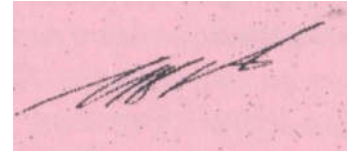


а.п.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ



СЕКАЧОВ ІГОР ВІКТОРОВИЧ

УДК 621.52

**ДИНАМІКА КРІОГЕННОГО РОЗДІЛЕННЯ ГАЗІВ
У ВАКУУМНИХ СИСТЕМАХ**

Спеціальність 05.05.14 - холодильна, вакуумна та компресорна техніка,
системи кондиціонування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса - 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в інституті холоду, кріогенних технологій та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського Одеської національної академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України та в науково-дослідних лабораторіях Канади і Франції

Захист дисертації відбудеться 2 липня 2014 р. о 14⁰⁰ в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 при ОНАХТ за адресою: вул.

Науковий керівник:
ОНАХТ Автореф
Динаміка кріогенного



УО18625

Офіційні опоненти:

І О И А Х Т _ _

доктор технічних наук, професор **Мазур Віктор Олександрович**, завідувач кафедри термодинаміки та відновлюваної енергетики Одеської національної академії харчових технологій МОН України

доктор технічних наук, професор **Жуль Георгій Григорович**, професор кафедри «Технічна кріофізика» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» МОН України

кандидат технічних наук, ст. н. с. **Графів Олександр Петрович**, керівник центру гелієвих технологій ООВ «Айсблік», м. Одеса

ШЛ _____ 'на, 65082.

'на, 65082.

ютеці Інституту холоду, кріотехнологій ~о
Одеської національної академії 1/3, м.
Одеса, Україна, 65082.

В.І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час 80% споживаній світом енергії створюється за рахунок спалювання викопних природних палив (нафта, вугілля і газ), використання яких несе потенційну загрозу катастрофічних екологічних змін і веде до неминучого виснаження ресурсів. Найбільш важливим напрямом в отриманні енергії, необхідної для успішного розвитку цивілізації є термоядерний синтез, хоча перспективи його реалізації поки залишаються невизначеними. Можливість комерційного використання термоядерного реактора для вирішення фізичних і технологічних проблем здійснюється в рамках міжнародного проекту ITER. Реалізація даного проекту разом з ядерно- фізичними завданнями вимагає створення складних вакуумних систем, які забезпечують високі показники характеристик плазми. Проект вакуумної системи включає камеру Токамака — тороїдальну установку для магнітного утримання плазми, об'ємом порядку 1400 м^3 (тиск - 10^{-6} Па); вакуумний кріостат для теплової ізоляції надпровідних обмоток магнітів (об'єм 16000 м^3 , тиск $\sim 10^{-4} \text{ Па}$); інжектори пучків нейтральних часток (об'єм порядку 600 м^3 , тиск $\sim 10^{-7} \text{ Па}$), а також додаткові пристрої вакуумування для діагностики і тестування. Передбачається, що до складу Токамаку увійдуть 3 взаємозв'язаних охолоджувальні системи, де як холодоносії використовуються вода, рідкий азот і рідкий гелій. Ці системи забезпечують відведення теплоти в результаті термоядерної реакції порядку 450 МВт, а також використовуються для охолодження надпровідних магнітів. Зниження температури до 80К і відведення 1300 кВт теплоти досягається в контурі з азотним рівнем температур. Система охолодження холодопродуктивністю 75 кВт використовує рідкий гелій і знижує температуру до 4,5 К.

Раннє виявлення витоків та їх локалізація є серйозною проблемою при оцінці роботи вакуумних систем різних ядерно-фізичних установок. Тому моделювання динаміки кріогенного розділення газів і витоків водяної пари через мікротріщини захисних покриттів у вакуум являє значний інтерес для підвищення надійності роботи термоядерного ректора. Тема дисертаційної роботи, в якій розробляються науково-технічні підходи до вирішення сучасних питань кріогенного розділення газів для підвищення ефективності систем вакуумування при здійсненні процесів термоядерного синтезу, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконувалася у відповідності з науковою тематикою інституту холоду, кріотехнологій і екоенергетики ім. В.С.Мартинівського Одеської національної академії харчових технологій. Низка результатів була отримана при виконанні робіт Інституту ядерних досліджень РАН в рамках програми: "Нейтринна астрофізика, нейтринна і гамма астрономія, фізика космічних променів, проблема сонячних нейтрино", спільному проведенні експериментів в міжнародному проекті KATRIN - KArlsruhe TRItium Neutrino по визначенню абсолютної шкали мас нейтрино (Технологічний інститут, Карлсруе, Німеччина). У перерахованих наукових дослідженнях автор дисертаційної роботи брав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження полягає в обґрунтуванні та розвитку науково-технічних підходів до моделювання динаміки кріогенного розділення газів у вакуумних системах, що забезпечують максимальну енергетичну

ефективність різних ядерно-фізичних процесів. Для досягнення наміченої мети були поставлені та вирішені наступні *основні завдання*:

1. Розробити оцінку витоків газів і їх локалізацію при роботі вакуумних систем, стінки яких охолоджуються водою, на основі моделей динаміки криогенного розділення газів через фрактальну мережу мікротріщин захисних покриттів.
2. Розробити криогенну систему саморегульованого паралельного охолодження мережі надпровідних магнітів для досягнення робочої температури 4.5К. Надпровідна магнітна система використовується для збирання електронів при бета-розпаді тритію і їх подальшого транспортування в спектрометр для енергетичного аналізу.
3. Удосконалити метод саморегульованого охолодження надпровідних компонент криомодулів, резонаторів і магнітів для поліпшення добротності резонаторів надпровідного прискорювача.
4. Обґрунтувати застосування і експериментально апробувати метод збереження поляризації протонів у магнітному полі при транспортуванні протонної мішені із поляризаційного надпровідного магніту в магнітне поле спектрометра.
5. Розробити криогенну систему зниження температури криоконденсаційних панелей для збільшення швидкості відкачування водню із вакуумної камери протонного циклотрона.

Об'єктами дослідження є криогенні методи прискореного і рівномірного заохолодження робочого простору вакуумних систем до температур рідкого гелію 4.2К в експериментальному термоядерному реакторі і прискорювачах елементарних часток.

Предмет дослідження - процеси криогенного розділення газів у вакуумних системах, що забезпечують енергетичну ефективність процесів в експериментальних ядерно-фізичних установках різного призначення.

Методи досліджень - математичне моделювання течії газів в мікроканалах, що імітують фрактальну систему тріщин і дефектів в захисних покриттях; натурні експерименти, порівняння і аналіз результатів чисельного моделювання з результатами експериментальних досліджень.

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

- вдосконалена оцінка еволюції і криогенного розділення газів при роботі вакуумних систем на основі моделей течії газів через фрактальні мережі на відміну від простих геометричних структур, що імітують мікротріщини захисних покриттів;
- розвинений метод саморегульованого охолодження надпровідних компонент криомодулів, резонаторів і магніту, що дозволив поліпшити добротність резонаторів надпровідного прискорювача;

- вперше створена система саморегульованого паралельного заходження 13 надпровідних магнітів, що знаходяться у 8-ми окремих кріостатах, в установці по вимірюванню маси електронного антинейтрину. Система магнітного заходження забезпечила створення робочої температури 4.5К, що дозволило знайти найбільш точну верхню межу маси антинейтрину; вдосконалено метод відкачування вакуумної камери циклотрона, що забезпечує зниження температури криогенних панелей до 4.5К і підвищує швидкість відкачування водню на ~ 20%;
- вперше обґрунтовано застосування і експериментально апробовано метод утримання поляризованих протонів у магнітному полі при транспортуванні мішені із поляризаційного надпровідного магніту в магнітне поле спектрометра CHAOS. Утримання поляризації в магнітному полі під час транспортування дозволило підвищити поляризацію мішені у спектрометрі до 70%.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій доводяться

- аналітичними методами, що використовують побудову математичних моделей, для опису течії в мікроканалах та імітують фрактальну систему тріщин і дефектів у захисних покриттях з використанням сучасного апарату обчислювальної математики та перевіркою адекватності теоретичних моделей і експериментальних даних;
- великим об'ємом отриманих експериментальних даних і довідкових матеріалів, що відтворюють на математичних моделях та створених реальних вакуумних системах ядерно-фізичні характеристики процесів в умовах, наближених до практичних ситуацій.

Достовірність запропонованих методів розрахунку базується на зіставленні з власними експериментальними даними і результатами досліджень інших авторів.

Наукове значення роботи. На відміну від відомих прямих методів заходження об'єктів автором запропонована система саморегульованого паралельного заходження 13 надпровідних магнітів, що знаходяться у 8-ми окремих кріостатах установки по виміру ядерно-фізичних характеристик елементарних часток. У роботі приведена раніше невідома інформація про криві сорбції для гелію, дейтерію, водню, аргону і інших газів, що дозволяє оцінити принципові можливості розділення різних газових компонентів.

Практична цінність отриманих результатів дисертаційної роботи полягає в наступному.

Спроектований, побудований і введений в експлуатацію надпровідний лінійний прискорювач, в якому його основні системи: магнітна, криогенна і вакуумна задовольняють проектним параметрам. Запропонований метод заходження надпровідних компонент кріомодулю є розвитком підходу раніше реалізованого при створенні експериментальної установки по вимірюванню маси спокою електронного антинейтрину.

Введена в експлуатацію система криогенного відкачування для поліпшення вакууму на циклотроні національної лабораторії по фізиці елементарних часток — TRIUMF, Канада. Отримані експериментальні результати по криосорбції водню на криопанелях.

Створена установка нового типу для виміру маси спокою електронного антинейтрино на основі прямого вивчення бета-спектра тритію, що має вищі параметри у порівнянні з раніше створеними установками для цих цілей (роздільна здатність $DE = 3.4$ еВ, фон 10 мГц, густина джерела електронів 10^{11} - 10^{12} см⁻³). Побудована магнітна система на основі 19 надпровідних соленоїдів, що створюють магнітні поля від 0.8 Тл до 5 Тл в молекулярному джерелі і до 8 Тл у бета-спектрометрі. Дія охолодження надпровідних соленоїдів використана двофазна паро-рідинна суміш, що генерується гелієвим рефрижератором. Досягнуто істотне зниження фону на установці по виміру маси спокою електронного антинейтрино за допомогою криогенного відкачування на 4.5 К до поверхнях гелієвих криостатів усередині вакуумної камери бета-спектрометра, що дозволило отримати вакуум в спектрометрі нижче 10^{-10} мбар.

Результати роботи використані при виконанні різних міжнародних проектів з університетами і науково-дослідними лабораторіями Німеччини, Канади та Франції.

Особистий внесок здобувача. Автор взяв активну участь у виготовленні і випробуваннях всіх вузлів вакуумних установок: електростатичного спектрометра, тритієвого молекулярного джерела, системи забезпечення установки рідким гелієм і азотом, а також в проведенні всіх наукових досліджень. Безпосередньо автором проведена розробка і запуск системи криогенного постачання установки, включаючи монтаж, налаштування і запуск всіх вузлів гелієвого зріджування, геліопроводу з азотним екрануванням, системи очищення гелію від домішок і виміру низьких температур на установці в цілому.

Автор взяв головну участь у виготовленні, випробуванні і монтажі на установці всіх надпровідних соленоїдів і їх гелієвих криостатів. Автором самостійно запропонована і успішно реалізована схема забезпечення установки паро-рідинною сумішшю гелію з високою стабільністю підтримки температур надпровідних соленоїдів. У роботах, виконаних спільно з іншими дослідниками, здобувану належать вибір об'єктів дослідження, систематизація експериментальних даних про властивості газового середовища; проведення експериментальних досліджень і перевірка адекватності запропонованих моделей з дослідними даними.

Низка наукових результатів є результатом співробітництва з академіком, проф. Лобашевим В.М., д.ф.-м. н., проф. Ткачовим І.І. - ядерно-фізичні вимірювання; д.ф.-м.н. Казаченко О.В.- аналіз систем вакуумування для ITER; д.ф.-м.н. Кащук Ю.А - ядерно-фізичні аспекти роботи експериментального термоядерного реактора; доктором Полем Делхаєм (Національна лабораторія по ядерній фізиці - TRIUMF, Канада) - питання поляризації протонних

мішеней в циклотронах; д.т.н., проф. Мазуром В.О. - питання моделювання процесів криогенного розділення газів.

Апробація результатів дисертації Основні результати досліджень доповідалися на міжнародних конференціях AIP Conf. Proc., Enchorage, Alaska, 2004; XXII Int. Linear Acc. Conf. (Linac 2004), Lubeck, Germany, 2004; 20th Int. Cryogenic Eng. Conf., Beijing, China, 2004; Particle Accelerator Conference, (Pac05), 2005; 1st Workshop On Operation Of Large Vacuum Systems, Olav-1, Cem, 2005; Int. Vacuum Conf. EVC-9, Paris, France, 2005; Particle Accelerator Conference (PAC09) Vancouver, Be, May, Canada, 2009; Int. Congress Refrigeration, Prague, 2010; EC-ICMC 2011 Spokane, Wa, 2011; Сучасні проблеми холодильної техніки і технології, Одеса, 2013.

Публікації. Основний зміст дисертації приведений у 6 статтях, опублікованих у фахових журналах, які відповідають вимогам МОН України. 10 публікацій представлено у вигляді реферованих доповідей в працях міжнародних конференцій.

Об'єм і структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, основних висновків, списку використаної літератури, що включає 148 джерел і додатків. У ній міститься 126 сторінок основного тексту, 18 таблиць і 46 рисунків.

Основний зміст роботи

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання досліджень; визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, конкретний особистий внесок автора, відомості про апробацію результатів дисертації та публікації.

Перший розділ дисертації присвячений еволюції і розділенню газів у вакуумних системах експериментального термоядерного реактора (ITER). Для багатьох технологічних процесів, наприклад, в установках керованого термоядерного синтезу, прискорювальних-накопичувальних комплексах, імітаторах космосу, в мікроелектроніці, фізиці твердого тіла і ін. необхідно відкачувати газову суміш за умов відсутності в залишковому середовищі пари масла. Безмасляний вакуум забезпечується за допомогою пристроїв кріовакуумної техніки. Для забезпечення умов глибокого вакууму за допомогою кріоконденсації необхідно, щоб кріопанель знаходилася при дуже низьких температурах — декілька градусів Кельвіна, що є складним технічним завданням, вирішення якого супроводжується великими енерговитратами. В той же час, парціальний тиск газів можна істотно знизити за допомогою кріосорбції на сорбентах (вугілля, силікагелі, молекулярні сита, дрібнодисперсні порошки), а також на кріюшарах сконденсованих газів. Основна перевага пристроїв кріовакуумної техніки - принципово безмасляний вакуум - відкриває широкі перспективи по їх використанню в різних галузях науки і техніки. Оптимальне проектування такої складної системи засноване на інформації про динаміку течії і трансформації газів у вакуумній системі термоядерного реактора

У роботі розглядається система відкачування вакуумних камер ITER, до складу якої входять близько 400 вакуумних насосів різного призначення, об'єднаних в мережу. Частина вакуумних камер, що включають кріостат і кріогенну ізоляційну систему, не входить до складу мережевої структури, щоб уникнути можливого радіоактивного забруднення. Інші вакуумовані об'єкти, такі як тороїдальна камера і

інжектори нейтральних пучків, найчастіше сполучені між собою і формують замкнутий паливний цикл. Основні газові потоки наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні газові потоки у вакуумній системі ITER

Ізотопи водню і тритію (DT, DD, HH, HD)	200	400
DT	160	1000
He/H	120	200
N ₂ , Ar, Ne	10	Пульсуючий режим Безперервно
Витоки (повітря, вода, He, Ne, N)	<10 ⁻⁷	

Система криогенного відкачування тороїдальної вакуумної камери Токамака включає до шести великих криосорбційних насосів, які одночасно відкачують нейтралізований газ в районі дивертора, щоб збалансувати газове підживлення плазми і потоки гелію з домішками інших газів, утворених в результаті горіння плазми. Насоси оточені спеціальними камерами для збільшення об'єму регенерації (~ і 4 м³), що дає можливість ізотопам водню не перевищити 45 кПа м³. Насоси спроектовані таким чином, що вони можуть бути ізольовані і регенеровані при температурі ~ 90 К. Відкачування форвакуумною системою і подальше охолодження газу відбуваються за відносно короткої часовий інтервал близько 600 с. Це дозволяє підтримувати тривалі імпульси горіння плазми за допомогою будь-яких 4-х одночасно працюючих насосів, тоді як інші знаходяться в стані регенерації. Два криогенні насоси з конструкцією ідентичною насосам для відкачування тороїдальної вакуумної камери Токамака використовуються для створення вакууму в криостаті.

Криогенна система відкачування інжекторів нейтральних пучків вимагає великі об'єми водню або дейтерію для створення нейтралізованої газової хмари. Криогенні вакуумні насоси для інжекторів нейтральних пучків мають швидкість відкачування понад $3 \times 10^3 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ і забезпечують достатньо низький тиск, що дозволяє уникнути повторної іонізації. При цілодобовій роботі з максимальною частотою дейтерій - тритієвих (DT) імпульсів, потоки ізотопів водню, що накопичилися в крионасосі інжектора нейтрального пучка, вимагають щоденної регенерації. Це "приводить до переривання роботи з плазмою кожні 3 години.

Система форвакуумного відкачування включає кріогенні і механічні насоси. Різні технології, що використовуються в цих насосах, визначаються як вимогами щодо швидкості відкачування, так і складом відкачуваного газу. Всі ізотопи водню із тороїдальної вакуумної камери або із кріогенного насосу інжектора нейтрального пучка, під час регенерації заздалегідь відкачують кріогенним компресором для газів великої в'язкості.

Принципові можливості розподілення різних газових компонентів оцінювали за експериментальними даними для кривих сорбції (рис.1). Проектування компресора проводили на основі CFD моделювання газодинамічних процесів паралельно з побудовою і тестуванням прототипів. Опис газодинамічних процесів в компресорі і теплообміннику проводили за допомогою програм комп'ютерної флюїдної динаміки. Припускали, що газові потоки при тиску нижче 100 Па є ламінарними ($Re < 300$). Число Кнудсена ($Kn = 0.01$) вказує на в'язкісний режим течії. Число Кнудсена може різко зростати, що приводить до режиму розрідженого газу, де стандартне наближення Нав'є - Стоксу не працює.

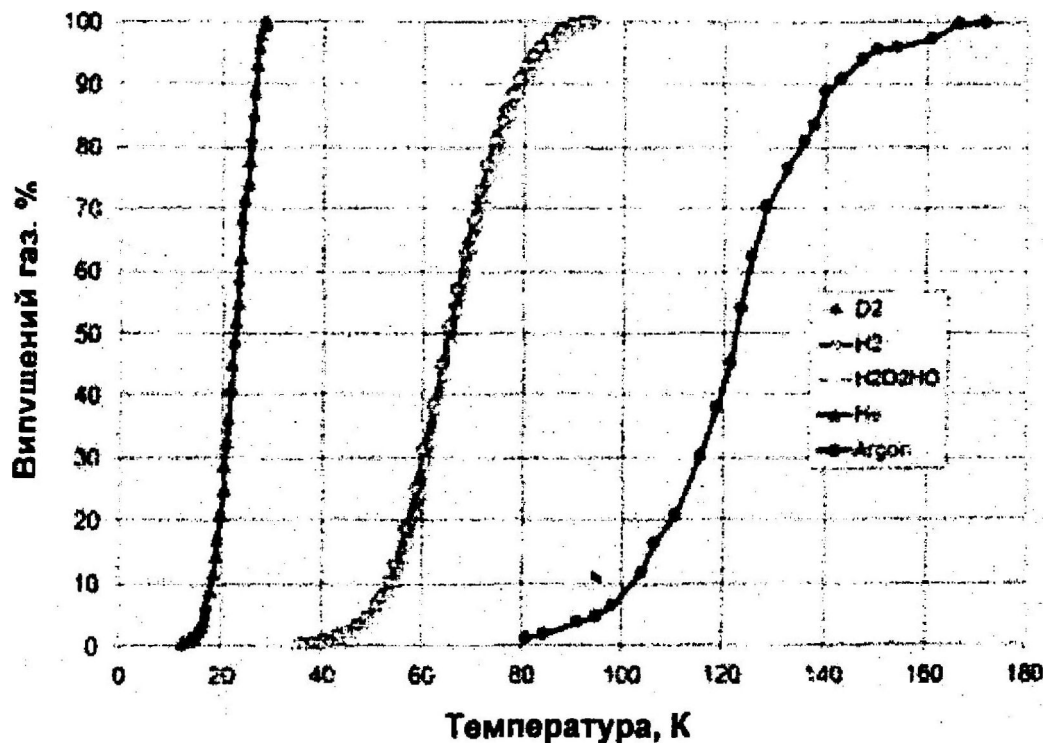


Рис. 1. Експериментальні криві десорбції для різних газових компонентів

Для адекватного опису будь-якої вакуумної системи необхідно знати розподіл концентрацій і потоків часток (молекул) в цій системі. Це стає особливо актуальним для систем кріовакуумної техніки, якій властиві великі коливання температури в різних точках кріопанелі в залежності від теплового навантаження за рахунок відкачуваних молекул газу. Для детального проектування кріовакуумних систем стає необхідним знання того, як інтегральні характеристики, такі як швидкість відкачування і ємність кріосорбенту залежать від масообмінних процесів, що відбуваються на поверхні кріопанелі, від температурного розподілу по поверхні кріопанелі, від мікрогеометрії поверхні і від макрогеометрії всієї системи в цілому.

У другому розділі розглянуто питання моделювання течії двофазних потоків у тріщинах і дефектах. Раннє виявлення течії і їх локалізація є серйозною проблемою при оцінці роботи вакуумних систем, стінки яких охолоджуються водою. Тому моделювання витікання водяної пари через мікротріщини захисних покриттів у вакуум представляє значний інтерес для підвищення надійності роботи термоядерного реактора. У роботі розглянута фрактальна модель мікротріщин в матеріалі стінок охолоджуваних вакуумних судин і дана оцінка втрати тиску при течії рідини через мережу мікроканалів. Фізичний механізм проникнення потоку рідини, що охолоджує, через гіпотетичні щілини і тріщини, що створюють деревовидну структуру мікроканалів, імітується лінійними співвідношеннями нерівноважної термодинаміки для заданого перепаду тиску на стінках судин.. Витрату рідини для ізотермічного потоку визначали на основі методів комп'ютерної флюїдної динаміки в рамках однорідної моделі. Моделювання витоків газів у вакуум через стінки судин зазвичай проводиться для простих геометричних конфігурацій каналів (найчастіше циліндрових або конічних). Реальна картина тріщин в матеріалі стінок значно складніше і імітується деревовидною структурою, в якій розповсюджується парогазовий потік.

Мікротріщини, які створюють мережу мікроканалів в стінках судин, розглядали як фрактальну систему з проміжною розмірністю. У простому випадку, коли розмірність дорівнює одиниці, витік газів відбувається через один мікроканал. Для системи мікротріщин максимальне значення витіку досягається, коли мережа мікроканалів повністю покриває поверхню стінки судини. В даній роботі розглянуто один з можливих алгоритмів генерації мережі мікротріщин на основі властивості самоподібності для довжин і діаметрів мікроканалів. Розглядаючи граничний випадок, коли мережа тріщин охоплює всю поверхню стінки судини (тобто, окремі мікроканали, розмірність яких дорівнює одиниці, повністю покривають площину розмірності $8 = 2$), можна прийти до висновку, що реальне рішення задачі слід шукати для випадку дробової розмірності $1 < 8 < 2$. Наявність фрактальної структури «обганяє» початок процесу випарювання в порівнянні з одиночним мікроканалом і тим самим сприяє збільшенню витоків газу у вакуум. Початок процесу випарювання відбувається, коли тиск стає рівним тиску насичення (у нашому випадку, це спостерігається на відстані близько 2 мм від входу). У цій точці відбувається різкий стрибок швидкості від 0.03 мс^{-1} до 15 мс^{-1} , яка на виході досягає значення до 60 мс^{-1} .

Збільшення фрактальної розмірності мережі мікроканалів приводить до збільшення витрати двофазного середовища у деревовидних структурах у порівнянні з паралельними мікроканалами, що сприяє зростанню витоків газів у вакуум. Це явище спостерігається і в нанопорах. Управління фрактальною розмірністю або, відповідно, варіювання довжинами і діаметрами каналів дозволяє імітувати різні ступені проникності матеріалів стінок вакуумних систем і оцінити величину можливих витоків газів.

Втрати тиску в мережі мікротріщин, якщо нехтувати нелінійними ефектами розгалуження, для ламінарної течії ньютонівської рідини записуються у вигляді:

$$\Delta p = 2\lambda \sum_{k=0}^{\infty} \mu_k v_k \quad (1)$$

де A - постійна, залежна від конфігурації каналу, v_k - швидкість перебігу рідини в каналі для k -го рівня галуження.

Калібрувальна постійна A в рівнянні (1) підбирається за наявними експериментальними даними. Довжину мікроканалів варіювали в інтервалі від 0,03 до 0,01 м, діаметр для визначеності вибирали рівним 7 мікронам. Тиск на вході в мікроканали вважали рівними 0.5 МПа, на виході - 0.1 МПа. Температури задавали рівними 420 К. Для спрощення обчислень в'язкість води і водяної пари рахували постійними: $1,85 \cdot 10^{-4}$ Па·с і $1,4 \cdot 10^{-5}$ Па·с, відповідно. Дискретизація області обчислень, яка включає нерегулярну структуру мікротріщин і матеріалу стінок вакуумних судин, проводили на кінцевому елементі з розбиттям 5x5 вузлів для вибраної моделі генерації фракталу. Спільна область обчислень містить 204x204 вузли.

У основу розрахунків протікання рідини через мікротріщини покладені наступні допущення:

- газова і рідка фази знаходяться в механічній і тепловій рівновазі, тобто їх тиск і температури однакові;
- відсутня чітка межа розділу між фазами;
- процеси миттєвого скипання демпфіруються за рахунок вибору дуже малого часу релаксації $\sim 10^{-8}$ с.

Моделювання течії флюїдів в мікротріщинах проводили на основі рівнянь

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial x_j} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho U_j H)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_{eff} \left(\frac{\partial H}{\partial x_j} \right) \right] + S\{H\}.$$

збереження маси, імпульсу і енергії, відповідно:

[2]

[3]

У перерахованих рівняннях використовується правило підсумовування Індексів Ейнштейна ($y''=1,2,3$). Ефективна в'язкість і ефективний коефіцієнт дифузії визначали наступними співвідношеннями:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t; \Gamma_{eff} = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t},$$

у яких прийняті наступні позначення: ρ - динамічна в'язкість, ν - коефіцієнт турбулентної в'язкості, H - ентальпія, U - швидкість, ρ - густина, Pr, Pr_t - числа Прандтля, G - коефіцієнт дифузії.

Для двофазного потоку використовується однорідна рівноважна модель, в якій передбачається виконання термодинамічних умов рівноваги для швидкостей, тиску і температур фаз, що співіснують. Для суміші ідеальних газів, в якій присутня рідка фаза (в даному випадку, вода - *h2ol*) рівняння стану має вигляд:

$$\frac{M_{i0i}}{I} T \Pi_i P_i \rho \frac{U_{i0i}}{I} Z Y_i X_i \quad /,ч$$

Об'ємна фракція газової суміші обчислюється через відношення густини суміші і рідкої фази

$$0 = \frac{1}{7} \left(\frac{0}{\rho_{h2ol}^{thermo}} - 1 \right) \quad (4)$$

Для забезпечення термодинамічної узгодженості розрахунків всі термодинамічні функції води і водяної пари розраховували на основі рівняння IAPWS-95.

Моделі термодинамічних властивостей включені в програму COMSOL. На рис. 2 показаний процес досягнення стаціонарного стану

В рамках гомогенної рівноважної моделі розроблено алгоритм генерації

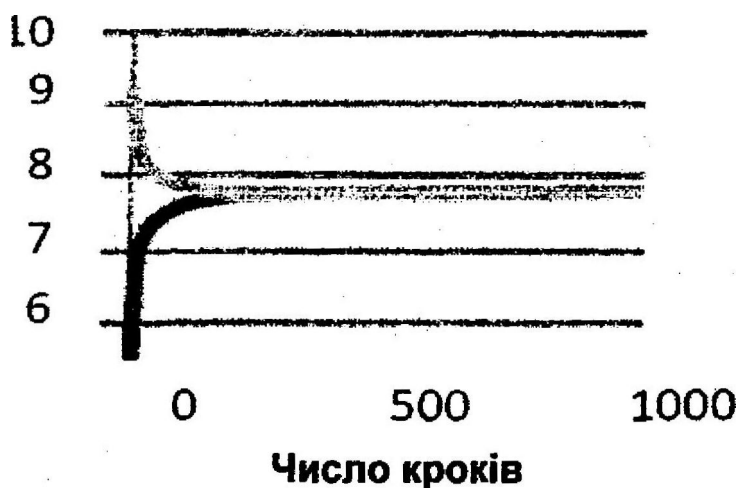


Рис. 2. Встановлення стаціонарного стану при течії газів через мікротріщини в стінках вакуумних судин із нержавіючої сталі. Світліша лінія показує витрату газу на вході.

фрактальної структури різного роду неоднородностей в стінках матеріалів вакуумних судин. По порівнянню з традиційними способами передбачення витоків газів через стінки, в яких розглядаються прості конфігурації мікроканалів, використання фрактальної картини дозволяє зробити висновок про занижений прогноз витоків газів у стандартних моделях.

И

Оцінка витрати газів через систему мікроканалів, що імітують реальну картину мікротріщин у матеріалах стінок вакуумних судин, може бути використана для уточнення вимог до розроблюваних датчиків виявлення витоків.

В третьому розділі розглянуто питання криогенного відкачування вакуумних камер надпровідного лінійного прискорювача ізотопів з гелієвим охолодженням, побудованого в ТКШМР, Канада. Криогенна система на основі двох гелієвих рефрижераторів відповідає за охолодження криомодулів лінійного прискорювача (рис. 3). Гелієва система працює на рівні температур

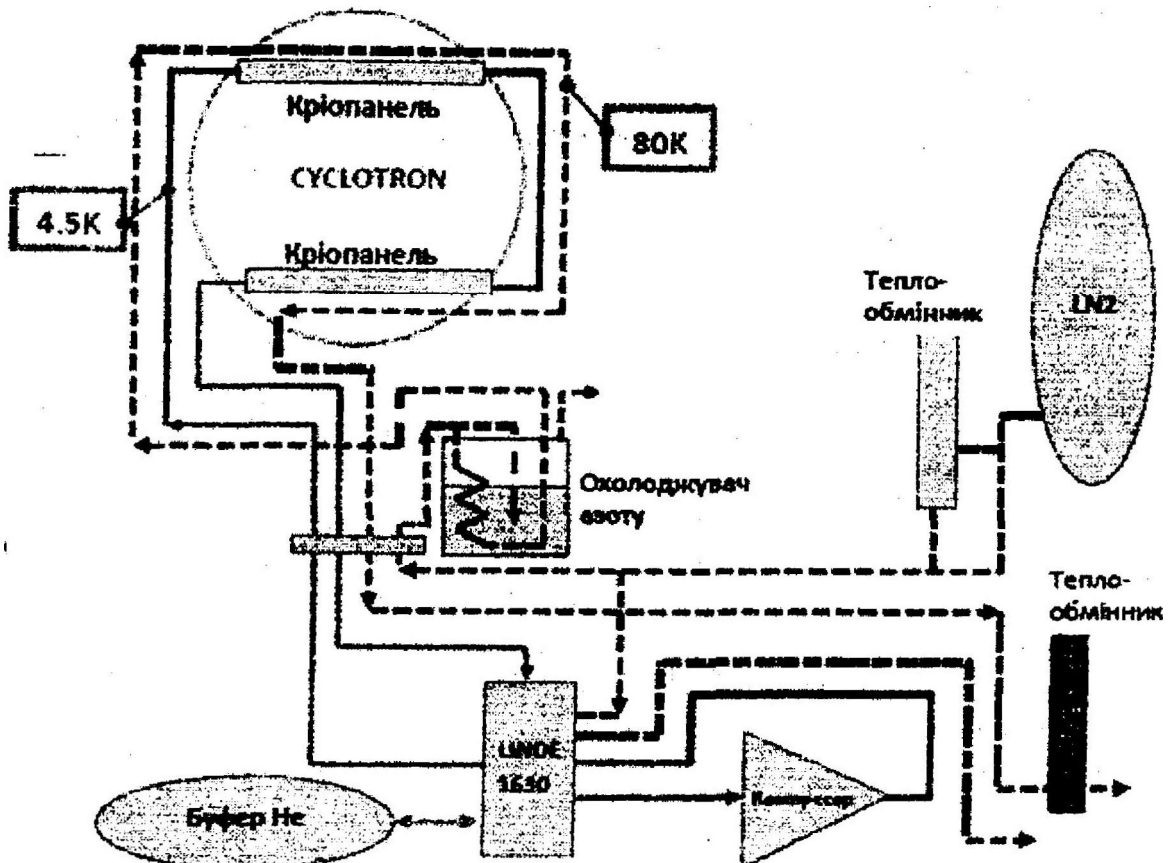


Рис. 3. Схема криогенної системи циклотрона

Конструювання криомодуля проводили з метою створення загальної вакуумної камери для ізоляції криогеніки та транспортування пучка іонів. Рішення зберегти загальний вакуум ґрунтується на досвіді роботи з лінійним прискорювачем. Під час експлуатації прискорювача не спостерігали ніяких свідочств погіршення добротності резонаторів навіть після повторних циклів відігрівання до кімнатної температури. Для зменшення деградації добротності була проведена обробка внутрішніх частин резонатора хімікатами для очищення від жирів і пилу, встановлені азотні холодні «пастки» на вході і виході пучка з криомодуля, тобто до і після надпровідної частини прискорювача. Холодні азотні пастки використовували для запобігання міграції летких речовин (газів) від теплої частини прискорювача і транспортування пучка в надпровідну частину криомодуля.

Кожен кріомодуль складається з двох основних вузлів, збірки верхньої кришки і вакуумної камери. Збірка верхньої кришки (рис. 4) кріомодуля включає у себе кришку вакуумної камери з пермалоевим магнітним екраном і з екраном, що захищає холодну частину при температурах рідкого гелію від теплового випромінювання.

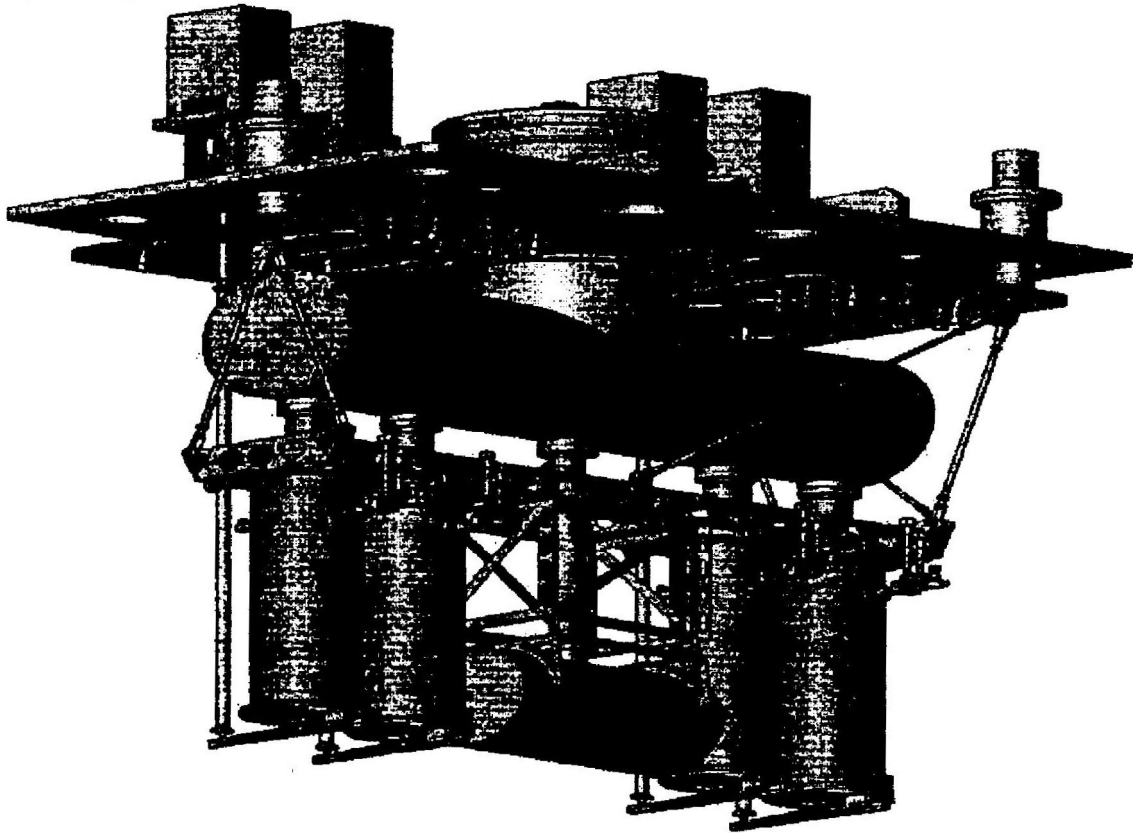


Рис. 4. Збірка верхньої кришки

Тепловий екран охолоджується шляхом примусової циркуляції рідкого азоту. Холодна частина складається із 120 літрового гелієвого резервуару, чотирьох мікрохвильових резонаторів і надпровідного магніту. Система розподілення гелію "павук" забезпечує подачу холодного газу і пізніше рідини у нижню частину кожного надпровідного елемента через 5 міліметрові мідні трубки. Трубки виготовлені однакової довжини, що природним чином забезпечує рівні провідності для газового потоку при охолодженні. подача гелію в нижні частини охолоджуваних компонентів забезпечує оптимальний теплообмін газового потоку з охолоджуваними компонентами. Це відповідно укорочує час охолодження, що є критичним для отримання рекордних параметрів ніобієвих резонаторів. Збірка вакуумної камери складається із самої вакуумної камери, пермалоевого екрану і теплового екрану, який охолоджується шляхом циркуляції рідкого азоту. Для забезпечення багатьох технологічних процесів, наприклад, в установках керованого термоядерного синтезу, прискорювально-накопичувальних комплексах, імітаторах космосу, у мікроелектроніці, фізиці твердого тіла і т. п. Необхідно відкачувати газову суміш при умові відсутності в остаточному середовищі парів масла. Відкачуваний газ подається на кріопанель через трубопровід, діафрагму, вентиль і т. п. Для вимірювань використовували температурні датчики компанії Лакс Шорі на основі діодів. Точність вимірювання складала 0,1К при температурах нижче 6К, 1К при температурах вище 6К.

У четвертому розділі розглянуто питання саморегульованого охолодження

системи паралельно з'єднаних надпровідних магнітів. Магнітна система вміщує 15 надпровідних соленоїдів. Соленоїди намотані проводом БГТі (50% Ті), діаметром 0,85 мм з кількістю жил 1045, що мають високу щільність току $\sim 4 \cdot 10^5$ а/см² в поле 5 Тл. Соленоїди досліджували у гелієвій ванні при температурі 4,2 К і піддавали тренуванню шляхом повторних струмових підживлень. Робочий струм вибирали з необхідним запасом ~ 200 А (критичний струм для соленоїдів складав більше 300 А).

Соленоїди розміщені у незалежних гелієвих кріостатах, один з яких довжиною 4,5 м (дев'ять соленоїдів), п'ять - довжиною по 0,6 м (один соленоїд) і один довжиною 0,25 м (один соленоїд). Єильфони розв'язи між кріостатами і по краях ланцюга кріостатів забезпечували компенсацію температурних навантажень. Кріостати паралельно охолоджуються двофазним потоком гелію при температурі 4,5 К із нижнього колектора. Зворотний потік збирається у верхньому колекторі і відводиться знову на кріозавод по транспортній лінії. Завдяки високій різниці гідравлічних опорів, кріостати до температури 14 К охолоджуються нерівномірно, а нижче - система саморегулюється і заохолоджується рівномірно. Сумарне теплопідведення до холодної маси (~ 450 кг) складає близько 10 Вт. Структура системи охолодження надпровідних магнітів на рівні температур рідкого гелію та кріогенна система установки відображені на рис. 5, 6.

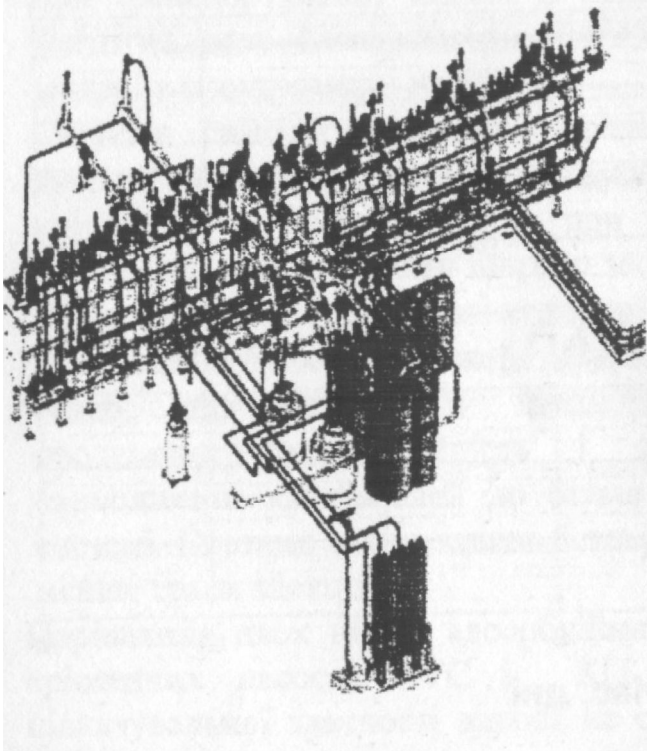


Рис. 5. Кріогенна система надпровідного лінійного прискорювача іонів

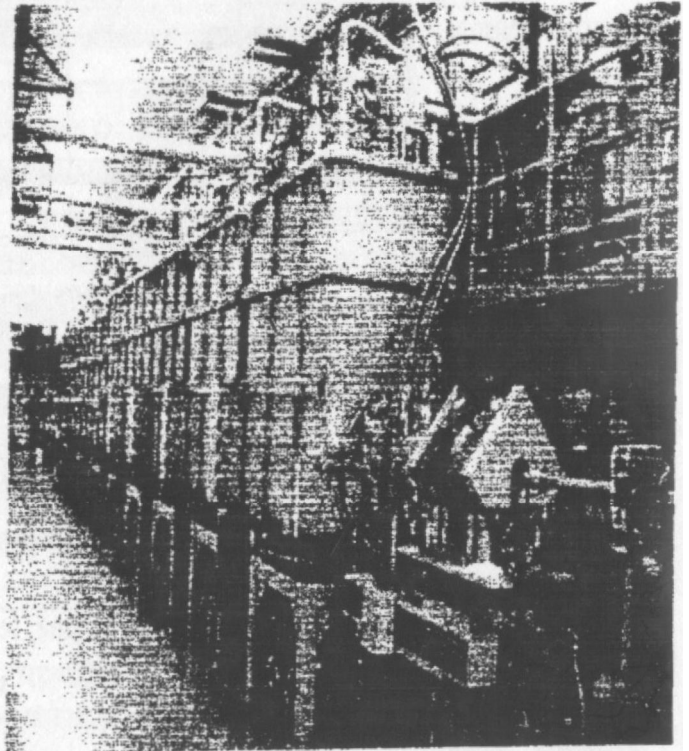


Рис. 6. Зовнішній вигляд надпровідного лінійного прискорювача іонів

Загальна кількість криостатів установки складає 12, з них вісім розташовані в зоні генерації тритію, чотири у спектрометрі, і окремий відсічний криостат - перед зріджувачем TCF-20. Охолоджуючий двофазний потік гелію з температурою 4,5 - 4,6 К, який йде від дроселя зріджувана TCF-20 під невеликим тиском 0,06 - 0,08 МПа, являє собою двофазну суміш із рідини (~ 40%) і пара (-60%), яка послідовно проходить увесь ланцюг із 12 криостатів і охолоджує надпровідні соленоїди до температури 4,5 - 4,6 К.

Після повернення потоку гелію у зріджувач TCF-20 із потоку відсікається рідина у спеціально вбудований циркуляційний контур відсічного криостату об'ємом 10 л. Газовий потік, що залишився при температурі 4,6 К та при тиску 0,01 МПа, надходить в нижній теплообмінник зріджувана. Спеціально розроблена система розподілу потоку гелію дозволила забезпечити рівномірне і швидке охолодження всіх соленоїдів. Саморегульоване захолювання надпровідних компонент криомодулей, резонаторів і магнітів підвищує добротність резонаторів надпровідного прискорювача

В роботі проведено порівняння двох нових адсорбційних матеріалів, що використовуються в криогенних насосах (Helix Technology Corporation - НТС і Технологічний Інститут Карлсруе - КІТ). Ріс.7 показує парціальні тиски водню, гелію і води при відкачці в аналогічних умовах крионасосом з використанням ЮТ і НТЕ зразків сорбентів.

Поверхня зразка КІТ приблизно на 23 % менша. Крім меншої зони нанесеного

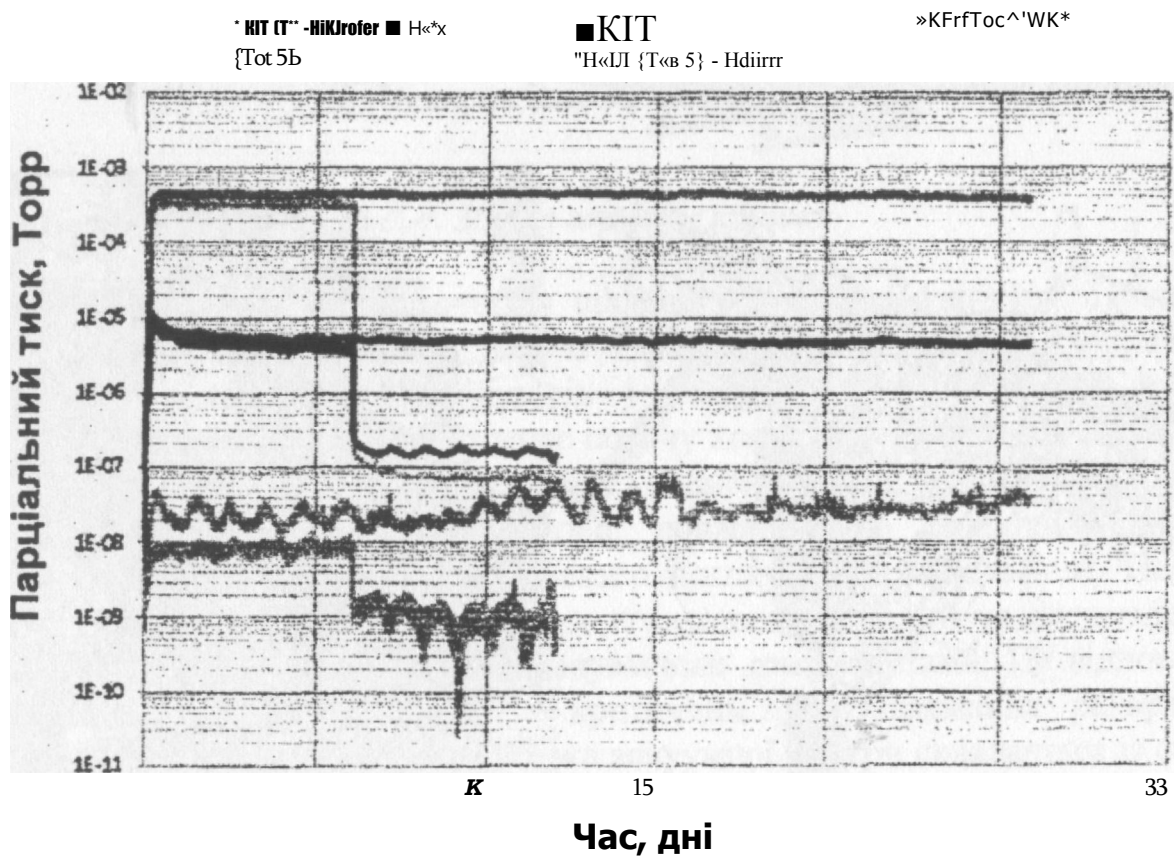


Рис. 7. Парціальні тиски у водневій камері

покриття, зразок КИТ має набагато меншу товщину. Це викликало

45 % зниження підкачувальної здатності насоса на одиницю площі сорбційного покриття зразка. У той же час спостерігалось 21 % зростання швидкості відкачки на одиницю поверхні КІТ сорбенту, хоча збільшення швидкості відкачки всього зразка було незначним.

ВИСНОВКИ

1. В рамках гомогенної рівноважної моделі створено метод розрахунку фрактальної структури різного роду неоднорідностей в стінках матеріалів вакуумних судин. У порівнянні з традиційними способами прогнозування витоків газів через стінки судин, в яких розглядаються прості конфігурації мікроканалів, використання фрактальної картини дозволяє прогнозувати занижений виток газів (~10%). Використання CFD моделювання течії двофазних потоків в тріщинах і дефектах є сучасним інструментом для розрахунку газового навантаження при проектуванні великих вакуумних систем в ядерній індустрії і прискорювальній техніці.
2. Кріогенне відкачування вакуумних камер є найбільш оптимальним і, частіше всього, єдино можливим в сучасних термоядерних реакторах і прискорювачах. Кріогеніка дозволяє створити чистий безмасляний вакуум і забезпечує високі швидкості відкачування водню і гелію в широкому діапазоні тиску у вакуумній камері. Метод відкачування вакуумної камери циклотрона забезпечує зниження температури криогенних панелей до 4.5К і підвищує швидкість відкачування водню на ~ 20%;
3. Застосування методу утримання поляризованих протонів у магнітному полі при транспортуванні мішені із поляризаційного надпровідного магніту в магнітне поле спектрометра CHAOS дозволило підвищити поляризацію мішені в спектрометрі до 70%.
4. Системи саморегульованого паралельного охолодження дозволяють суттєво прискорили процес охолодження устаткування, що працює при криогенних температурах при мінімальних капіталовкладеннях. Саморегульовані системи широко застосовуються у надпровідних магнітах, а також при захолюванні надпровідних систем магнітів і резонаторів.
5. Тестування нового рефрижератору, що працює на рівні температур рідкого гелію, для 500 MeV циклотрона після 5 років експлуатації продемонструвало надійність і забезпечило вакуум в резервуарі при охолодженні криопанелей до більш низької температури, ніж у відомій системі. Система також здатна безперервно працювати протягом періоду не менше трьох місяців.
6. Порівняння двох нових адсорбційних матеріалів, що використовуються в криогенних насосах НТС і КІТ продемонструвало 45 % зниження підкачувальної здатності насоса на одиницю площі сорбційного покриття. Крім меншої зони нанесеного покриття, зразок КІТ має набагато меншу товщину та є економічно привабливим.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Секачев И. Моделирование течей в вакуумных системах [текст] / И. Секачев, В.

Мазур // Холодильна техніка і технологія. - 2013, - №4. - с. 19 - 24.

Особистий внесок: ідея роботи, літературний огляд, обробка експериментальних даних.

2. Sekachev I. Gas Species, Their Evolution And Segregation Through ITER Vacuum Systems [Текст] /1. Sekachev, R. Pearce, A. Antipenkov, M. Dremel, L. Worth // Vacuum - 2012, - 86 - p.1725-1730.
Особистий внесок: ідея роботи, огляд літературних джерел, аналіз інформації
3. Sekachev I. Testing Of A New Cryoadsorber For Potential Sitewide Cryopump Upgrades [текст] /1. Sekachev, AN. Koveshnikov, R.E. Laxdal // Tri-Dn-11-21, TRIUMF Design Note - 2011, p. 1 -18.
Особистий внесок: огляд літературних джерел, тестування кріопомпи
4. Laxdal, R.E. Recent Progress In The Superconducting Rf Program At TRIUMF/ISAC [текст]/ R.E Laxdal.; Fong, K.; Laverty, M.; Mitra, A.; Poirier, R.; Sekachev, I.; Zvyagintsev // Physica C: Superconductivity And Its Applications. - 2006, - 441 (issue 1-2),-p. 13-20.
Особистий внесок: огляд сучасних досягнень в галузі надпровідності, аналіз інформації.
5. Sekachev I., Magnetic Field Studies In The ISAC-II Cryomodule [Текст]/ Laxdal, R.E.; Boussier, B.; Fong, K.; Sekachev, I.; Clark, G.; Zvyagintsev, V.; Eichhom, RV/Physica C: Superconductivity And Its Applications - 2006. 441(1-2). - P. 225-228
Особистий внесок: ідея роботи, огляд літературних джерел, аналіз інформації.
6. Sekachev, I. Status Of The Cyclotron Vacuum System At TRIUMF [Текст]/ I. Sekachev //Vacuum - 2006. - 80(26). - p. 390-394,
7. Sekachev I. Recent Cyclotron Vacuum System Problems / I. Sekachev, D. Yosifov // Proc. of 1st Workshop on Operation of Large Vacuum Systems, OLAV-1, CERN, - 2005.
Особистий внесок: ідея роботи, огляд літературних джерел, аналіз вакуумних систем
8. Sekachev I. Status of the Cyclotron Vacuum System at TRIUMF /1. Sekachev // Proc. of Int. Vacuum Conf. EVC-9, Paris, France - 2005.
9. Sekachev I. Status of the ISAC-II Cryogenic System /1. Sekachev, W. Andersson R.E. Laxdal// Cryogenic Engineering Conference, - 2005.
Особистий внесок: огляд сучасних досягнень в галузі кріогенних систем
10. Sekachev I. TRIUMF Cyclotron Vacuum System Upgrade and Operational Experience / I.Sekachev, Y. Bylinskii, A Koveshnikov // Particle Accelerator Conference (PAC09) Vancouver, BC, JVlay, - 2009
Особистий внесок: тестування вакуумних систем циклотрона.
11. Sekachev I. The Design and Test of Plug-In Cryopumps /1. Sekachev, G. F. Pan, Z.G.Li, J.C.Qin // MO6RFP022, PAC - 2009
Особистий внесок: проектування та тестування кріогенних систем
12. Sekachev I. Overview of the Cryogenic System for the ISAC-II Superconducting Linac at TRIUMF/ I. Sekachev, W. Andersson, R.E. Laxdal // Proc, 19th Int. Cryogenic Eng. Conf., Grenoble, France, - 2002.
Особистий внесок: огляд сучасних досягнень в галузі кріогенних систем для прискорювачів іонів, аналіз інформації
13. Sekachev I. Design of the Medium Beta Cryomodule for the ISAC-II

- Superconducting Heavy Ion Accelerator/I.Sekachev, G. Stanford, R. Laxdal, C. Marshall // AIP Conf. Proc. 710,, Anchorage, Alaska,-2004-p. 552 *Особистий внесок: проектування кріомодуля*
14. Sekachev I. Engineering and Cryogenic Testing of the ISACJI Medium Beta Cryomodule / I. Sekachev, G. Stanford, Y. Bylinskii, R.E. Laxdal // Proc. XXII Int. Linear Acc. Conf. (LINAC 2004), Lubeck, Germany,- 2004
Особистий внесок: огляд результатів тестування, аналіз інформації.
15. Sekachev I. Cold Test Results of the ISAC-II Medium Beta High Gradient Cryomodule / I.Sekachev, R.E. Laxdal, I. Bylinskii, G.S. Clark // Proc. XXII Int. Linear Acc. Conf. (LINAC 2004), Lubeck, Germany,- 2004
Особистий внесок: огляд результатів тестування кріомодуля, аналіз інформації.
16. Sekachev I. Status of the ISAC-II Cryogenic System/1. Sekachev, W. Andersson, ' R.E. Laxdal // Proc. 20th Int. Cryogenic Eng. Conf., Beijing, China, 2004
Особистий внесок: огляд кріогенних систем в галузі надпровідності, аналіз інформації
17. Sekachev I. Cryogenic, Magnetic and RF Performance of the ISAC-II Medium Beta Cryomodule at TRIUMF /1. Sekachev, R.E. Laxdal, K. Fong, A.K. Mitra // Particle Accelerator Conference, PAC05,2005
Особистий внесок.участь в експериментальних дослідженнях кріомодуля, аналіз інформації
18. Sekachev I. ISAC-II Phase-II Refrigerator Commissioning and First Operational Experience at TRIUMF /1. Sekachev, D. Kishi, R.E. Laxdal // CEC/ICMC, 2009
Особистий внесок: досвід експлуатації кріогенних систем
19. Sekachev I. Overview of the Cryogenic System for the ARIEL e-linac at TRIUMF / I. Sekachev, Y. Bylinskii, D. Kishi // C3OrC-05, CEC-ICMC 2011 Spokane, WA, - 2011
Особистий внесок: огляд сучасних досягнень в галузі кріогенних систем для прискорювачів іонів

АНОТАЦІЯ

Секачов І.В. Динаміка кріогенного розділення газів у вакуумних системах. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.14 - холодильна, вакуумна та компресорна техніка системи кондиціонування. - Одеська національна академія харчових технологій МОН України, Одеса, 2014.

Дисертація присвячена обґрунтуванню і розвитку науково - технічних підходів до моделювання динаміки кріогенного розділення газів у вакуумних системах, що забезпечують максимальну енергетичну ефективність різних ядерно- фізичних процесів.

Запропоновано математичну модель витоків газів при роботі вакуумних систем, стінки яких охолоджуються водою , на основі динаміки кріогенного поділу газів через фрактальну мережу мікротріщин захисних покриттів. Розглянуто фрактальна модель мікротріщин в матеріалі стінок охолоджуваних вакуумних посудин для експериментального зразка термоядерного реактора. Наведено оцінку втрати тиску при течії рідини через мережу мікроканалів . Розглянуто фізичний механізм проникнення потоку охолоджуючої рідини через

гіпотетичні щілини і тріщини, що утворюють деревоподібну структуру мікроканалів, описується лінійними співвідношеннями нерівноважної термодинаміки для заданого перепаду тисків на стінках посудини. На основі методів комп'ютерної флюїдної динаміки в рамках однорідної моделі суцільного середовища розрахована витрата рідини для ізотермічного потоку. Розроблена кріогенна система саморегульованого паралельного заохолодження мережі надпровідних магнітів, в якій досягнута робоча температура 4,5 к, для збору електронів при бета - розпаді тритію.

Удосконалено метод саморегульованого охолодження надпровідних компонент кріомодулів, резонаторів і магнітів для поліпшення добротності резонаторів надпровідного прискорювача. Обґрунтовано застосування та експериментально апробовано метод збереження поляризації протонів в магнітному полі при транспортуванні протонної мішені з поляризаційного надпровідного магніту в магнітне поле спектрометра. Розроблена кріогенна система зниження температури кріоконденсаційних панелей для збільшення швидкості відкачування водню з вакуумної камери протонного циклотрона.

Ключові слова: Мікротріщини - Вакуумні системи - Кріогенна сепарація Фрактальні моделі - Витік газів - Деревовидні мікроканали

АННОТАЦІЯ

Секачев И.В. Динамика криогенного разделения газов в вакуумных системах. - 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.

Диссертация посвящена обоснованию и развитию научно-технических подходов к моделированию динамики криогенного разделения газов в вакуумных системах, обеспечивающих максимальную энергетическую эффективность различных ядерно-физических процессов.

Предложена математическая модель утечек газов при работе вакуумных систем, стенки которых охлаждаются водой, на основе динамики криогенного разделения газов через фрактальную сеть микротрещин защитных покрытий. Рассмотрена фрактальная модель микротрещин в материале стенок охлаждаемых вакуумных сосудов для экспериментального образца термоядерного реактора. Приведена оценка потери давления при течении жидкости через сеть микроканалов. Физический механизм проникновения потока охлаждающей жидкости через гипотетические щели и трещины, образующие древовидную структуру микроканалов, описывается линейными соотношениями неравновесной термодинамики для заданного перепада давлений на стенках сосуда. На основе методов компьютерной флюидной динамики в рамках однородной модели сплошной среды рассчитан расход жидкости для изотермического потока.

Разработана кріогенна система саморегулюємого паралельного заохолодження мережі надпровідних магнітів, в якій досягнута робоча температура 4,5к, для збору електронів при бета-розпаді тритію і їх наступної транспортування в спектрометр для енергетичного аналізу

Усовершенствован метод саморегулируемого захлаживания сверхпроводящих компонент криомодулей, резонаторов и магнита для улучшения добротности резонаторов сверхпроводящего ускорителя. Обосновано применение и экспериментально апробирован метод сохранения поляризации протонов в магнитном поле при транспортировке протонной мишени из поляризационного сверхпроводящего магнита в магнитное поле спектрометра. Разработана криогенная система снижения температуры крио- конденсационных панелей для увеличения скорости откачки водорода из вакуумной камеры протонного циклотрона.

Ключевые слова: Микротрещины - Вакуумные системы - Криогенная сепарация Фрактальные модели - утечка Газов - Древоподобные микроканалы

THE SUMMARY

Sekachev I.V. Dynamics Of The Cryogenic Separation Of Gases In Vacuum Systems. -Manuscript.

Thesis for a candidate of science (engineering) degree by specialty 05.05.14 - refrigeration, vacuum and compressor technologies, air conditioning systems- Odessa national academy of food technologies. Odessa. 2014.

Thesis is devoted to the substantiation and development of scientific and technical approaches to modeling the dynamics of the cryogenic separation of gases in vacuum systems for maximum energy efficiency of various nuclear processes . Fractal model of microfractures in the walls of cooled vacuum vessels for experimental thermonuclear reactor was considered. Pressure losses for fluid flow through microchannel network were estimated. Physical mechanism of cooling fluid penetration via hypothetical slits and cracks generating tree-structured microchannel network is described. Computer fluid dynamics approach for homogeneous equilibrium model was applied to calculate the isothermal fluid flow. The estimation of loss of pressure in fluid through a network of microchannels. The physical mechanism of the penetration of the coolant flow through the cracks and crevices hypothetical forming microchannels tree structure is described by linear equations for the equilibrium thermodynamics predetermined differential pressure on the vessel walls . Based on the methods of computer fluid dynamics within a homogeneous continuum model calculated flow rate for isothermal flow

The cryogenic system of self-regulating parallel network of cooling of superconducting magnets, which reached operating temperature 4.5 k , for the collection of electrons in the beta decay of tritium and their subsequent transport to the spectrometer for energy analysis.

Improved self-regulatory method of cooling the superconducting component cryomodules, resonators and a magnet to improve the quality factor of the superconducting accelerator cavities. The application of the method and experimentally tested the conservation of proton polarization in a magnetic field during transport proton target polarization of a superconducting magnet in a magnetic field of the spectrometer. Developed cryogenic system temperature reduction cryo - condensation panels to increase the pumping speed of the vacuum chamber hydrogen proton cyclotron.

Keywords: Microcracks - Vacuum Systems - Cryogenic Separation - Fractal Models - Leaking Gas - Tree Microchannels;