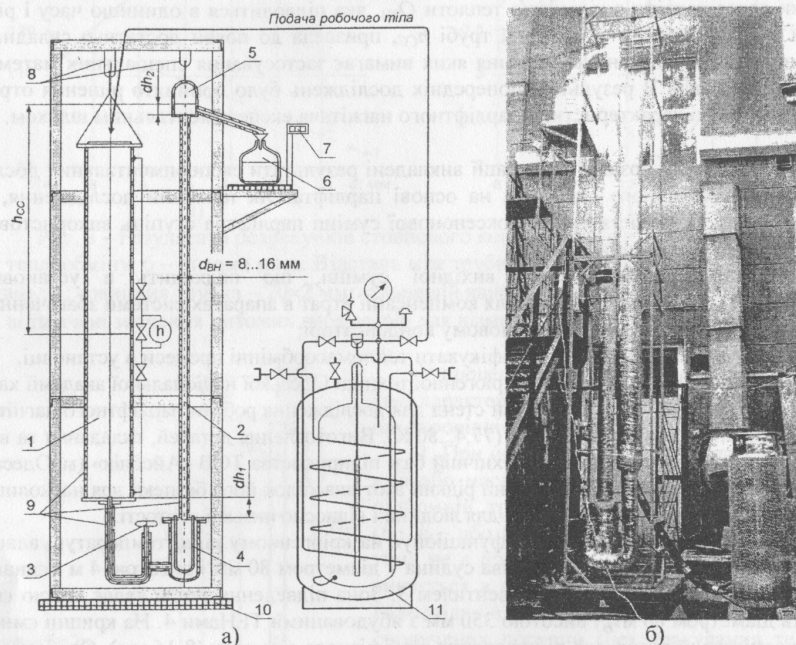


Рис. 5 – Схема (а) і зовнішній вигляд (б) установки для дослідження витратних характеристик парліфтного нагнітача: 1 – живильна судина діаметром 80 мм; 2 – підійомна ділянка труби; 3 – вентиль, що з'єднує судини; 4 – джерело зовнішнього тепла (ТЕНи); 5 – сепаратор; 6 – судина Дьюара; 7 – електронні ваги (малі); 8 – підвіски; 9 – низькотемпературна теплоізоляція; 10 – електронні ваги (великі); 11 – джерело робочого тіла (кріоциліндр)

Повторення операцій з підведенням теплоти Q_{zn} дозволило побудувати набір витратних характеристик парліфтного нагнітача (див. рис. 6, а, лінії 2-3, рис. 6, б, лінії 2-5). Аналіз результатів показав, що в дослідженому інтервалі геометричних параметрів для однакового сумарного навантаження Q_{Σ} зі зменшення діаметра підійомної ділянки витрата рідини зменшується, а напір h_{cc} (або ΔP), забезпечений нагнітачем, збільшується.

На рис. 7 представлені витратні характеристики у вигляді залежності $G_p = f_2(Q_{\Sigma}, h_{cc})$. З діаграм випливає, що для кожного діаметру труби і фіксованого значення напору h_{cc} існує оптимальне значення теплового навантаження, при кот-

рому витрата через напірну ділянку буде максимальною. Наприклад, для діаметра 10 мм (рис. 7, а, крива 3) і $h_{cc} = 480$ см це $Q_{\Sigma} = 130$ Вт. При цьому значення витрати досягає величини 0,35 кг/хв.

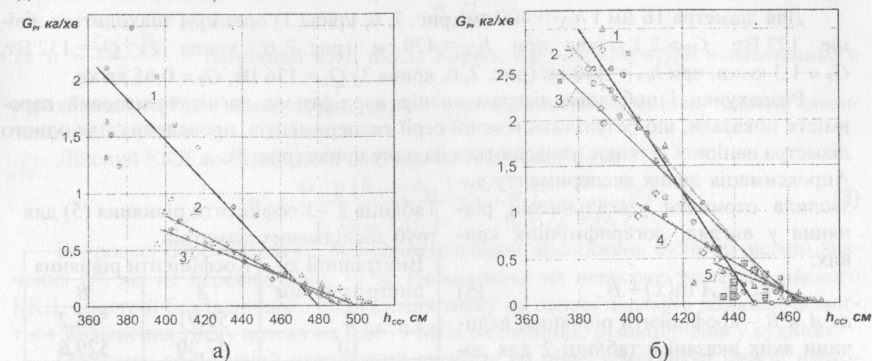


Рис. 6 – Витратні G_p - Q - h_{cc} -характеристики парліфта для труб із внутрішніми діаметрами 10 (а) і 16 мм (б): Q_{zn} – зовнішнє навантаження, Вт; Q_{Σ} – сумарний тепловий потік з урахуванням теплопритоків, Вт; а (лінія 1) – $Q_{zn} = 0$ ($Q_{\Sigma} = 121,7$); (лінія 2) – 2,6 (124,3); (лінія 3) – 15,3 (137); б (лінія 1) – $Q_{zn} = 0$ ($Q_{\Sigma} = 127,3$); (лінія 2) – 5,4 (132,7); (лінія 3) – 9,0 (136,3); (лінія 4) – 14,7 (142); (лінія 5) – 40,0 (167,3)

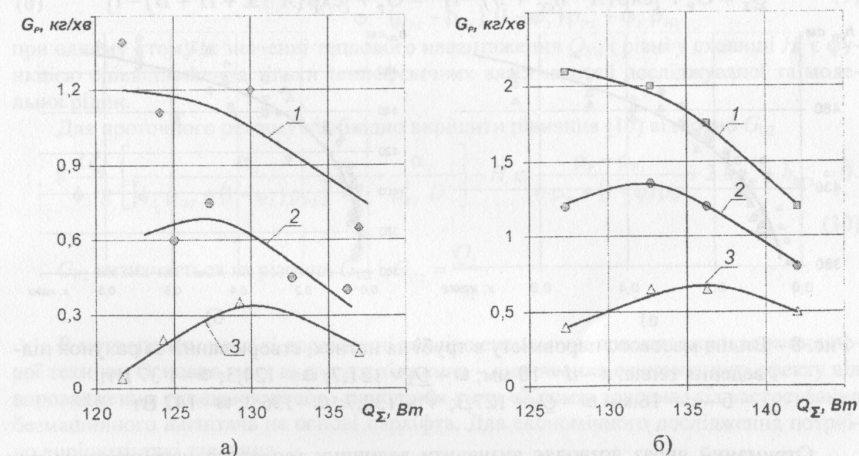


Рис. 7 – Витратні G_p - Q - h_{cc} -характеристики парліфта в координатах Q_{Σ} - G_p для труб діаметром $d = 10$ мм (а) і $d = 16$ мм (б). Позначення: а: 1 – $h_{cc} = 400$; 2 – 440; 3 – 480 см; б: 1 – $h_{cc} = 400$; 2 – 420; 3 – 440 см

Для $h_{CC} < 400$ см (рис. 7, а, крива 1) оптимум знаходиться лівіше $Q_{\Sigma} = 125$ Вт, а витрати $G_p \approx 1,2$ кг/хв; для $h_{CC} = 440$ см (рис. 7, а, крива 2) $Q_{\Sigma} = 127$ Вт, витрати $G_p \approx 0,7$ кг/хв.

Для діаметра 16 мм і $h_{CC} = 400$ см (рис. 7, б, крива 1) оптимум знаходиться лівіше 127 Вт, $G_p \approx 2,1$ кг/хв; при $h_{CC} = 420$ см (рис. 7, б, крива 2) $Q_{\Sigma} = 132$ Вт, $G_p \approx 1,3$ кг/хв; при $h_{CC} = 440$ см (рис. 7, б, крива 3) $Q_{\Sigma} = 136$ Вт, $G_p \approx 0,65$ кг/хв.

Розрахунки і побудова діаграм «напір парліфтного нагнітача-масовий паровміст» показали, що результати кожної серії експериментів, проведених для одного діаметра напірної ділянки, укладаються на одну криву (рис. 8).

Апроксимація даних експерименту дозволила отримати узагальнюючі рівняння у вигляді логарифмічних кривих:

$$h_{CC} = A \ln(x) + B, \quad (5)$$

де A і B – коефіцієнти рівняння, величини яких вказані в таблиці 2 для досліджених діаметрів труб d і фіксованої довжини $L = 6$ м. Шляхом нескладних

перетворень можна отримати вираз для величини теплового навантаження, котра може забезпечити задані напір і витрати через парліфтний нагнітач.

$$Q_{\Sigma} = G_p r [\exp(A - h_{CC} + B) - 1]^{-1} = G_p r [\exp(A - L + H + B) - 1]^{-1} \quad (6)$$

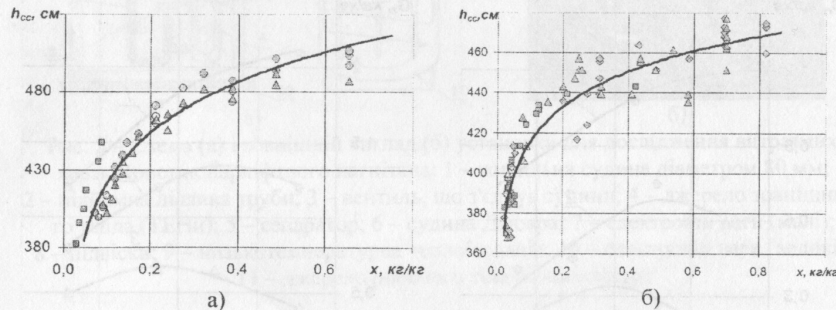


Рис. 8 – Вплив масового паровмісту в трубі на натиск, створюваний за рахунок підведення тепла. а – $d = 10$ мм; ■ – $Q_{\Sigma} = 121,7$; ▲ – $124,3$; ● – 137 Вт; б – $d = 16$ мм ■ – $Q_{\Sigma} = 127,3$; ◆ – $132,7$; ▲ – $136,3$; ■ – 142 Вт

Отриманий вираз дозволяє визначити величину теплового навантаження при заданих напірі і витраті через парліфтний нагнітач (довжині напірної ділянки та рівня рідини в лівій судині) за умови, що відома витратна характеристика парліфта $h_{CC} = f_3(x)$, отримана експериментально при фіксованих геометричних параметрах напірної ділянки парліфтного нагнітача.

ККД ідеалізованого парліфтного нагнітача, який використовується як струменевий насос,

$$\eta_{\text{ид}} = \frac{G_p g h_{CC}}{\eta_i Q_{\Sigma}}, \quad (7)$$

де $\eta_i = \frac{T_{\text{НС}} - T_{\Sigma}}{T_{\text{НС}}}$ – термічний ККД циклу Карно; $T_{\text{НС}}$ – температура навколишнього середовища, К; T_{Σ} – температура, на рівні якої підводиться зовнішнє теплове навантаження, К.

Дійсний ККД досліджуваної системи на основі парліфта

$$\eta^{\text{д}} = \frac{G_p g (h_{CC} - h_{\text{BT}})}{\eta_i (Q_{\Sigma} + Q_{\Gamma})} = \frac{G_p g (L - H - h_{\text{BT}})}{\eta_i (Q_{\Sigma} + Q_{\Gamma})}. \quad (8)$$

В процесі обробки даних експериментальних досліджень були обчислені значення $\eta^{\text{д}}$, які не перевищували 10 %. Незважаючи на невисокі значення дійсного ККД, пристрій безмашинного підвищення тиску на основі парліфта дозволяє домогтися збільшення тиску потоку на 0,0079 МПа на одиницю різниці рівнів у судинах.

Особливо ефективний парліфтний нагнітач на рівні температур нижче навколишнього середовища, де підведення теплоти не вимагає додаткових енерговитрат.

Перехід на криптоноксенонову суміш на основі кисню буде супроводжуватися зміною напірно-витратних характеристик парліфта, пов'язаних зі зміною теплофізичних властивостей робочої речовини. Наприклад, для режиму $(H+h) < L$ рівень підняття рідини в тій же самій трубі

$$h_{CC2} = h_{CC1} \frac{\varphi_2 (\rho_{P2} - \rho_{P2}) (1 - \varphi_1) \rho_{P1} + \varphi_1 \rho_{P11}}{\varphi_1 (\rho_{P1} - \rho_{P11}) (1 - \varphi_2) \rho_{P2} + \varphi_2 \rho_{P12}} \quad (9)$$

при одному і тому ж значенні теплового навантаження Q_{Σ} і рівні у сховищі H , є функцією співвідношення тільки теплофізичних властивостей досліджуваної та модельної рідин.

Для проточного режиму необхідно вирішити рівняння (10) відносно G_{02}

$$8 \frac{G_{02}^2}{\varphi_2 g} \left[\frac{\alpha_2}{[\varphi_2 \rho_{P12} + (1 - \varphi_2) \rho_{P2}]^2 d^4} - \frac{\alpha_2}{\rho_{P2}^2 D^4} \right] - H \varphi \frac{\rho_P - \rho_{P1}}{\varphi \rho_{P1} + (1 - \varphi) \rho_P} + 2 h_{CC2} + h_{\text{BT2}} = 0. \quad (10)$$

G_{P2} визначається як різниця G_{02} і $G_{P1} = \frac{Q_{\Sigma}}{r_{P2}}$.

В четвертому розділі досліджені техніко економічні аспекти впровадження нової техніки. Основна мета цього дослідження – визначення економічного ефекту від впровадження установок нового покоління типу «Хром», зокрема, від застосування безмашинного нагнітача на основі парліфта. Для економічного дослідження потрібно вирішити такі завдання:

- визначення капітальних вкладень і експлуатаційних витрат на впровадження установок нового типу;
- розрахунок собівартості криптоноксенової суміші, яка одержується в установках «Хром-3»;

– аналіз статей витрат у собівартості продукції з метою пошуку шляхів їх зниження;

– визначення частки вихідної криптоноксенонової суміші в загальних витратах на експлуатацію установки збагачення. Для реалізації цього завдання необхідно розрахувати собівартість зазначеної суміші в умовах отримання декількох цільових продуктів поділу повітря (кисню, азоту, аргону, криптоноксенонової і неонгелієвої сумішей);

– розрахунок економії енергоресурсів та фонду зарплати від впровадження безмашинного нагнітача натомість стиснення вихідної суміші в компресорі.

Спочатку були досліджені методи визначення собівартості газів в разі виробництва декількох продуктів, зокрема, криптоноксенонової суміші, яка отримується у вигляді побічного продукту розділення повітря. В якості об'єкта дослідження вибрано кисневий виробництво великого металургійного підприємства (рис. 9).

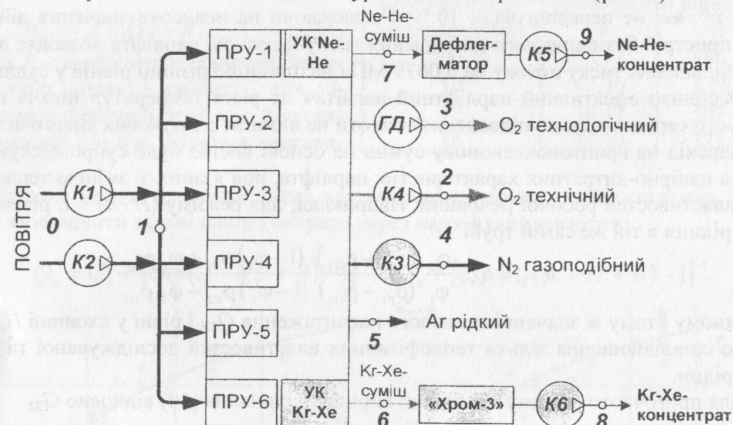


Рис. 9 – Спрощена схема кисневого виробництва: УК Ne-Ne і УК Kr-Xe – установки концентрування неонгелієвої і криптоноксенонової сумішей, відповідно; К1-К5 – компресори; ГД – газодувка

Повна заводська собівартість одиниці продукції визначалась за формулою:

$$S_{\text{п}} = S_{\text{Е}} + S_{\text{А}} + S_{\text{З}} + S_{\text{ц}} + S_{\text{зв}}, \text{ грн./м}^3, \quad (8)$$

де $S_{\text{Е}}$ – питомі витрати енергії (електроенергія, пара і вода на технічні потреби) на електроенергія, пара і вода на технічні; $S_{\text{А}}$ – питомі амортизаційні відрахування; $S_{\text{З}}$ – заробітна плата персоналу, що обслуговує установку, віднесена до одиниці продукції; $S_{\text{ц}}$ – питомі цехові витрати; $S_{\text{зв}}$ – питомі загальнозаводські витрати.

Для аналізу собівартості був обраний «енергетичний» метод розрахунку собівартості, розроблений на основі робіт В.М. Бродяньського. Метод передбачає розподіл витрат між продуктами не тільки відповідно до їх обсягів по об'ємним витратам, але і враховує стан потоків на виході установки (концентрація, відхилення від параметрів навколишнього середовища і т.п.).

Аналіз отриманих результатів показав, що основний внесок у собівартість вносять енергетичні витрати: електроенергія на привід устаткування, витрата пара на забезпечення роботи установки і води на технічні потреби. Другою за величиною статтею витрат є загальнозаводські витрати. Витрати на утримання і експлуатацію устаткування (ВУЕУ) в сумі становлять близько половини загальнозаводських витрат. Внесок фонду оплати праці в собівартість Kr-Xe-суміші не перевищує 5 % залежно від рівня зарплат, прийнятого в металургійній галузі.

Основною статтею витрат на отримання концентрату в установці «Хром-3» є енергетичні витрати (60 %), що включають споживання рідкого азоту (джерело холоду), стисненого повітря (джерело тепла), електроенергії (стиснення Kr-Xe концентрату) і води. Витрати на оплату праці становлять близько 17 %. Частка вихідної Kr-Xe-суміші в собівартості 1 м³ концентрату – всього 9 % від загальних витрат на його отримання.

Оцінка ефективності використання безмашинних нагнітачів в установках збагачення криптоноксенонової суміші проведена на підставі аналізу питомого енергоспоживання близьких по продуктивності установок типу УСК-1М, УСК-0,45 і «Хром-3». Загальний економічний ефект від впровадження безмашинних пристроїв підвищення тиску на основі парліфта (рис. 10) складається з економії енергії на стиснення в компресорі (менше, ніж для УСК-0,45 в 1,6 рази) та економії коштів на оплату персоналу (в 1,5 разів менше).

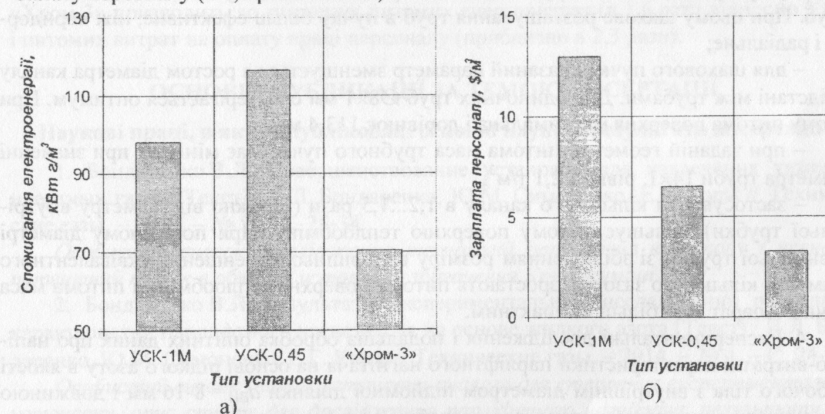


Рис. 10 – Питоме енергоспоживання (а) і витрати на оплату праці персоналу (б) установок збагачення Kr-Xe-суміші

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертації отримано нове рішення науково-практичної задачі, спрямованої на підвищення ефективності криогенних установок, зокрема, установок для збагачення первинної криптоноксенонової суміші. На підставі проведеного дослідження сформульовані наступні висновки та рекомендації.

1. Найбільш витратним етапом у технологічній послідовності отримання крип-

тону і ксенону з повітря є збагачення первинної криптоноксенонової суміші, яка отримується на ВРУ. Для зниження питомого енергоспоживання установок збагачення потрібно неухильно підвищувати ефективність і економічність сепараторів шляхом застосування більш досконалих схемних і конструкторських рішень, раціональної організації тепло- і масообмінних процесів, врахування складів сумішей, які змінюються в установці, та їх термодинамічних властивостей.

2. Серед можливих типів кожухотрубних рекуперативних теплообмінників, які оцінюються за трьома критеріями (поверхня теплообміну; опір в міжтрубному просторі; металоємність), кращими для роботи в установках збагачення важких інертних газів є прямотрубні апарати з оребреними дротом трубками. У цих апаратів поверхня теплообміну і опір газу в міжтрубному просторі значно нижче. Найбільш ефективним для застосування в установці виявився U-подібний теплообмінник з 27-ми оребрених труб діаметром 12 мм, укладених в кожух діаметром 80 мм.

3. Для створення ефективного конденсатора-випарника з круговою або кільцевою формою конденсаційного каналу (в перпендикулярному перетині) для застосування його в установці збагачення криптоноксенонової концентрату необхідно використовувати наступні конструктивні рішення і результати розрахункових досліджень, що підвищують інтенсивність теплопередачі між потоками середовищ і які сприяють зменшенню маси і габаритів апарату:

- у пучку з одиночних труб питома поверхня теплообміну не залежить від числа труб. При цьому шахове розташування труб в пучку більш ефективне, ніж коридорне і радіальне;

- для шахового пучка вказаний параметр зменшується з ростом діаметра каналу і відстані між трубами. Для одиночних труб $\varnothing 8 \times 1$ мм спостерігається оптимум. При цьому питома поверхня максимальна і дорівнює $113,4 \text{ м}^2$;

- при заданій геометрії питома маса трубного пучка має мінімум при значенні діаметра труби 14×1 , рівний $2,1 \text{ т/м}^3$;

- застосування кільцевого каналу в 1,2...1,5 рази (залежно від діаметру внутрішньої трубки) збільшує питому поверхню теплообміну. При постійному діаметрі зовнішньої трубки зі збільшенням розміру внутрішньої (зменшення еквівалентного діаметра кільцевого зазору), зростають питома поверхня теплообміну і питома маса пучка. Апарат стає більш компактним.

4. Експериментальні дослідження і подальша обробка опитних даних про напірно-витратні характеристики парліфтного нагнітача на основі рідкого азоту в якості робочого тіла з внутрішнім діаметром підйомної ділянки $d_{\text{вн}} = 8-16$ мм і довжиною 6 м можуть використовуватися для розробки ефективного безмашинного нагнітача для установок збагачення Kr-Xe-суміші з урахуванням наступних виявлених закономірностей:

- При рівних значеннях сумарного теплового навантаження Q_{Σ} зменшення діаметра підйомної ділянки призводить до зниження витрати рідини G_p і зростанню напору $h_{\text{сст}}$.

- Для кожного діаметра труби і постійного напору існує оптимальне значення теплового навантаження, при якому витрата через підйомну ділянку буде максимальна.

- Дані експериментів, проведених при фіксованих значеннях геометричних па-

раметрів (діаметра і висоти напірної ділянки), в координатах $h_{\text{сст}} = f(x)$ лягають на одну криву. Апроксимація експериментальних даних залежністю $h_{\text{сст}} = A \ln(x) + B$ дає можливість отримати вираз для розрахунку величини теплового навантаження, необхідного для забезпечення заданих напору і витрати через парліфтний нагнітач.

- Підвищення витрати через парліфт при незмінному напорі можна домогтися, збільшивши площу поперечного перерізу правої судини шляхом пропорційного збільшення числа труб напірної ділянки.

5. Основний внесок у собівартість побічних ПРП вносять енергетичні витрати: електроенергія на привід устаткування, витрата пари на забезпечення роботи установки і води на технічні потреби. Витрати на утримання та експлуатацію обладнання в сумі складають близько половини загальнозаводських витрат. Внесок фонду оплати праці в собівартість Kr-Xe-суміші не перевищує 5 % в залежності від рівня зарплат, прийнятого в металургійній галузі. Головною статтею витрат на збагачення первинної криптоноксенонової суміші та отримання концентрату в установці типу «Хром-3» є енергетичні витрати (60 %), що включають споживання рідкого азоту, стисненого повітря, електроенергії та води. Витрати на оплату праці становлять близько 17 %. Частка вихідної Kr-Xe-суміші в собівартості 1 м^3 концентрату – всього 9 % від загальних витрат на його отримання.

6. Впровадження безмашинного нагнітача на основі парліфта в установці «Хром-3» призводить до зниження питомих енерговитрат (в 1,6 рази відносно УСК) і питомих витрат на оплату праці персоналу (приблизно в 2,3 рази).

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бондаренко В.Л. Совершенствование установок для извлечения тяжелых инертных газов [Текст] / В.Л. Бондаренко, Ю.М. Симоненко, Е.Г. Корж // Технические газы. – 2013. – № 5. – С. 25-34.

Особистий внесок: дослідження технологій отримання криптону і ксенону, патентний пошук в області установок збагачення Kr-Xe-суміші.

2. Бондаренко В.Л. Результаты экспериментальных исследований расходных характеристик парлифтного нагнетателя на основе жидкого азота [Текст] / В.Л. Бондаренко, Ю.М. Симоненко, Е.Г. Корж // Технические газы. – 2014. – № 1. – С. 24-31.

Особистий внесок: пошук установки-аналога для створення експериментальної установки, опис стенду для дослідження парліфтного нагнітача, результати досліджень.

3. Бондаренко В.Л. Установка для исследования расходных характеристик парлифтного нагнетателя на основе жидкого азота [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж, О.В. Дьяченко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 5. – С. 22-26.

Особистий внесок: опис конструкції установки для дослідження парліфтного нагнітача, результати досліджень.

4. Бондаренко В.Л. Экономические аспекты получения и обогащения криптоноксеноновой смеси [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж, Т.В. Дьяченко, О.В. Дья-

ченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – № 1. – С. 4-9.

Особистий внесок: пошук методу розрахунку собівартості криптооксенонової суміші, одержуваної в якості побічного продукту ПРУ, результати розрахункових досліджень.

5. Бондаренко В.Л. Теплофизические свойства целевых и побочных продуктов в составе Kr-Xe-концентратов и рабочих тел в контурах обеспечения сепарации [Текст] / В.Л. Бондаренко, С.В. Артеменко, Е.Г. Корж // Холодильная техника и технология. – 2014. – № 5 (151). – С. 61-68.

Особистий внесок: результати розрахунків властивостей криптон і ксенон містких сумішей на основі рівняння Редліха-Квонга-Соави.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

1. Бондаренко В.Л. Современные технологии получения криптона и ксенона из воздуха [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж // Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології». – Одеса: ОДАХ. – 2011. – С. 128-130.

2. Бондаренко В.Л. Современные установки в технологии получения криптона и ксенона из воздуха [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж // V-я Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Материалы конференции. – СПб. – 2011. – С. 70-71.

3. Бондаренко В.Л. Безмашинные методы повышения давления в технологии обогащения [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології». – Одеса: ОНАХТ. – 2012. – С. 129-131.

4. Бондаренко В.Л. Экспериментальная установка для моделирования парлифта при температуре 77,4 К [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж // Приволжский научно-исследовательский центр. Сборник материалов первой международной научно-практической конференции «Технические науки – основа современной инновационной системы». – Йошкар-Ола, РФ. – 2012. – С. 53-54.

5. Бондаренко В.Л. Экспериментальная установка для изучения работы парлифта [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології». – Одеса: ОНАХТ. – 2013. – С. 148-149.

6. Бондаренко В.Л. Экспериментальная установка для изучения работы парлифта. Разработка методики испытаний [Текст] / В.Л. Бондаренко, Ю.М. Симоненко, Е.Г. Корж // Збірник тез доповідей IX-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології». – Одеса: ОНАХТ. – 2013. – С. 184-186.

7. Бондаренко В.Л. Результаты экспериментальных исследований расходных характеристик парлифтного нагнетателя [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології». – Одеса: ОНАХТ. – 2014. – С. 118-120.

8. Бондаренко В.Л. Экспериментальные исследования расходных характеристик

парлифтного нагнетателя на основе жидкого азота [Текст] / В.Л. Бондаренко, Е.Г. Корж, Т.В. Дьяченко // Международная конференция «Промышленные газы». – Москва, РФ. – 2014.

АННОТАЦИЯ

Корж Е.Г. Совершенствование технологических процессов в установках получения криптооксенонового концентрата. – 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, МОН Украины, Одесса, 2014 г.

Проведено исследование технологий получения тяжелых инертных газов (криптона и ксенона) из воздуха. Особое внимание было уделено этапу обогащения криптооксеноновой смеси. Анализ известных технологий показал, что этот этап является наиболее энергос затратным.

Изучены витые и прямотрубные U-подобные кожухотрубные теплообменники, применяемые в установках обогащения Kr-Xe-смеси нового поколения для охлаждения прямого потока. В результате сравнительных исследований поверхности теплообмена, потерь давления в межтрубном пространстве и удельной металлоемкости доказано, что более эффективным типом из исследованных аппаратов являются U-подобные теплообменники с оребренными проволокой трубками.

Исследование конструктивных параметров прямотрубных конденсаторов-испарителей показало, что наиболее эффективным является шахматное расположение кольцевых каналов. Применение кольцевого канала в 1,2...1,5 раза (в зависимости от диаметра внутренней трубки) увеличивает удельную поверхность теплообмена.

Исследовано безмашинное устройство увеличения потенциальной энергии потока на основе парлифта. Создана экспериментальная установка для исследования нагнетателя с напорным участком трубы длиной 6 м и внутренним диаметром 8-16 мм в области низких температур. Получены его расходные $G_{ж-Q-h_{ж-д}}$ и $G_{ж-x-d}$ -характеристики на модельном веществе (жидком азоте) на температурном уровне 77,4...80 К. Обработка данных экспериментов позволила получить аналитическую зависимость тепловой нагрузки, необходимой для обеспечения заданных напора и расхода жидкости при известных геометрических параметрах напорной трубы.

Произведена оценка себестоимости криптооксеноновой смеси, извлекаемой в качестве побочного продукта разделения воздуха. Расчеты показали, что основной вклад в себестоимость криптооксеноновой смеси вносят энергетические затраты (70...80 % общих затрат). Общепроизводственные затраты и расходы на содержание и эксплуатацию оборудования – 20...30 %. Вклад фонда оплаты труда в себестоимость Kr-Xe-смеси составляет от 2 до 5 % в зависимости от уровня зарплат, принятого в металлургической отрасли.

При обогащении первичной криптооксеноновой смеси в установке типа «Хром-3» определяющими являются затраты энергии (60 %). Из них 7 % расходует на сжатие производственного криптооксенонового концентрата. Оплата труда составляет около 17 % суммарных затрат. Доля исходной Kr-Xe-смеси в себестоимости 1 м³ концентрата – около 9 % от общей суммы затрат на его получение.

Оценка эффективности использования безмашинного нагнетателя в установках обогащения криптоноксеноновой смеси, показала, что общий экономический эффект от внедрения безмашинного устройства повышения давления на основе парліфта складывается из экономии энергии на сжатие в компрессоре (меньше, чем для УСК-0,45 в 1,6 раза) и экономии средств на оплату персонала (в 1,5 раза меньше).

Ключевые слова: криптон; ксенон; обогащение; сепарация; ректификация; удельное энергопотребление; себестоимость продуктов разделения воздуха.

АНОТАЦІЯ

Корж Є.Г. Вдосконалення технологічних процесів в установках отримання криптоноксенонового концентрату. – 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, МОН України, Одеса, 2014 р.

Проведено дослідження технологій отримання важких інертних газів (криптон і ксенон) з повітря. Аналіз відомих технологій збагачення криптоноксенов суміші показав, що цей етап є найбільш енерговитратним.

Вивчені системи теплохолодопостачання установок сепарації і окремих апаратів, витих U-подібних кожухотрубних теплообмінників-рекуператорів; конструкцій прямотрубних конденсаторів-випарників.

Створена експериментальна установка для дослідження безмашинного пристрою збільшення потенційної енергії потоку на основі парліфту з напірною ділянкою труби довжиною 6 м і внутрішнім діаметром 8-16 мм на модельній речовині (рідкому азоті). Визначені витратні $G_p-Q-h_{cc}-d$ і G_p-x-d характеристики парліфтного нагнітача на температурному рівні 77,4...80 К. Отримана аналітична залежність теплового навантаження, необхідного для забезпечення заданих напору і витрати рідини при заданих геометричних параметрах напірної труби.

Розраховані складові собівартості криптоноксенов суміші, що отримується у ПРУ. Проведено аналіз витрат на виробництво криптоноксенов концентрату в установці типу «Хром-3» та ефективності використання безмашинного пристрою на основі парліфту.

Ключові слова: криптон; ксенон; збагачення; сепарація; ректифікація; питоме енергоспоживання; собівартість продуктів розділення повітря.

ABSTRACT

Korzh E.G. Improvement of technological processes in the plants of Kr-Xe concentrate receiving. – Manuscript.

Dissertation for the degree of the candidate of engineering sciences in the Specialty 05.05.14 – Refrigerating, vacuum and compressor technique, air conditioning systems. – Odessa national academy of food technologies, MES of Ukraine, Odessa, 2014.

They are studied of technologies for production of heavy rare gases (krypton and xenon) from the air. Analysis of the known enrichment technologies of Kr and Xe mixture is showed that this phase is the most energy-consuming.

They are investigated the systems of heat and cooling supply separation installations

and separate devices. The optimization twisted and U-shaped shell and tube heat exchangers; design of straight-tube condensers-evaporators.

Experimental installation for research of non-machine device to increase the potential energy of the flow on the basis of vapor-lift with pressure portion of the pipe length of 6 m and an inner diameter of 8-16 mm in a model substance (liquid nitrogen). Defined consumables $G-Q-h-d$ and $G-x-d$ characteristics vapor-lift supercharger at a temperature level 77.4...80 K. The analytical dependence of the heat load required to ensure the specified pressure and flow rate at the given geometrical parameters of the standpipe.

The components of Kr-Xe mixture cost produced in the ASU are calculated. It is analyzed the cost of production of Kr-Xe concentrate in the installation type "Chromium-3" and effective of use the machineless device on the basis of vapor-lift.

Keywords: krypton; xenon; enrichment; separation; rectification; specific energy consumption; the cost of air separation products.

Підписано до друку 22.12.2014 р.
Формат 60х84/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times. Друк різнографічний.
Зам. № 31. Тираж 70 прим.

Надруковано ТОВ "Зовнішнєрекламсервіс"
65011, м.Одеса, вул. Успенська, 40.
тел. 37-70-76, 777-70-76