

Автореферат
К 76 Н

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ.
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

С. Кош

КОШОВИЙ СЕРГІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 621.57

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ
ОЧИЩЕННЯ НЕОНОГЕЛІЄВОЇ СУМІШІ НА
ОСНОВІ ГАЗОДИНАМІЧНИХ КРІОГЕНЕРАТОРІВ**

Спеціальність 05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна
техніка, системи кондиціювання

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
Бондаренко Віталій Леонідович
завідуючий кафедрою кріогенної техніки,
Одеської державної академії холоду
МОНМС України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Мазур Віктор Олександрович,
завідуючий кафедрою технічної термодинаміки,
Одеської державної академії холоду
МОНМС України.

кандидат технічних наук, доцент,
Петухов Ілля Іванович
старший науковий співробітник
кафедри аерокосмічної теплотехніки
Національний аерокосмічний університет
ім. М.С. Жуковського «ХАІ»,
МОНМС України.

Захист дисертації відбудеться «14» березня 2011 р. в ^{14⁰⁰} годин в ауд. 8 на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д.41.087.01 при Одеській державній академії холоду за адресою: вул. Дворянська, 1/3, Одеса, Україна, 65082.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеської державної академії холоду

Копія розісланий «5» лютого 2011 року.

Мілованов В.І.

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Сфера застосування кріогенних технологій стрімко збільшується, охоплюючи усе більше напрямків життєдіяльності людини. Найважливіша область використання низьких температур – сепарація газових сумішей. З атмосфери у вигляді побічних продуктів отримують інертні гази, серед яких неон та гелій. Ці легкі гази відіграють особливу роль в багатьох галузях сучасної техніки. Постійне зростання споживання продуктів на основі інертних газів диктує необхідність розширення сировинної бази та підвищення економічності виробництва первинного концентрату. Низькотемпературні процеси поділу газових сумішей досить енергоємні. Один з резервів зниження експлуатаційних витрат - використання для одержання холоду перепадів тиску, наявних у кріогенних сепараторах. Перспективним видом розширювального обладнання є хвильові газодинамічні кріогенератори (ХКГ), які поєднують ряд важливих якостей: простоту, надійність, здатність відводити енергію від робочого тіла на суттєво більш високий температурний рівень. Широкому впровадженню ХКГ у технологіях отримання легких інертних газів перешкоджають відносно низька енергетична ефективність та необхідність узгодження характеристик штатного устаткування, до якого додатково вводять ХКГ. Таким чином, удосконалення немашинних процесів охолодження дозволить підвищити ефективність систем отримання неонгелієвої суміші та є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до програми фундаментальних та пошукових досліджень «Новітні та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та АПК», згідно із Законом України про пріоритетний напрямок розвитку науки й техніки від 11.07.2001 №2623-III, перспективними напрямками по створенню нової техніки фірми «Айсблік».

Мета та завдання досліджень. Мета роботи полягає в удосконаленні технології очищення неонгелієвої суміші та підвищенні її ефективності за рахунок включення в систему газодинамічних кріогенераторів на рівні температур 65...78 К.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені наступні **основні завдання:**

1. Провести аналіз існуючих технологій, які забезпечують процеси отримання неону (гелію) у цілому та додаткового збагачення неонгелієвої суміші в окремих дефлегматорах.
2. Вивчити альтернативні способи зниження енергоспоживання промислових дефлегматорів на основі немашинних охолоджувачів, що використовують хвильові газодинамічні процеси.
3. Розробити схеми інтеграції газодинамічних кріогенераторів в технологію збагачення та очищення неонгелієвої суміші.
4. Створити експериментальну установку для дослідження хвильових кріогенераторів (ХКГ) та визначити оптимальні експлуатаційні умови для реалізації газодинамічних процесів в промислових системах очищення.
5. Оцінити енергетичні переваги, обумовлені включенням ХКГ до складу комплексу дефлегматор – установка очищення неонгелієвої суміші.

xv 1191
ІНСТИТУТ ХОЛОДУ
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

БІБЛІОТЕКА
АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

Об'єкт дослідження – робочі процеси в системах збагачення та очищення неоногелієвої суміші на основі дефлегматорів.

Предмет дослідження – ступінь охолодження з немашинними генераторами холоду в технології очищення неоногелієвої суміші.

Методи дослідження – комп'ютерне моделювання способів підвищення ефективності технології збагачення та очищення неоногелієвої суміші, лабораторні експерименти по визначенню показників ефективності хвильових криогенераторів (ХКГ), зіставлення результатів моделювання з результатами експериментів.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі вперше отримані наступні нові наукові результати:

1. Вперше розроблені нові схеми технології збагачення та очищення неоногелієвої суміші з використанням немашинних генераторів холоду що працюють завдяки ефекту Гартмана-Шпренгера.
2. Вперше завдяки створеній експериментальній установці досліджено працездатність хвильових газодинамічних криогенераторів на суміші Ne+He в інтервалі температур 78...300 К.
3. Вперше отримані експериментальні значення ефекту охолодження (ΔT) та ККД процесу розширення в ХКГ різного конструктивного виконання на чистих газах (N_2 , He) та сумішах газів (20%Ne+80%He, 80%He+20%Ne, 76%He+19%Ne+5%N₂).
4. Вперше запропоновані варіанти конструкції ХКГ для використання в технології очищення неоногелієвої суміші, які дають змогу знизити затрати енергоносіїв на 7÷8 % та зменшити втрати неону та гелію при регенерації адсорберів на 40÷50%.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується:

1. Коректною постановкою завдання експериментального та теоретичного дослідження.
2. Експериментально отриманим ефектом охолодження за допомогою ХКГ на температурних рівнях 78÷300 К.
3. Перевіркою ефективності включення дослідного зразка ХКГ в діючу установку очищення неоногелієвої суміші.
4. Використанням сучасних дослідних стендів та вимірювального обладнання що відповідає вимогам світових та українських нормативних документів.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено і створено експериментальний зразок криогенного охолоджувача на основі труби Гартмана-Шпренгера.
2. Сформульовані вимоги до конструкції ХКГ, придатного для використання в установках збагачення та очищення неоногелієвої суміші.
3. Експериментально доведено, що використання ХКГ в низькотемпературних установках дозволять знизити енергоспоживання на 7÷8 %.
4. Результати роботи становлять практичний інтерес для виробників технічних та інертних газів при проектуванні та створенні нових установок збагачення й

очищення неоногелієвої суміші. Вони дозволяють підвищити енергетичну ефективність технології збагачення та очищення неоногелієвої суміші.

Особистий внесок здобувача полягає в розв'язанні теоретичних та практичних питань, розрахунках елементів криогенератора, проектуванні та створенні експериментального стенда, аналізу та узагальненні отриманих даних. Особистий внесок підтверджується науковими публікаціями, у яких приведені головні ідеї та положення теоретичних розробок та експериментальних результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень були представлені й обговорювалися на наступних регіональних та міжнародних конференціях: Науково-технічна аспірантська конференція «Сучасні проблеми низькотемпературної техніки», 24 травня, ОДАХ, Одеса, 2002; 2-я науково-технічна конференція «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології». ОДАХ, Одеса 2002.; 21st International Congress of refrigeration, Washington, DC USA. – 2003.; 8 International Conference «Cryogenics 2004», Praha, 2004.; II Vt; Международная научно-практическая конференция «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития.», 16 листопада, Москва, 2005; 4-я Науково-технічна конференція «Сучасні проблеми холодильної техніки й технології». ОДАХ, Одеса, 2005.; 5-я Науково-технічна конференція «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології». ОДАХ, Одеса 2006.; 3-я Международная научно-техническая конференция «Низькотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Санкт-Петербург 2007; 1-я Міжнародна науково-технічна конференція «Холод в енергетиці та на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерасії.» 2008. Миколаїв; Международная научно-техническая конференция «Криогенная техника и технология на рубеже второго столетия XIX». 30 октября. Санкт-Петербург 2008; Международная научно-техническая конференция «Промышленные газы» 11 марта, м. Москва, 2009; IV Науково-технічний семінар «Удосконалення малої холодильної техніки та забезпечення її технологічних процесів» 14-15 травня, м. Донецьк, 2009.; Міжнародна науково-технічна конференції «Сучасні проблеми холодильної та криогенної техніки», 18-19 травня 2009 р., ОНАХТ, Одеса, Україна.; 7-а Науково-технічна конференція «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології». ОДАХ, Одеса, 2009.; V Науково-технічний семінар «Удосконалення малої холодильної техніки й забезпечення її технологічних процесів» 9-10 вересня, м. Донецьк, 2010.

Публікації. Основний зміст дисертації представлено в 16 статтях, у тому числі 12 опублікованих у фахових наукових виданнях та збірниках наукових праць міжнародних конференцій, які відповідають вимогам ВАК України. У вигляді тез доповідей у збірниках наукових праць регіональних і міжнародних конференцій опубліковано 15 статей.

Обсяг та структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, основних висновків, списку використаної літератури, з 146 найменувань бібліографічних ресурсів, та додатків. Вона складається з 143 сторінок основного тексту, включаючи 85 рисунків та 12 таблиць.

Основний зміст

У вступі обгрунтована актуальність наукового напрямку дисертації, приведено зв'язок з державними програмами й темами, сформульовані мета та завдання дослідження. Приведено нові наукові результати, особистий внесок здобувача, дані про апробацію результатів роботи.

У першому розділі представлено огляд літературних джерел по даній темі. Розглянуто комплекс технологій, які супроводжують процес отримання неону (гелію). Особлива увага приділена проблемі очищення неонгелієвої суміші. Розглянуті конструктивні класифікації немашинних генераторів холоду, які можуть бути застосовані в даній технології. Викладаються основні гіпотези, які пояснюють фізичну сутність процесів, що відбуваються у ХКГ. Тут же розглядаються результати досліджень ХКГ на базі газодинамічних випромінювачів та резонансних труб. У результаті аналізу наявної інформації сформульовані основні завдання роботи.

Другий розділ присвячений дослідженню комплексу процесів, властивих технології очищення та сепарації неонгелієвої суміші. Загальносвітова тенденція скорочення витрат на енергоносії і збільшення споживання чистого неону та гелію диктує необхідність енергетичного вдосконалювання існуючих систем очищення неонгелієвої суміші. Головним принципом при розв'язанні даного завдання є використання внутрішніх джерел не задіяної енергії. Сучасні установки очищення неонгелієвої суміші мають у своєму розпорядженні потенціал енергії, який може бути спрямований на підвищення їх продуктивності.

Тривалість робочого періоду адсорбера в значній мірі залежить від складу домішок (переважно, N_2 та O_2). Тим часом, зміст азоту в сировині, залежно від способу первинного збагачення, може мінятися від 5 до 50%. Для забезпечення мінімального змісту домішок в Ne-He суміші, отриманої з різних джерел, перед адсорбером установлюється допоміжний дефлегматор. Умови фазової рівноваги в цьому апараті дозволяють при робочому тиску адсорбційного блоку (1,0 МПа) і температурі 66 К понизити концентрацію домішок до 5%. Більш глибоке очищення суміші на вході сприяло б подовженню робочого періоду адсорбера, що рівносильне економії енергоресурсів установки в цілому. Однак подальше виділення домішок обмежується температурою замерзання азоту в азотній оболонці дефлегматора. Із цієї причини, у багатьох випадках, температуру киплячого холодоагенту вимушено підтримують на рівні 66÷67К. З урахуванням недорекуперації, температура фазової рівноваги N_2 (Ne-He) суміші на виході з дефлегматора не перевищує 69÷70К. Як випливає з діаграми фазової рівноваги, при $P=1,0$ МПа концентрація азоту на виході з апарату (перед блоком адсорберів) близька до 5%.

Одним із способів зниження частки домішок є використання внутрішньої енергії потоку при різниці тисків в установці (1,0 МПа) і усмоктувальною лінією компресора (0,1 МПа). За пропозицією автора названий ресурс тиску спрацьовується в немашинному обладнанні для отримання холоду й забезпечення фазової сепарації азоту в додатковому конденсаторі (рис. 1-б). Вибір в якості робочого тіла чистої (99,999%) неонгелієвої суміші знімає обмеження по температурі холодного потоку на виході із ХКГ. У більшості робочих режимів T_{10} була нижче температури потрібної крапки N_2 (63,15К). Завдяки цій обставині температура фазової рівноваги

N_2 (Ne-He) суміші впритул наближалася до потрібної точки азоту (стан «7» на рис. 1-б). Принцип роботи вдосконаленої установки (див. рис. 1-б) полягає в наступному: вихідна суміш надходить у теплообмінник (I), охолоджується до необхідної температури й попадає в першу ступінь дефлегматора (II), де відділяється основна маса азоту. Далі збагачена суміш надходить у другу ступінь дефлегматора (III), де за рахунок зниження температури кипіння рідкого азоту відбувається додаткова конденсація азоту із суміші.

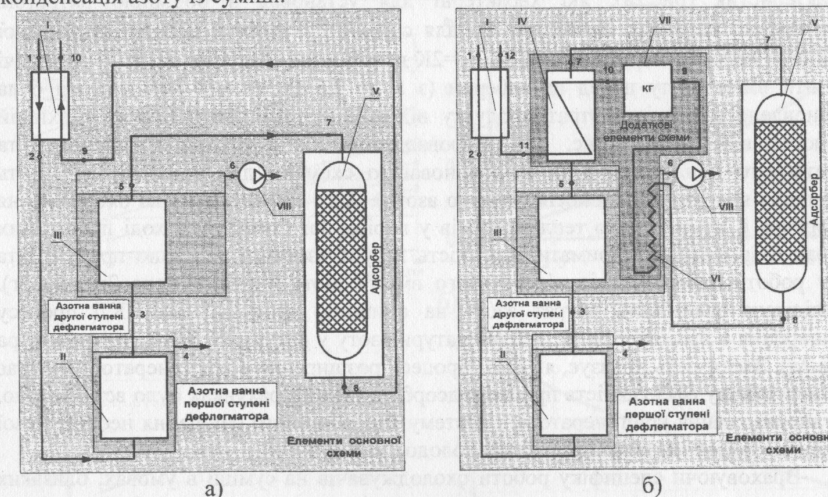


Рис. 1. Схеми очищення неонгелієвої суміші:

а) класична схема; б) схема з підключенням криогенератора; I-вхідний теплообмінник; II - перша ступінь дефлегматора; III - друга ступінь дефлегматора; IV- додатковий конденсатор; V - адсорбер; VI- попередній теплообмінник; VII - хвильовий криогенератор; VIII - вакуумний насос (типу ВВН)

Попереднє зниження температури кипіння рідкого азоту у ванні III забезпечується відкачкою пару N_2 водокільцевим вакуум-насосом (VIII). Зниження концентрації азоту в потоці суміші до <5% N_2 відбувається в додатковому конденсаторі (V), після якого збагачена до 97...98% суміш подається в адсорбер (IV), де відбувається остаточне видалення азоту. Чиста суміш надходить у теплообмінник (VI), прохолоджується азотом, що кипить при $T=66$ К та в немашинний елемент (VII). Холодний потік ХКГ із температурою T_{10} направляється в міжтрубний простір додаткового конденсатора (V), а далі в рекупераційний теплообмінник I (I).

Розглянуто можливі шляхи підвищення ефективності та продуктивності комплексів виробництва неону та гелію. Проведена оцінка впливу немашинних ступенів на характеристики всієї системи попереднього очищення суміші. Визначено області застосування отриманих результатів при створенні нового обладнання. Вивчено вплив геометричних характеристик контуру криогенного забезпечення на продуктивність низькотемпературних сепараторів сумішей на

основі інертних газів. Впровадження в існуючі та проектуємі системи немашинних генераторів холоду приведе до зміни роботи всього комплексу криогенного забезпечення. Розглянемо основні позитивні та негативні моменти впливу на комплекс очищення для визначення оптимальних режимів роботи ХКГ із більшою високою ефективністю.

Результати досліджень узагальнені у вигляді температурно-енергетичних характеристик (рис.2а), які характерні для установки з об'ємною витратою $20 \text{ м}^3/\text{година}$ на вході. Доведено, що для середніх значень $\eta_s=8\%$ та прийнятної величини недорекуперації $\Delta T_H=T_9-T_{AZЖ}=2\text{К}$ додатковий конденсатор дозволяє вдвічі знизити вміст азоту перед адсорбером (з 5 до 2,5%). У ході дослідження була встановлена залежність втрат продукту від концентрації азоту (2-5%) у входній неонгелієвій суміші (рис. 2б). Впровадження немашинного елемента та додаткового конденсатора за запропонованою схемою (див. рис. 1а) дозволить зменшити витрати холодоносія (рідкого азоту). Азот витрачається на охолодження адсорбера й компенсацію теплопритоків у період його роботи. У ході проведених розрахунків вдалося, отримати залежність витрат азоту на одиницю продукції та часу роботи адсорбера від відсоткового вмісту азоту в суміші (рис. 2в, рис. 2г). Досліджена залежність витрат азоту на одиницю продукції від ККД процесу розширення в криогенаторі та температури азоту у вакуумній ванні дефлегматора (рис.2д). Залежність показує, як ККД процесу розширення в криогенаторі впливає на енергетичну ефективність процесу адсорбції. При розрахунках було встановлено, що впровадження криогенатора в систему адсорбційного очищення неонгелієвої суміші дозволяє знизити споживання холодоносія на 8-10%.

Враховуючи специфіку роботи охолоджувачів на суміші в умовах, близьких до температури замерзання одного з компонентів, основна увага в роботі приділена дослідженню апаратів зі статичним збудником коливань у стовпі газу. Такі обладнання більш прості й надійні в порівнянні з криогенаторами, які мають механічний газорозподіл (рис. 3а).

На наступному етапі роботи основна увага була зосереджена на розробці ХКГ, адаптованого до відносно мало витратних криогенних систем конденсаційного збагачення неонгелієвих концентратів. Як відомо, в основу роботи газодинамічного хвильового криогенатора покладено принцип аеродинамічного резонансу та явище термічного енергорозподілу при нелінійних коливаннях газу в заглибленій з одного кінця трубі (ефект Гартмана-Шпренгера, рис. 3). Більшість відомих газодинамічних охолоджувачів, застосовуваних у промисловості, розраховані на витрати в тисячі й десятки тисяч м^3 та мають механічний генератор звукових коливань.

Серйозною перешкодою на шляху впровадження промислових зразків криогенаторів є узгодження їх видаткових характеристик з параметрами існуючих установок. Як випливає з досліджень, зміна умов експлуатації (тиск, температура) диктує необхідність корекції F (площі сопла). Дослідний зразок криогенатора конструктивно має можливість працювати на різних речовинах і різних витратах. Універсальність конструкції апарата дозволяє регулювати перетин соплового входу для узгодження проточної частини апарата з витратою компресора. Додатковим «каналом впливу» на розміри проточної частини охолоджувача є природа газу

(склад суміші). До складу обладнання входять два регулятори. Перший використовується для зміни критичного перетину звукового сопла й узгодження витрати газу із продуктивністю компресора. Другий регулятор призначений для регулювання зазору між соплом і резонансною трубкою. При певних конструктивних доробках даного обладнання на його основі можуть бути створені автоматичні регульовані газодинамічні апарати, які здатні узгодити роботу охолоджувача з параметрами газової суміші на вході в сопло.

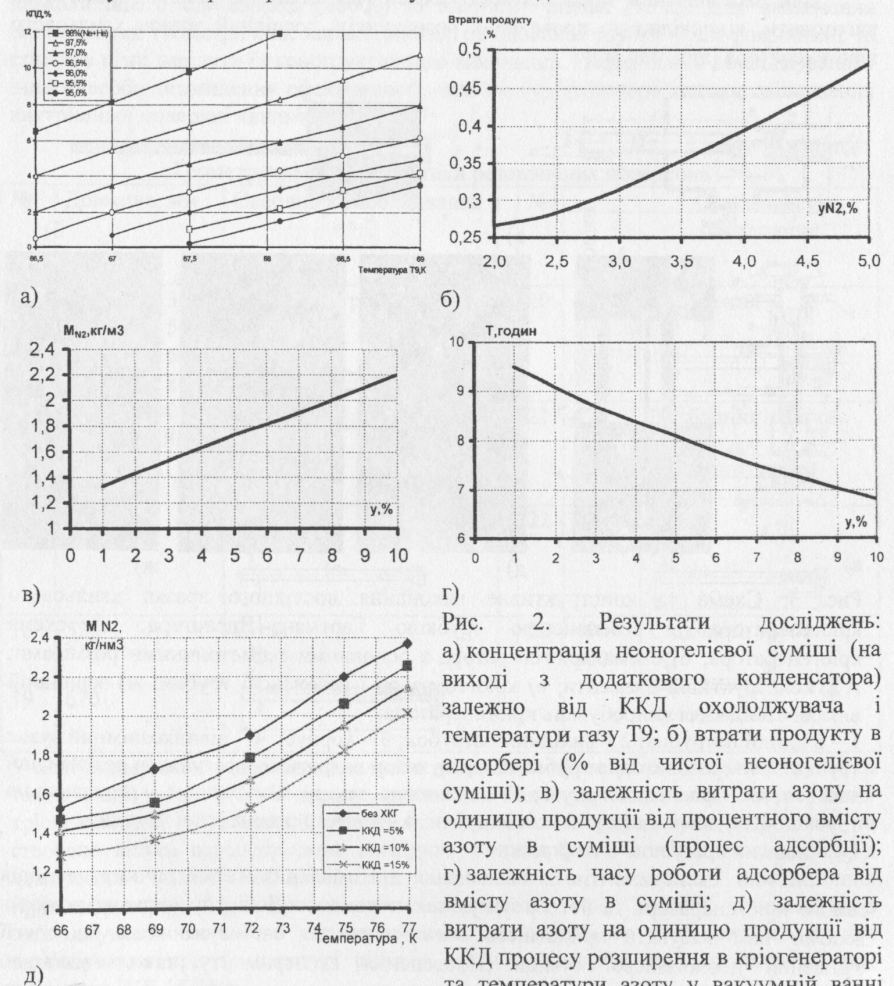


Рис. 2. Результати досліджень: а) концентрація неонгелієвої суміші (на виході з додаткового конденсатора) залежно від ККД охолоджувача і температури газу T9; б) втрати продукту в адсорбері (% від чистої неонгелієвої суміші); в) залежність витрати азоту на одиницю продукції від процентного вмісту азоту в суміші (процес адсорбції); г) залежність часу роботи адсорбера від вмісту азоту в суміші; д) залежність витрати азоту на одиницю продукції від ККД процесу розширення в криогенаторі та температури азоту у вакуумній ванні дефлегматора (процес адсорбції)

У рамках роботи було проведено розрахунки конструктивних елементів класичної труби Гартмана-Шпренгера. На підставі розрахунків була запропонована

конструкція класичної труби Гартмана-Шпренгера з наступними конструктивними розмірами (рис. 3).

Третій розділ дисертації присвячений розробці конструкції дослідних стендів та створенню методик проведення експериментів. У якості робочих тіл використовувалися азот, гелій і неонгелієва суміш.

Для забезпечення працездатності схеми, показаної на рис.1б треба було виготовити, відповідно до проведених розрахунків, дослідний зразок хвильового криогенератора (див. рис.3г).

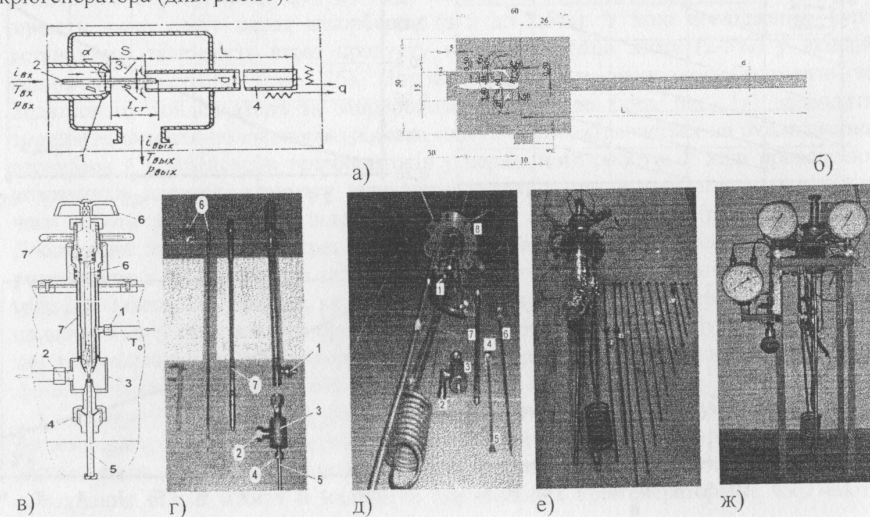


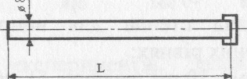
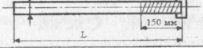
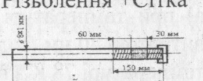
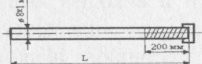
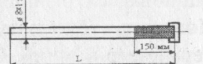
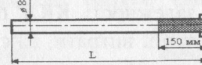
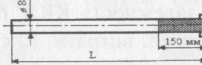
Рис. 3. Схема та конструктивне виконання дослідного зразка хвильового криогенератора з резонансною трубкою Гартмана-Шпренгера: а) схема криогенератора; б) схема криогенератора з основними геометричними розмірами; г, д) конструктивні елементи; е) криогенератор і резонансна трубка; ж) зовнішній вигляд стенда для випробувань криогенератора;

1 – вхідний патрубок; 2 – вихідний патрубок; 3 – корпус; 4 – швидкознімний вузол трубки; 5 – резонаторна трубка; 6 – регулятор витрати; 7 – регулятор резонансної частоти; 8 – фланець корпуса; S – величина зазору між соплом і резонансною трубкою; L – довжина резонансної трубки; d – діаметр резонансної трубки; $L_{стр}$ – довжина регулюючого стрижня

Метою експериментів є визначення оптимальних геометричних розмірів самого криогенератора та його резонуючих порожнин. Добір правильних розмірів допоміг нам з'ясувати придатність обладнання для застосування в технології очищення неонгелієвої суміші. Проведення експерименту також вимагало виготовлення деякої кількості камер енергорозділу, виконаних у вигляді трубок різних геометричних розмірів (див. рис. 3е). Схематичне зображення резонансних трубок з розмірами показано в таблиці 1. Випробувані резонансні трубки можна класифікувати на кілька видів: пустотілі довжиною від 10 до 200см; труби зі змінним розміром; труби з турбулізаторами потоку. Під час проведення всього

комплексу робіт, було виконано кілька різних експериментів, об'єднаних єдиною метою визначення потрібної конфігурації криогенератора. У ході випробувань були отримані залежності ККД процесу розширення в криогенераторі від геометрії резонансних труб, витрати, відстані (S) між соплом і входом у резонансну порожнину (4..8 мм), а також способу охолодження резонансної трубки (повітря, вода, рідкий азот). Випробування були проведені на двох температурних рівнях: навколишнього середовища (280 К) та азотному рівнях (78 К). Для визначення оптимальних геометричних характеристик резонансної трубки були розроблені та створені різні варіанти їх конструктивного виконання. Поряд із цим досліджувалися інші способи підвищення ефективності, такі як турбулізатори потоку, збільшення внутрішньої поверхні хвильових камер.

Таблиця 1

Геометричні характеристики резонансних поверхонь					
№	Довжина, мм	Особливості обладнання	№	Довжина, мм	Особливості обладнання
1... 16	100; 200; 300; 370; 400; 500; 525; 575; 600; 670; 700; 800; 860; 900; 1000; 2000	Пустотіла трубка 	20	470	Різьблення 
	21		470	Різьблення + Сітка 	
17	670	Різьблення 	22	575	Сітка 
18	525	Сітка 	23	400+ 400	Східчаста труба 
19	670				

У ході експерименту проводилася зміна довжини й діаметра резонансних трубок, а також різні зміни в їхніх конструкціях. Для вивчення можливості застосування криогенераторів у технології очищення неонгелієвої суміші було розроблено та створено кілька варіантів схем дослідних стендів (рис. 4). Стенд складається з компресора 1.6МК-20/12,5М1 та немашинного елемента охолодження (криогенератора). При проведенні експериментів при $T=280\text{K}$ криогенератор охолоджувався водою з температурою навколишнього середовища, а для випробування при температурі рідкого азоту прийшлося замінити водяний бак криостатом КГ-15/150.

Четвертий розділ присвячено результатам експериментального дослідження газодинамічного хвильового криогенератора з різною геометрією резонансної трубки. Для вивчення способу підвищення продуктивності розроблені схемні

рішення стндів для дослідження криогенних охолоджувачів на основі труби Гартмана-Шпренгера (рис.4).

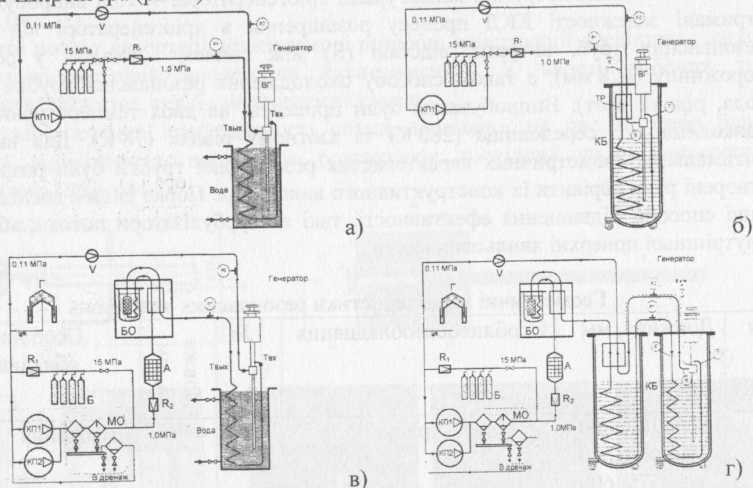


Рис. 4. Схема і зовнішній вигляд стнда для випробування хвильового криогенератора на різних температурних рівнях: а) при температурі 280 К з витратою 20 нм³/годину; б) при температурі 78 К з витратою 20 нм³/годину; в) при температурі 280 К з витратою 40 нм³/годину; г) при температурі 78 К з витратою 40 нм³/годину.

Під час експерименту проводилася заміна резонансних трубок та для кожної оцінювалася різниця температур на вході й виході з хвильового криогенератора. Контроль температур забезпечувався набором мідь-константових термопар і термометрів опору СМФ-Д2, що мають атестацію в діапазоні, 50-300К. У період проведення всього комплексу робіт було виконано кілька різних експериментів, об'єднаних єдиною метою визначення потрібної конфігурації криогенератора. У результаті випробувань були отримані залежності ККД процесу розширення в криогенераторі від геометрії резонансних труб, витрати, відстані (S) між соплом та входом у резонансну порожнину, а також способу охолодження резонансної трубки (рис.5). Випробування були проведені на двох температурних рівнях: навколишнього середовища (280К) і азотному рівнях (78К). Було проведено чотири різні експерименти. Витрата робочої речовини становила 20 нм³/годину та 40 нм³/годину. При температурі навколишнього середовища в якості робочих речовин застосовувалися: азот, гелій, неонгелієва суміш (20%Ne+80%He), неонгелієва суміш (80%Ne+20%He), та неонгелієва суміш з азотом (76%Ne+19%He+5%N₂). При температурі T=78К були використані гелій, неонгелієва суміш (20%Ne+80%He), неонгелієва суміш (80%Ne+20%He) і неонгелієва суміш з азотом (76%Ne+19%He+5%N₂).

Під час кожного експерименту додатково проводили зміни відстані (S) між соплом і входом у резонансну порожнину(4+8мм), а також спосіб охолодження резонансної трубки (повітря, вода, рідкий азот).

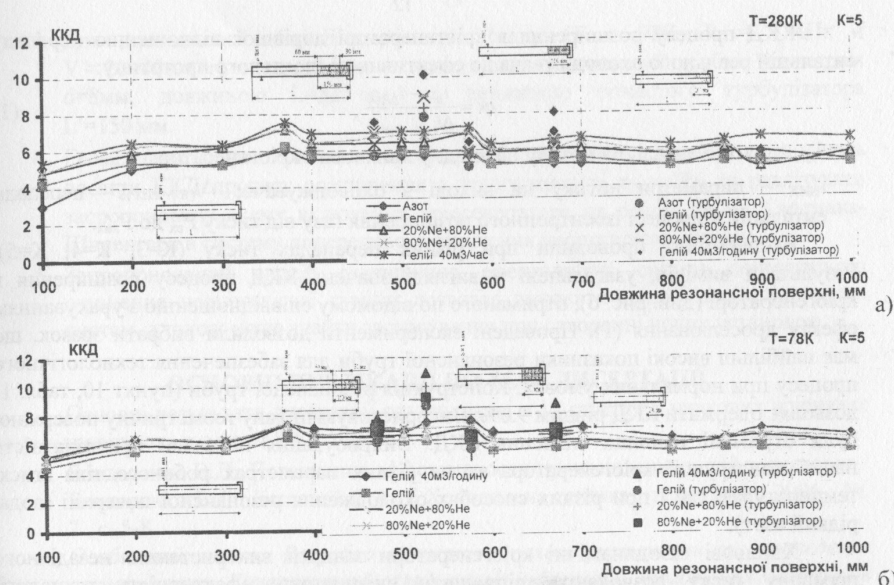


Рис. 5. Результати експериментів. Залежність ККД процесу розширення в криогенераторі від довжини поверхні (ступінь розширення K=5) а)T=280К; б) T=78К.

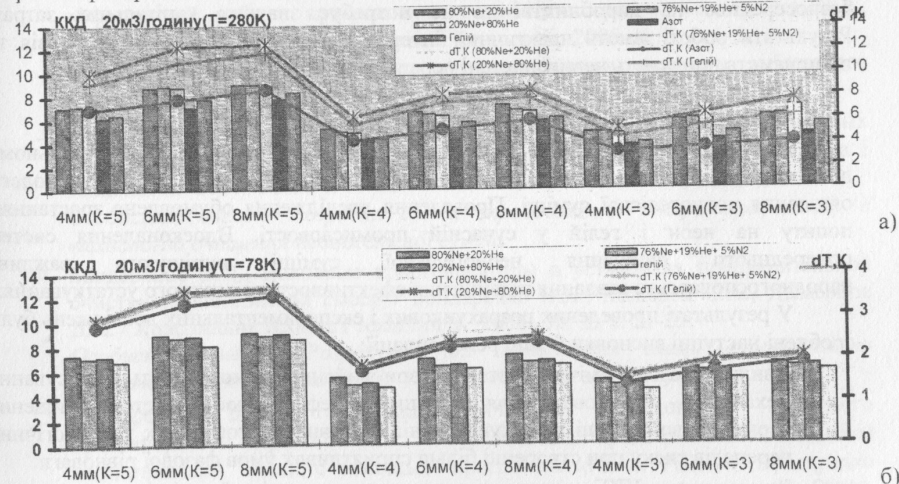


Рис. 6. Термодинамічний ККД процесу розширення в криогенераторі та різниця температур dT криогенератора з трубкою оптимальної конструкції №18: а) T=280К (азот, гелій, 80%Ne+20%He, 76%Ne+19%He+5%N₂, 20%Ne+80%He); б) T=78К (гелій, 80%Ne+20%He, 76%Ne+19%He+5%N₂, 20%Ne+80%He)

ККД процесу розширення в криогенераторі дорівнює відношенню перепаду ентальпій реального охолоджувача до ефективності ідеального прототипу:

$$\eta_s = \frac{i_{вх} - i_{вих}}{\Delta i_{(вх-вих)_s}}, \quad (1)$$

де: $i_{вх}$ – питома ентальпія потоку на вході у хвильовий криогенератор;

$i_{вих}$ – параметри потоку на виході з охолоджувача; $\Delta i_{(вх-вих)_s}$ – перепади ентальпій в процесі ізоентропного розширення газу від тиску $P_{вх}$ до $P_{вих}$.

Експеримент проводили при різних перепадах тиску ($K=3$, $K=4$, $K=5$). Результати вимірів, узагальнені у вигляді значень ККД процесу розширення в криогенераторі (див. рис. 6), отриманого по відомому співвідношенню з урахуванням ефекту дроселювання (1). Проведені експерименти дозволили вибрати зразок, що має найбільш високі показники резонансної труби для забезпечення технологічного процесу при нормальних умовах. Конструкція резонансної труби (пункт 10, табл. 1) дозволяє одержати ККД рівним 9,0%. Використовуючи дану геометричну поверхню, були отримані найвищі значення ККД. Випробування показали працездатність нашої конструкції криогенератора як на різних параметрах робочого тіла (тиск, температура), так і при різних способах охолодження резонансної поверхні (вода, рідкий азот).

Хвильові газодинамічні криогенератори завдяки використанню незадіяного перепаду тиску дозволяють підвищити енергетичну ефективність технології очищення неоногелієвої суміші. Приведений спосіб підвищення ефективності технології очищення дозволяє виконати модернізацію існуючих систем безпосередньо на виробництві та не потребує значних капітальних затрат. Результати роботи мають практичний інтерес для виробників технічних газів та підприємств, що мають невикористані перепади тиску.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вивченню та експериментальному дослідженню можливості застосування газодинамічних криогенераторів в технології очищення неоногелієвої суміші. Проведення дослідження обумовлене зростанням попиту на неон і гелій у сучасній промисловості. Вдосконалення систем попереднього очищення неоногелієвої суміші вирішують важливе народногосподарське завдання підвищення ефективності криогенного устаткування.

У результаті проведених розрахункових і експериментальних досліджень були зроблені наступні висновки й дані рекомендації:

1. Хвильові газодинамічні криогенератори здійснюють можливість застосування механічної нерівноваги для збільшення ефективності систем очищення неоногелієвої суміші за рахунок раніше не використовуваних технологічних перепадів тиску при створенні більш сприятливих умов фазової рівноваги.
2. Використання ХКГ в установці очищення неоногелієвої суміші знижує питоме енергоспоживання на 8-10%. При цьому криогенератор із середнім значенням ККД процесу розширення в $\eta_s \sim 8\%$ та додатковий конденсатор удвічі знижують зміст азоту перед адсорбером (з 5 до 2,5 %).

3. Для дослідженої області параметрів стану ($T = 78\text{K}$; $P = 1\text{МПа}$ й $V = 20\text{--}40\text{нм}^3/\text{г}$) оптимальною є конструкція резонансної трубки діаметром $d=8\text{мм}$, довжиною $L=525\text{мм}$, та довжиною сітчастого турбулізатора $L'=150\text{мм}$.
4. Геометричні характеристики оптимальної резонансної трубки дозволяють досягти ККД процесу розширення в криогенераторі $\eta_s = 9\%$ та реалізувати запропоновану схему включення криогенератора на основі труби Гартмана-Шпренгера в систему попереднього очищення неоногелієвої суміші.
5. Запропонований спосіб підвищення ефективності систем попереднього очищення неоногелієвої суміші дозволяє виконати модернізацію існуючих систем, а також може знайти застосування при створенні нових установок.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати дисертації опубліковані в 12 статтях у наукових журналах що відповідають вимогам ВАК України.

1. Бондаренко В.Л., Повышение эффективности промышленных дефлегматоров / Бондаренко В.Л., Кошевой С.А. / Холодильная техника и технология. 2006. № 2., с. 5-8.
Особистий внесок: Розробка експериментальної установки та проведення експерименту. Літературний огляд, аналіз інформації, підготовка матеріалів до публікації.
2. Бондаренко В.Л., Выбор параметров вакуумной системы для обеспечения эффективной работы промышленных дефлегматоров / Бондаренко В.Л., Кошевой С.А. / Холодильная техника и технология. 2006. № 3. с. 5-9.
Особистий внесок: Розрахунки та оптимізація системи криогенного забезпечення промислових дефлегматорів.
3. Бондаренко В.Л., Повышение производительности промышленных дефлегматоров / Бондаренко В.Л., Кошевой С.А. / Холодильная техника и технология. 2006. № 5., с. 19-22.
Особистий внесок: Розробка схеми впровадження генератора холоду в технологію очищення неоногелієвої суміші
4. Бондаренко В.Л., Волновые криогенераторы в установках предварительной очистки неоногелиевой смеси / Бондаренко В.Л., Кошевой С.А., Дымерцов Д.А. / Холодильная техника и технология. 2008. № 2., с. 21-25.
Особистий внесок: Розрахунки та оптимізація схеми впровадження генератора холоду в технологію очищення неоногелієвої суміші.
5. Бондаренко В.Л., Термогазодинамические исследования волнового криогенератора применяемого в установках предварительной очистки неоногелиевой смеси, с помощью программы «Flown Vision» / Бондаренко В.Л., Кошевой С.А., Дымерцов Д.А. / Холодильная техника и технология. 2008. № 3., с. 33-38.
Особистий внесок: Літературний огляд, аналіз інформації, підготовка матеріалів до публікації.

6. Бондаренко В.Л., Немашинные устройства как фактор повышения энергетической эффективности установок предварительной очистки неонгелиевой смеси / Бондаренко В.Л., Кошевой С.А., Гриднев С.И. / Холодильна техніка і технологія. 2008. № 4(114), с. 10-15.
Особистий внесок: Розробка конструкції криогенератора. Розрахунок та оптимізація схеми впровадження генератора холоду в технологію очищення неонгелієвої суміші.
7. Газодинамический криогенератор Гартмана-Шпренгера в установке предварительной очистки неонгелиевой смеси. / Бондаренко В.Л., Кошевой С.А., Гриднев С.И., Дымерцов Д.А.. / Додаток до науково-технічного збірника «Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування». 2008. № 3(420), з 246-253.
Особистий внесок: Оптимізація схеми впровадження генератора холоду в технологію очищення неонгелієвої суміші, підготовка матеріалів до публікації.
8. Бондаренко В.Л., Конструктивная оптимизация газодинамического криогенератора Гартмана-Шпренгера для применения в установке предварительной очистки неонгелиевой смеси / Бондаренко В.Л., Кошевой С.А., Гриднев С.И. / Холодильна техніка та технологія. 2008. № 6., с. 9-15.
Особистий внесок: Розробка схем іспитових стендів, проведення експериментів, обробка результатів, підготовка матеріалів до публікації.
9. Бондаренко В.Л., Газодинамический немашинный генератор холода в установке предварительной очистки неонгелиевой смеси. / Бондаренко В.Л., Кошевой С.А., Гриднев С.И., / Сб. тр. ДонНУЕТ / м. Донецьк 2009; № 21, з 157-164
Особистий внесок: Оптимізація схеми, підготовка матеріалів до публікації.
10. Газоструйные акустические генераторы холода с резонансной трубкой. Состояние вопроса. Математическая модель. / Кухаренко В.Н. Дымерцов Д.А., Бондаренко В.Л., Кошевой С.А., /Сб. тр. ДонНУЕТ / м. Донецьк, 2010; № 26, С.70-77
Особистий внесок: Розробка конструкції криогенератора підготовка матеріалів до публікації.
11. Бондаренко В.Л., Немашинные генераторы холода в технологии предварительной очистки неонгелиевой смеси./ Бондаренко В.Л., Кошевой С.А., Гриднев С.И., / Наукові праці ОНАХТ. Випуск 35, Том 1, 2009.
Особистий внесок: Розробка схеми впровадження генератора холоду в технологію очищення неонгелієвої суміші, підготовка матеріалів до публікації.
12. Экспериментальное исследование работы газодинамического немашинного генератора холода на основе трубы Гартмана-Шпренгера при температуре 78К. / Бондаренко В.Л., Кошевой С.А., Зимин Д.Е., Дымерцов Д.А. /Холодильна техніка і технологія. 2010. № 2., с. 9-15.
Особистий внесок: Розробка схем випробувальних стендів, проведення експериментів, обробка результатів, підготовка матеріалів до публікації.

АНОТАЦІЯ

Кошовий С.О. Газодинамічні криогенератори в технології очищення неонгелієвої суміші Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування. - Одеська державна академія холоду, Одеса 2010 р.

Дисертаційна робота присвячена аналітичному та експериментальному дослідженню газодинамічних криогенераторів в технології очищення неонгелієвої суміші. Проведення дослідження обумовлено зростанням попиту на неон та гелій в сучасній промисловості. Вдосконалення систем очищення неонгелієвої суміші вирішують важливу народно господарчу задачу підвищення ефективності криогенного устаткування.

Розглянуто сучасний стан технології очищення неонгелієвої суміші від азоту. Виділено основні напрямки розвитку цієї технології, а також виявлено основні проблеми та недоліки існуючих схемних рішень.

Розроблено схемне рішення, яке дозволяє використати апарати додаткового охолодження в технології очищення суміші. З метою зниження концентрації домішок (переважно N_2) нижче 5% запропонований і випробуваний додатковий конденсатор для очищення суміші, перед адсорбером. У якості "джерела холоду" у цьому випадку запропоновано використовувати немашинні апарати на базі труби Гартмана-Шпренгера. Результати досліджень показали, що для середніх значень $\eta_s=8\%$ додатковий конденсатор дозволяє вдвічі знизити вміст азоту перед адсорбером (з 5 до 2,5%).

Приведений спосіб підвищення ефективності технології очищення дозволяє виконати модернізацію існуючих систем прямо на виробництві та не потребує значних капітальних затрат.

Ключові слова: дефлегматор, суміш, насос, стенд, очищення.

ABSTRACT

Koshevoy S.A. Gas Dynamic Cryogenerators in Neon-Helium purifying technologies. – Manuscript. Thesis for the scientific degree of Candidate sciences (engineering) on the speciality 05.05.14 – Refrigerating, vacuum and compressor techniques, conditioning systems. – Odessa State Academy of Refrigeration, Odessa, 2010.

The thesis is dedicated to analytic and experimental research for usage gas dynamic cryogenerators in preliminarily enrichment neon-helium systems. Researches are caused neon and helium increasing demand in modern industry. Neon-helium preliminarily enrichment systems improvement solves important economic problem of cryogenic equipment efficiency increasing. It is discussed modern technology condition of neon-helium mixture purifying from nitrogen. New tendencies of this technology development are revealed, main problems and disadvantages existing scheme decision are defined.

Scheme decision allows to use additional cooling apparatus (gas dynamic cryogenerators) in Ne-He enrichment ant purifying systems from nitrogen is developed. On purpose admixtures concentration decreasing (mainly N_2) below 5% additional condenser for addition N_2 condensation in purifying mixture before the absorber is offered and tested. In this case as the "cooling source" is proposed to use non-machine apparatus

on the Hartman-Sprenger tube base. Research results show that for the medium value $\eta_s = 8\%$ and comprehensible value non-recuperate $\Delta T_H = T_9 - T_{N_2} = 2\text{ K}$ additional condenser allows to reduce twice nitrogen concentration before the adsorber (from 5 to 2.5%). For acknowledgement reducing productivity industrial reflux condensers possibility with the help of additional condenser it is created pilot unit for cryogenic cooler on the Hartman-Sprenger tube base. It is designed and created the experimental sample of cryogenic cooler. The cryogenerator conducted tests allowed to discover resonant tube optimal construction. It is proved cryogenerators usage ability at the level of temperatures 78...300 K. Experimental dates of wave cryogenerators research in different construction design on the pure gases (nitrogen, helium) and mixtures (20% Ne+80% He, 80% He+20% Ne, 76% He+19% Ne+5% N₂) were received. The demand to the WCG construction for technological purifying neon-helium mixture usage were formulated.

The results introduce practical interest for technical and inert gaseous producer in new installation for neon-helium mixture enrichment and purifying design and creation. Cryogenerators different types usage as a non-machine element allows to use pressure difference in a systems that earlier didn't use. The specified way preliminary neon-helium mixture purifying system efficiency reducing allows to modern existing systems directly on manufacture and don't demand considerable capital expenses.

Keywords: reflux condenser, mixture, pump, stand, clearing.

АННОТАЦИЯ

Кошевой С.А. Газодинамические криогенераторы в технологии очистки неонгелиевой смеси. Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования. – Одесская государственная академия холода, Одесса 2010 г.

Диссертационная работа посвящена аналитическому и экспериментальному исследованию применения газодинамических криогенераторов в технологии предварительной очистки неонгелиевой смеси. Проведение исследования обусловлено возрастанием спроса на неон и гелий в современной промышленности. Усовершенствование систем предварительной очистки неонгелиевой смеси решает важную народнохозяйственную задачу повышения эффективности криогенного оборудования.

Рассмотрено современное состояние технологии очистки неонгелиевой смеси от азота. Выявлены основные тенденции развития этой технологии, а также определены основные проблемы и недостатки существующих схемных решений.

Разработано схемное решение, которое позволяет применять аппараты дополнительного охлаждения (волновые криогенераторы) в системах обогащения и очистки смеси Ne-He от азота. С целью снижения концентрации примесей (преимущественно N₂) ниже 5% предложен и испытан дополнительный конденсатор для очистки смеси перед адсорбером. В качестве «источника холода» в этом случае предложено использовать немашинные аппараты на базе трубы Гартмана-Шпренгера. Результаты исследований показали, что для средних значений $\eta_s = 8\%$ и приемлемой величины недорекуперации $\Delta T_H = T_9 - T_{A3Ж} = 2\text{ K}$ дополнительный конденсатор позволяет вдвое снизить содержание азота перед адсорбером

для очистки смеси перед адсорбером. В качестве «источника холода» в этом случае предложено использовать немашинные аппараты на базе трубы Гартмана-Шпренгера. Результаты исследований показали, что для средних значений $\eta_s = 8\%$ и приемлемой величины недорекуперации $\Delta T_H = T_9 - T_{A3Ж} = 2\text{ K}$ дополнительный конденсатор позволяет вдвое снизить содержание азота перед адсорбером (с 5 до 2,5%). Для подтверждения возможности повышения производительности промышленных дефлегматоров с помощью дополнительного конденсатора разработан стенд для исследования криогенных охладителей на основе трубы Гартмана-Шпренгера. Разработан и создан экспериментальный образец криогенного охладителя. Проведенные испытания криогенератора позволили обнаружить оптимальную конструкцию резонансной трубки. Доказана возможность использования криогенераторов на температурных уровнях 78...300K. Получены экспериментальные данные по исследованию волновых криогенераторов в различном конструктивном исполнении на чистых газах (азот, гелий) и смесях (20%Ne+80%He, 80%He+20%Ne, 76%He+19%Ne+5%N₂). Сформированы требования к конструкции ВКГ для использования в технологии очистки неонгелиевой смеси.

Результаты работы представляют практический интерес для производителей технических и инертных газов при проектировании и создании новых установок обогащения и очистки неонгелиевой смеси. Применение криогенераторов различных конструкций в качестве немашинных элементов позволяет задействовать перепад давления, который ранее не использовался. Указанный способ повышения эффективности систем предварительной очистки неонгелиевой смеси позволяет произвести модернизацию существующих систем прямо на производстве и не требует значительных капитальных затрат.

Ключевые слова: дефлегматор, смесь, насос, стенд, очистка.

