

Державний вищий навчальний заклад
«Запорізький національний університет»
Міністерства освіти і науки України

О.С. Яновський

ВАКУУМНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ВИРОБНИЦТВІ НАНОМАТЕРІАЛІВ

Методичні вказівки
для магістрів I курсу математичного факультету спеціальності
«Прикладна фізика»

Затверджено
вченою радою ЗНУ
Протокол №__від_____

Запоріжжя
2020

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	4
1 Основні терміни і визначення	7
1.1 Загальні поняття	7
1.2 Вакуумні системи та їхні елементи	9
1.3 Пристрої для створення вакууму	10
1.4 Течошування	13
1.5 Розрахункові поняття вакуумної техніки	14
2 Перелік лабораторних робіт та графік їх виконання	15
3 Завдання до розрахункових робіт	16
3.1 Розрахункова робота «Основи молекулярно-кінетичної теорії газів»	16
3.2 Розрахункова робота «Явище переносу і сорбційні явища»	19
3.3 Розрахункова робота «Теча розріджених газів»	22
4 Завдання до лабораторних робіт	27
4.1 Лабораторна робота «Механічні вакуумні насоси з масляним ущільненням»	27
4.2 Лабораторна робота «Пароструминні дифузійні насоси»	30
4.3 Лабораторна робота «Кріоадсорбційні насоси»	34
4.4 Лабораторна робота «Сублимаційні геттерні та іонно-сорбційні насоси»	36
4.5 Лабораторна робота «Теплові манометричні перетворювачі»	37
4.6 Лабораторна робота «Іонізаційні манометричні перетворювачі»	43
4.7 Лабораторна робота «Вимірювання парціальних тисків»	45

4.8 Лабораторна робота «Вакуумні герметичні з'єднання»	54
4.9 Лабораторна робота «Елементи конструкцій вакуумних систем»	55
4.10 Лабораторна робота «Типові схеми вакуумних установок. Одержання вакууму»	57
5 Індивідуальна робота «Матеріали вакуумних систем»	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	60

ПЕРЕДМОВА

Вакуумна техніка знайшла широке застосування практично у всіх галузях науки і техніки як для реалізації технологічних процесів виготовлення різноманітних видів продукції, фізико-технічних експериментів, дослідів, так і для створення умов нормального функціонування багатьох пристроїв, приладів та агрегатів.

Метою даного спецкурсу є:

- формування загальних уявлень про фізичні основи створення вакууму;
- надання необхідних теоретичних знань з фізики вакууму, методів одержання і вимірювання вакууму;
- отримання практичних навичок експлуатації сучасного вакуумного устаткування.

Вакуумна техніка – прикладна наука, що вивчає методи одержання і збереження вакууму, техніку проведення вакуумних вимірювань, а також питання розробки, конструювання і застосування вакуумних систем та їхніх функціональних елементів.

З наведеного визначення випливає, що виконання лабораторного спецкурсу «Основи фізики вакууму та вакуумних технологій» слід розбити на ряд етапів, пов'язаних із вивченням:

- фізики вакууму, в основі якої лежить молекулярно-кінетична теорія газів;
- основ вакуумного матеріалознавства;
- техніки вакууму (методи одержання і вимірювання);
- основ вакуумної технології.

Завданням першого етапу є повторення основних понять із молекулярно-кінетичної теорії газів, таких, як тиск газу, закони ідеального газу, розподіл молекул газу за швидкостями, середня довжина вільного пробігу молекул, явища переносу енергії, сорбційні явища, тощо. На цьому етапі необхідно також вивчити режими течії розріджених газів по трубопроводах, основи методів розрахунку провідності елементів вакуумних систем, основне рівняння вакуумної техніки, принципи побудови схем вакуумних установок та їхні основні типи.

На другому етапі основну увагу необхідно приділити вивченню вимог, що ставляться до конструкційних матеріалів вакуумних систем, таких, як вакуумна щільність, газоутримування,

легкість знегажування, теплова, хімічна й електроізоляційна стійкість, зварюваність, оброблюваність, тощо. Тут же необхідно розглянути класифікацію матеріалів вакуумних систем, їхні основні марки, призначення та характеристики.

Третій етап є центральним у даному спецкурсі. Тут необхідно вивчити класифікацію, принцип роботи й основні види засобів відкачки вакуумних систем та вимірювання тиску в них. Докладніше слід зупинитися на вивченні принципу роботи, умов експлуатації та технічних характеристиках механічних, струминних і сорбційних насосів, теплових й іонізаційних вакуумметрів, мас-спектрометрів. Необхідно також розглянути класифікацію й конструкції вакуумних з'єднань, запірно-регулюючої апаратури, конструкційних елементів вакуумних установок.

На останньому етапі освоєння спецкурсу необхідно ознайомитись з питаннями підготовки поверхні вакуумних систем для роботи в умовах вакууму, течепошукування, випробування вакуумних насосів і агрегатів, вакуумної гігієни, експлуатації вакуумних систем.

1 Основні терміни і визначення

1.1 Загальні поняття

Вакуум – стан газу, при якому його тиск нижче за атмосферний.

Граничний залишковий тиск – найменший тиск, що може бути досягнутий за визначених умов конкретними пристроями для відкачки.

Форвакуум – вакуум, що створюється насосом нижчого вакууму при послідовній роботі кількох насосів.

Відкачка – зменшення молекулярної концентрації газу за допомогою пристроїв, що видаляють або поглинають газ.

Натікання – проникнення газу з навколишнього середовища до відкачуваної посудини.

Газовиділення – виділення газу з матеріалу у вакуум.

Знегажування – операція навмисного видалення газу з матеріалу.

Залишковий газ – газ, що залишився у вакуумній системі після відкачки.

Течія газу – переміщення газу в трубопроводі під дією різниці тисків або температур на його кінцях.

Молекулярна течія – течія газу, при якій середня довжина вільного пробігу молекул більша або порівнянна з мінімальними розмірами елемента вакуумної системи.

В'язкісна течія – ламінарна течія, в якій визначальну роль відіграють в'язкісні сили.

Зворотний потік пари робочої рідини – переміщення пари робочої рідини у зворотному від напрямку відкачки напрямку.

Густина газу – маса одиниці об'єму газу.

Парціальна густина газу – густина, яку мав би газ, що входить до газової суміші, якби з неї були видалені інші гази, за умови зберігання початкових об'єму і температури.

Молекулярна концентрація газу – число молекул газу в одиниці об'єму.

Тиск газу – нормальна складова сили, з якою газ діє на одиницю поверхні, що його оточує.

Абсолютний тиск газу – тиск газу, що відлічується від

нульового.

Парціальний тиск газу – тиск, що створюється хімічно індивідуальним газом, який утримується в газовій суміші. Парціальний тиск газу дорівнює тиску, що чинив би цей газ, якби з об'єму, що займає газова суміш, були видалені інші гази, за умови зберігання початкових об'єму та температури.

Атмосферний тиск – абсолютний тиск атмосфери.

Нормальний стан газу – стан газу за нормальних умов: тискові 101 325 Па (760 мм рт. ст.) і температурі 273°K (0°C).

Довжина вільного пробігу частинки – довжина пробігу частинки між двома послідовними зіткненнями з іншими частинками.

Середня довжина вільного пробігу частинок – середнє арифметичне значення довжин вільного пробігу частинок.

Ефективна довжина вільного пробігу частинок – відношення середньої довжини вільного пробігу частинок до вірогідності здійснення певного процесу (явища) в результаті одного зіткнення.

Розріджений газ – газ із молекулярною концентрацією, нижчою за його концентрацію за нормальних умов.

Коефіцієнт захоплення – відношення числа молекул, захоплених поверхнею, до загального числа молекул, що потрапляють на цю поверхню (коефіцієнт прилипання).

Коефіцієнт акомодатії – відношення енергії, дійсно одержаної молекулами газу від твердого тіла, до енергії, яку вони б одержали, якби при ударі встановилася температурна рівновага між твердим тілом і відбитими від нього молекулами газу (пари).

Умовний прохід – діаметр прохідного перетину елементу вакуумної системи, що визначає стикувальні розміри за чинними стандартами.

Герметичність вакуумної системи – властивість елементів вакуумних систем та їхніх з'єднань забезпечувати настільки мале проникнення газу крізь них, щоб ними можна було знехтувати в робочих умовах.

1.2 Вакуумні системи та їхні елементи

Вакуумна система – сукупність пристроїв для створення вакууму, приладів для вакуумних вимірювань, а також посудин та трубопроводів, що їх зв'язують.

Вакуумна установка – установка, що складається з вакуумної системи та пристроїв, що забезпечують її діяльність.

Вакуумний агрегат – вакуумна установка, що конструктивно виконана як єдине ціле.

Відкачний пост – вакуумна установка, призначена для відкачки, наповнення і тренування виробів.

Елемент вакуумної системи - прилад, збірна одиниця або деталь якої призначені для виконання певних функцій у вакуумній системі.

Камера, що відкачується – об'єм, що відкачується, і в якому створюється вакуум, необхідний для різноманітних технологічних процесів.

Захисний балон – посудина, призначена для оберігання елементів вакуумних систем від потрапляння в них сторонніх тіл.

Зрівняльний балон – посудина, призначена для вирівнювання коливань тиску у вакуумній системі.

Вакуумний трубопровід - трубопровід, яким переміщується розріджений газ у вакуумній системі.

Форвакуумний трубопровід – вакуумний трубопровід, що служить для приєднання вакуумної системи до форвакуумного насосу.

Байпасний трубопровід – вакуумний трубопровід, призначений для відкачки посудини в обхід високовакуумного насоса та арматури великих прохідних перетинів.

Гребінка – трубка з рядом паростків, призначена для приєднання кількох відкачуваних посудин.

Вакуумний шлюз – пристрій для введення у вакуумну систему або видалення з неї різноманітних об'єктів без порушення вакууму.

Вакуумне мастило – ущільнювач у вигляді в'язкої речовини з низьким тиском пари, що застосовується у рухливих з'єднаннях вакуумних систем.

Вакуумна замазка – ущільнювач у вигляді пластичної

речовини з низьким тиском пари, що застосовується у розбірних нерухомих з'єднаннях вакуумної системи, а також для замазування течі.

Шліф – сукупність двох пришліфованих поверхонь, що забезпечує герметичне з'єднання елементів вакуумної системи.

Вакуумний шланг – гнучка трубка, яка не деформується під дією атмосферного тиску і служить для з'єднання окремих елементів вакуумної системи.

Вакуумний клапан – пристрій, що дозволяє регулювати або цілком припиняти потік газу у вакуумній системі.

Вакуумний затвор – вакуумний клапан, що дозволяє з'єднувати і роз'єднувати елементи вакуумної системи.

Вакуумний кран – вакуумний клапан, зміна провідності в якому здійснюється обертанням навколо своєї вісі деталі конічної або циліндричної форми з одним або кількома проходами.

Натікач – вакуумний клапан, що дозволяє регулювати і встановлювати малі потоки газу.

Напускний клапан – вакуумний клапан, призначений для напуску повітря або газу в вакуумну систему до атмосферного або будь-якого заданого тиску.

Конденсаційна пастка – пристрій для уловлювання пари або газів, дія якого заснована на конденсації пари і газів на внутрішніх поверхнях, що охолоджуються.

Сорбційна пастка – пристрій для уловлювання пари або газів, дія якого заснована на сорбції пари і газів на поверхні сорбенту.

Вихлопний фільтр – пристрій, розташований на стороні вихлопу вакуумного насоса з масляним ущільненням і призначений для очищення вихлопного газу від масляного туману.

1.3 Пристрої для створення вакууму

Вакуумний насос – пристрій, призначений для відкачки з метою одержання вакууму.

Одноступінчатий вакуумний насос – вакуумний насос, у якому перепад тисків створюється дією одного робочого ступеню.

Багатоступінчастий вакуумний насос – вакуумний насос, у якому перепад тисків створюється послідовною дією кількох робочих ступенів.

Форвакуумний насос – вакуумний насос, що забезпечує форвакуум, необхідний для нормальної роботи насоса більш високого вакууму.

Механічний вакуумний насос – вакуумний насос, дія відкачування якого заснована на переміщенні газу внаслідок механічного переміщення робочих частин насосу.

Об'ємний вакуумний насос – механічний вакуумний насос, в якому переміщення газу здійснюється за рахунок періодичної зміни об'єму робочої камери.

Багатопластинчатий вакуумний насос – обертальний об'ємний вакуумний насос, в якому робоча камера створюється корпусом і пластинами в пазах ротора.

Дватороторний вакуумний насос – обертальний об'ємний вакуумний насос, робоча камера якого утворюється корпусом і профільними роторами, що одночасно обертаються.

Вакуумний насос із масляним ущільненням – об'ємний вакуумний насос в якому зазори між входним та вихідним патрубками та шкідливі простори ущільнюються вакуумним маслом.

Газобаластовий вакуумний насос – вакуумний насос із масляним ущільненням, обладнаний пристроєм для дозованого напуску газу, що не конденсується, з метою запобігання конденсації відкачуваних парів у насосі.

Відцентровий вакуумний насос – механічний вакуумний насос, дія відкачки якого заснована на передачі газу імпульсу від робочого колеса, що обертається, в радіальному напрямку.

Осьовий вакуумний насос – механічний вакуумний насос, дія відкачки якого заснована на передачі газу імпульсу від робочого колеса, що обертається, в напрямку вісі обертання.

Молекулярний вакуумний насос – механічний вакуумний насос, дія відкачки якого заснована на захопленні молекул газу твердими поверхнями, що безперервно рухаються.

Турбомолекулярний вакуумний насос – молекулярний вакуумний насос, в якому робочі канали ротора і статора утворені похилими прорізами або пластинами, подібними до пластин колеса осьової турбіни.

Струминний вакуумний насос – вакуумний насос, дія якого заснована на захопленні газу, що видаляється, струменем рідини, пари або газу.

Ежекторний насос – низьковакуумний пароструминний насос, у якому відбувається турбулентно-в'язкісне захоплення газу струменем пари масла.

Бустерний насос – середньовакуумний пароструминний насос, у якому захоплення газу струменем відбувається як внаслідок дифузії газу в струмінь, так і внаслідок турбулентно-в'язкісного захоплення газу.

Дифузійний насос – високовакуумний пароструминний насос, у якому захоплення газу струменем відбувається в результаті дифузії газу в струмінь.

Конденсаційний насос – вакуумний насос, у якому відкачка проводиться шляхом конденсації газу на поверхнях, що охолоджуються.

Сорбційний насос – вакуумний насос, у якому відкачка відбувається внаслідок сорбції газу.

Адсорбційний насос – сорбційний насос, у якому відкачка відбувається внаслідок оборотної адсорбції газу при низькій температурі.

Кріонасос – конденсаційний або сорбційний насос із робочими поверхнями, що охолоджуються до наднизьких температур.

Гетерний насос – сорбційний насос, у якому відкачка відбувається переважно внаслідок хемосорбції газу гетером.

Випарний гетерний насос – гетерний насос, у якому поглинаюча поверхня, оновлюється шляхом конденсації на ній термічно випарюваного гетера.

Іонно-гетерний насос – гетерний насос, у якому поряд із хемосорбцією має місце іонізація газу з наступним впровадженням прискорених іонів у поверхню розпиленого гетера.

Магнітний електророзрядний насос – іонно-гетерний насос, у якому для розпилення гетера використовується газовий розряд у магнітному полі.

Комбінований вакуумний насос – комбінація гетерного і магнітного електророзрядного насосів, розміщених у єдиному корпусі.

Вакуумне масло – масло з малим тиском пари, призначене для застосування в механічних і дифузійних вакуумних насосах.

Робоча рідина - речовина (або її пара), що використовується для захоплення відкачуваних газів у струминних (пароструминних)

насосах.

1.4 Течошукування

Герметичність - властивість конструкції або матеріалу перешкоджати проникненню крізь них газу, рідини або пари.

Теча - канал або пориста ділянка перегородки, що порушує її герметичність.

Внутрішня теча - канал, що з'єднує внутрішню порожнину, ізолювану при атмосферному тиску в ній, з відкачуванням об'ємом.

Калібрована теча - штучно створена теча, що забезпечує певний потік газу.

Пробна речовина - речовина, проходження якої крізь течу вибірково виявляється течошукачем.

Перекриття течі - тимчасова відсутність відпливу або напливу пробної речовини крізь течу внаслідок її засмічення або заповнення вологою.

Межа індикації - найменше або найбільше значення величини, що визначається, яке може бути зафіксоване при заданому способі реалізації методу.

Ступінь герметичності - кількісна характеристика герметичності, виражена в одиницях потоку.

Опресування - спосіб виявлення течі, при якому з одного боку досліджуваного елемента створюється тиск пробної речовини, що перевищує атмосферний.

Обдування - спосіб виявлення течі, заснований на обдуванні відкачаної посудини пробним газом ззовні.

Вакуумний лак - лак із низьким тиском пари після висихання, що застосовується для закриття теч.

Течошукач - прилад для виявлення течі.

Манометричний течошукач - течошукач, дія якого заснована на зміні вихідного сигналу манометра при проникненні пробної речовини крізь течу.

Мас-спектрометричний течошукач - течошукач, дія якого ґрунтується на принципі поділу іонів різних газів за масами.

Галогенний течошукач - течошукач, дія якого ґрунтується на зміні емісії іонів нагрітою металевою поверхнею при потраплянні на неї пробної речовини, що містить галогени.

Калориметричний течешукач - течешукач, дія якого ґрунтується на зміні теплопровідності середовища при проникненні пробної речовини крізь течу.

Іскровий течешукач - течешукач, дія якого ґрунтується на проникненні малопотужного іскрового розряду всередину відкачуваної скляної посудини крізь течу.

1.5 Розрахункові поняття вакуумної техніки

Швидкість відкачування - об'єм газу при даному тискові, що відкачується за одиницю часу.

Час відкачки - час, необхідний для зниження тиску в відкачуваній посудині до визначеного значення насосом конкретного типу або виду.

Провідність елемента вакуумної системи - відношення потоку газу, що проходить крізь елемент вакуумної системи, до різниці тисків на його кінцях.

Опір елемента вакуумної системи - величина, обернена провідності елемента вакуумної системи.

Продуктивність вакуумного насоса - витрата газу у вхідному перетині насоса при даному тискові.

Швидкість дії вакуумного насоса - швидкість відкачки, що одержана у вхідному перетині насоса при його роботі.

Ефективна швидкість дії вакуумного насоса - швидкість відкачки, що забезпечується насосом на кінці трубопроводу, приєднаного до відкачуваної посудини.

Найбільший робочий тиск вакуумного насоса - найбільший тиск у вхідному перетині вакуумного насоса, при якому насос тривалий час зберігає номінальну швидкість дії.

Найбільший випускний тиск вакуумного насоса - найбільший тиск у вихідному перетині вакуумного насоса, при якому насос ще може здійснювати відкачку.

Найбільший тиск запуску вакуумного насоса - найбільший тиск у вхідному перетині вакуумного насоса, при якому насос може почати роботу.

Час утворення мономолекулярного шару у вакуумі - час, необхідний для утворення мономолекулярного шару на поверхні, що знаходиться у вакуумі.

2 Перелік лабораторних робіт та графік їх виконання

При вивченні спецкурсу «Основи фізики вакууму та вакуумних технологій» передбачено виконання 3 розрахункових, 10 лабораторних і 1 індивідуальної робіт, теми яких приведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1 - Тематика лабораторних і розрахункових робіт

№ роб.	Тема
Розрахункові роботи	
1	Основи молекулярно-кінетичної теорії газів
2	Явища переносу та сорбційні явища
3	Теча розріджених газів
Лабораторні роботи	
1	Механічні вакуумні насоси з масляним ущільненням
2	Пароструминні дифузні насоси
3	Кріосорбційні насоси
4	Сублімаційні гетерні та іонно-сорбційні насоси
5	Теплові манометричні перетворювачі
6	Іонізаційні манометричні перетворювачі
7	Вимірювання парціальних тисків
8	Вакуумні герметичні сполуки
9	Елементи конструкцій вакуумних систем
10	Типові схеми вакуумних установок. Одержання вакууму
Індивідуальне завдання	
1	Матеріали вакуумних систем

3 Завдання до розрахункових робіт

3.1 Розрахункова робота «Основи молекулярно-кінетичної теорії газів»

Мета роботи - повторити основні співвідношення молекулярно-кінетичної теорії газів, що описують властивості частинок газу в умовах розрідження.

Задача 1.1 Молекулярний пучок падає на стінку і відбивається від неї за законом абсолютно пружного удару. Знайти тиск молекулярного пучка на стінку, якщо швидкість молекул складає кут θ із нормаллю до стінки. Відомий вид молекул, швидкість молекул v у пучку та їхні концентрації n (табл. 3.1). Тиск виразити в Па, Тор, і фізичних атмосферах.

Таблиця 3.1 - Дані до задачі 1.1

Варіант	Газ	Кут, град θ	Швидкість v , м/с	Концентрація n , м ⁻³
1	H ₂	85	1800	10 ¹⁵
2	He	80	1500	10 ²⁰
3	Ni	75	850	10 ¹⁸
4	Pb	70	700	10 ¹⁴
5	Si	65	1200	10 ¹⁹
6	Cu	60	920	10 ¹³
7	N ₂	55	1450	10 ¹⁵
8	O ₂	50	1300	10 ¹⁷
9	Al	45	1000	10 ¹⁴
10	K	40	1100	10 ¹⁸
11	Hg	35	200	10 ¹¹
12	Ne	30	870	10 ¹⁷
13	Ar	25	1250	10 ¹⁹
14	Xe	20	750	10 ²⁰
15	Ge	15	630	10 ⁸

Задача 1.2. Визначити найбільш ймовірну, середню квадратичну, середню арифметичну швидкості і середню енергію поступального руху молекул (атомів) газу при температурі T , а також середню довжину вільного пробігу молекул при тій же T і тиску P (табл. 3.2). Для даних умов оцінити ступінь вакууму, припустивши при цьому, що тиск P підтримується в плоскій посудині з відстанню між стінками L .

Таблиця 3.2 - Дані до задачі 1.2

Вар.	Газ	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Тиск $P, \text{Тор}$	Відстань $L, \text{мм}$
1	H_2	20	10^{-3}	50
2	He	100	10^{-5}	400
3	He	- 20	10^2	100
4	CO_2	- 200	10^{-10}	500
5	CO	10	10^{-9}	10000
6	Ar	1000	10^{-4}	5000
7	O_2	0	10^{-2}	300
8	N_2	1500	10^2	100
9	Ne	- 100	10^{-10}	3000
10	Kr	- 50	10^{-1}	0,01
11	повітря	25	10^2	20
12	Hg	40	10^{-1}	30
13	H_2	- 100	10^{-9}	400
14	He	250	10^{-1}	5000
15	He	300	10^{-4}	3000

Задача 1.3. Два теплоізольованих балона сполучені короткою трубкою з краном. У балонах знаходяться різноманітні гази при різних температурах. Відомі числа молей Z_1 і Z_2 кожного з газів, що знаходяться в балонах, об'єми балонів V_1 і V_2 , температури T_1 і T_2 . Кран відчиняють і гази перемішуються. Знайти температуру T і тиск P суміші газів для даних табл. 3.3, враховуючи, що числа ступенів свободи молекул газів рівні між собою.

Таблиця 3.3 - Дані до задачі 1.3

Варіант	$Z_1,$ моль·10 ⁴	$Z_2,$ моль·10 ⁴	$V_1, \text{м}^3$	$V_2, \text{м}^3$	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$
1	10	10	0,1	1,0	100	0
2	5	10	1,5	0,5	50	200
3	10	5	1,0	2,0	0	150
4	10	15	0,2	0,4	- 100	100
5	15	10	1,0	2,0	75	125
6	1	10	0,2	0,1	100	20
7	10	8	3,0	6,0	- 25	115
8	8	10	1,0	0,5	50	- 50
9	5	1	1,5	15,0	0	75
10	1	5	4,0	8,0	- 20	100
11	6	3	6,0	3,0	- 75	25
12	5	5	4,0	8,0	0	100
13	1,5	15	8,0	4,0	20	80
14	7	8	2,0	4,0	- 10	70
15	15	10	3,0	4,0	0	75

3.2 Розрахункова робота «Явище переносу і сорбційні явища»

Мета роботи - вивчити явища переносу і сорбційні явища; основні співвідношення, що описують ці явища.

Задача 2.1 Визначити середній час перебування молекул (атомів) газу, адсорбованого на стінці вакуумної камери, що має температуру T , якщо енергія зв'язку молекули (атома) із поверхнею дорівнює E , а період теплових коливань молекули на поверхні адсорбенту при заданій температурі дорівнює τ_0 .

Таблиця 3.4 - Дані до задачі 2.1

Варіант	$T, ^\circ\text{C}$	E, eV	$\tau_0, 10^{-13}$
1	- 200	1	1
2	- 150	3	0,5
3	1000	2	5
4	- 200	4	0,8
5	0	5	10
6	20	3	7
7	0	1	0,2
8	- 20	4	0,5
9	- 100	5	5
10	500	2	0,4
11	- 50	1	1
12	20	2	0,8
13	100	3	7
14	0	4	10
15	100	5	0,5

Задача 2.2 Визначити час, протягом якого утвориться моношар газу на поверхні у вакуумній камері при тиску P і температурі T (коефіцієнт прилипання прийняти рівним 0,5).

Таблиця 3.5 - Дані до задачі 2.2

№ п/ч	Тип газу	P, Тор	T, °K
1	Повітря	$3 \cdot 10^{-5}$	290
2	Азот	$6 \cdot 10^{-3}$	400
3	Гелій	$7 \cdot 10^{-2}$	280
4	Водень	$4 \cdot 10^{-7}$	350
5	Ксенон	$2 \cdot 10^{-4}$	370
6	Ртуть	$7 \cdot 10^{-5}$	270
7	Вод. пара	$8 \cdot 10^{-8}$	290
8	Аргон	$9 \cdot 10^{-3}$	320
9	Криптон	$4 \cdot 10^{-8}$	290
10	СО	$5 \cdot 10^{-4}$	310
11	Неон	$2 \cdot 10^{-5}$	350
12	Вуглек. газ	$3 \cdot 10^{-7}$	340
13	Азот	$7 \cdot 10^{-11}$	500
14	Водень	$9 \cdot 10^{-2}$	420
15	Гелій	$2 \cdot 10^{-9}$	290

Задача 2.3 Визначити тиск у циліндричній вакуумній камері (діаметр D, висота H) після десорбції мономолекулярного шару газу, адсорбованого на стінках камери, якщо початковий тиск буде P, а температура T.

Таблиця 3.6 – Дані до задачі 2.3

Варіант	Тип газу	P, Тор	T, °K	D, см	H, см
1	Неон	$5 \cdot 10^{-3}$	273	40	70
2	Азот	$3 \cdot 10^{-6}$	290	20	20
3	Гелій	$4 \cdot 10^{-10}$	320	35	35
4	Криптон	$8 \cdot 10^{-7}$	410	25	40
5	Вод. пара	$6 \cdot 10^{-4}$	415	45	30
6	Аргон	$4 \cdot 10^{-2}$	400	30	40
7	Водень	$1 \cdot 10^{-8}$	273	35	45
8	Повітря	$3 \cdot 10^{-10}$	290	60	20
9	Вуглек.газ	$7 \cdot 10^{-1}$	320	25	30
10	Ксенон	$5 \cdot 10^{-3}$	410	30	15

11	Криптон	$4 \cdot 10^{-4}$	370	45	25
12	Ртуть	$8 \cdot 10^{-7}$	440	40	30
13	Вод. пара	$2 \cdot 10^{-2}$	500	35	40
14	Водень	$4 \cdot 10^{-6}$	320	30	20
15	Гелій	$9 \cdot 10^{-7}$	290	20	35

Задача 2.4. Визначити кількість тепла (енергії), перенесеного в одиницю часу між одиничними площадками двох плоских вольфрамових поверхонь, що мають різну температуру $T_1 = 100^\circ\text{C}$ і $T_2 = 20^\circ\text{C}$ та розташовані на відстані L один від одного в середовищі, в склад якого входять два гази з парціальним тиском P_1 і P_2 .

Таблиця 3.7 - Данні до задачі 2.4

Варіант	Газ 1	Газ 2	P_1 , Тор	P_2 , Тор	L , см
1	O ₂	N ₂	10^{-3}	10^{-3}	3
2	H ₂	He ₂	10^{-2}	10^{-3}	2
3	Ar	CO ₂	10^{-6}	10^{-5}	1
4	Ne	Hg	1	10^{-6}	5
5	He	Ar	10^{-4}	10	5
6	N ₂	O ₂	10	1	4
7	H ₂	CO ₂	10^{-7}	10^{-8}	5
8	Ne	N ₂	10	10	5
9	Hg	H ₂	10^{-5}	$2 \cdot 10^{-2}$	1
10	He	H ₂	$2 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}	1
11	Ar	He	10^{-7}	10^{-6}	1
12	Ne	He	1	1	2
13	He	Повітря	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-3}$	1
14	O ₂	He	10^{-6}	10^{-6}	1
15	H ₂	Ar	10^{-1}	10^{-1}	2

3.3 Розрахункова робота «Теча розріджених газів»

Мета роботи – вивчити основне рівняння вакуумної техніки, методи розрахунку провідності вакуумних елементів, основні параметри вакуумних систем.

Задача 3.1 Обчислити провідність ділянки вакуумної системи (для різних варіантів – різні геометричні розміри вакуумної системи) при температурі T і тисках на кінцях ділянки відповідно P_1 та P_2 . Газ – повітря.

Таблиця 3.8.1 - Дані до задачі 3.1 (рис. 3.1)

Варіант	D, см	L, см	P_1 , Торр	P_2 , Торр	T, °K
1	6,5	5	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-6}$	300
2	3	20	$5 \cdot 10^{-7}$	10^{-6}	300
3	6	4	10	100	300
4	3	25	5	40	300

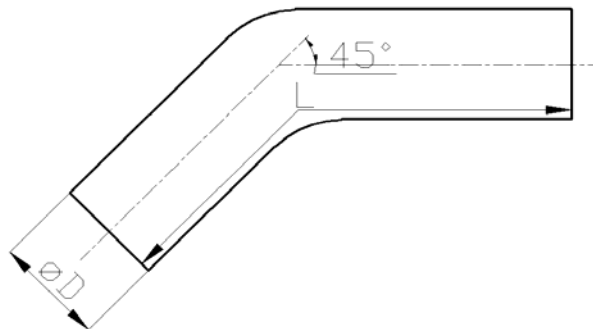


Рис 3.1 – Ділянка трубопроводу для розрахунку по даним таблиці 3.8.1

Таблиця 3.8.2 - Дані до задачі 3.1 (рис. 3.2)

Вари- ант	D ₁ , см	D ₂ , см	D ₃ , см	L ₁ , см	L ₂ , см	L ₃ , см	P ₁ , Top	P ₂ , Top	T, °K
5	2	4	6	2	3	7	10 ⁻⁶	5·10 ⁻⁶	300
6	3	5	6	25	3,5	8	5·10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	300
7	4	7	8	45	4	9	15	120	300
8	5	7	9	4	5	10	7	80	300

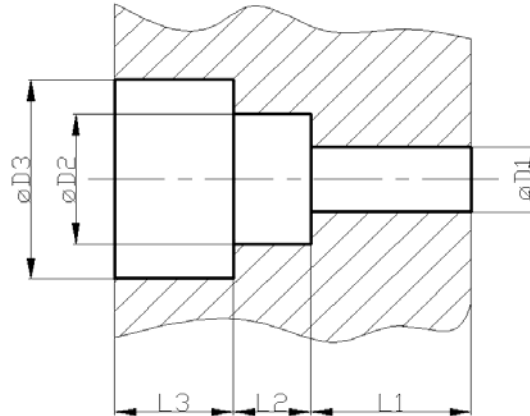


Рис 3.2 – Ділянка трубопроводу для розрахунку по даним таблиці 3.8.2

Таблиця 3.8.3 - Дані до задачі 3.1 (рис. 3.3)

Вар.	D ₁ , см	D ₂ , см	D ₃ , см	D ₄ , см	L ₁ , см	L ₂ , см	L ₃ , см	L ₄ , см	P ₁ , Top	P ₂ , Top	T, °K
9	3	4	5	7	4	5	6	7	10 ⁻⁶	5·10 ⁻⁶	300
10	5	6	8	10	30	6	7	8	5·10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	300
11	4	6	8	12	4	5	6	9	15	120	200
12	2	3	5	7	20	4	8	10	5	50	200

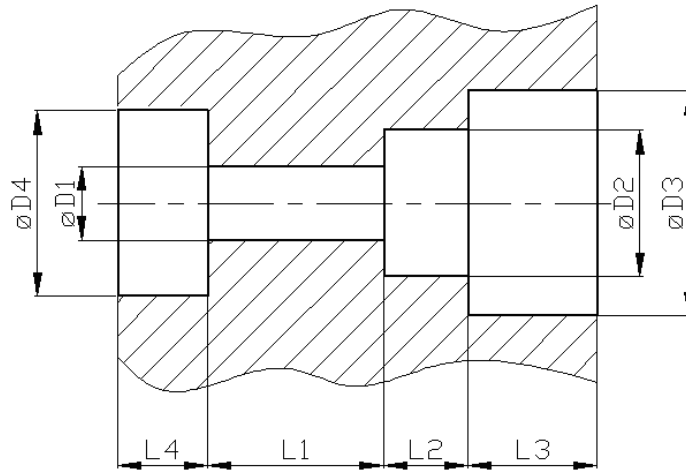


Рис 3.3 – Ділянка трубопроводу для розрахунку по даним таблиці 3.8.3

Задача 3.2 Визначити час, впродовж якого тиск в об'ємі V зміниться зі значення P_0 до значення P_1 , якщо об'ємна швидкість течії дорівнює S .

Таблиця 3.9 - Дані до задачі 3.2

Варіант	P_0 , Тор	P_1 , Тор	V , м ³	S , л/с
1	760	10^{-2}	0,1	100
2	10^{-2}	10^{-6}	0,05	200
1	2	3	4	5
3	10^{-6}	10^{-10}	0,2	200
4	700	10^{-3}	0,01	50
5	10^{-1}	10^{-7}	0,3	300
6	10^{-5}	10^{-8}	0,07	200
7	200	$5 \cdot 10^{-4}$	0,04	50
8	10^{-3}	10^{-7}	0,1	500
9	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-9}$	0,2	400

10	100	10^{-2}	0,5	400
11	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-7}	0,05	100
12	10^{-8}	10^{-11}	0,1	1000
13	$5 \cdot 10^{-7}$	10^{-10}	0,07	800
14	760	10^{-1}	0,05	50
15	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-7}	0,02	100

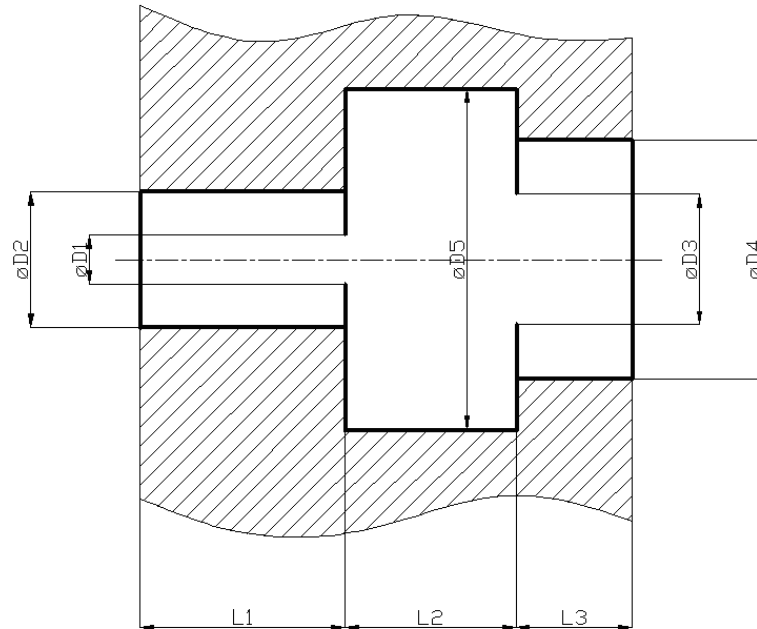


Рис 3.4 – Ділянка трубопроводу для розрахунку по даним таблиці 3.9 (задача 3.2)

Задача 3.3 Визначити швидкість відкачки об'єму А через трубопровід В і тиск P_1 на вході трубопроводу (у перетині 1-1, рис.3.5), якщо швидкість дії насоса С дорівнює S_n , коефіцієнт використання насоса - k , а тиск на вході насоса (у перетині 2-2) дорівнює P_2 .

Таблиця 3.10 - Дані до задачі 3.3

Варіант	S_n , л/с	k	P_2 , Топ
1	100	0,5	10
2	300	0,1	1
3	20	0,9	10^{-2}
4	50	0,8	10^{-3}
5	500	0,4	10^{-4}
6	1000	0,35	10^{-5}
7	30	0,45	10^{-6}
8	20	0,7	10^{-7}
9	700	0,85	10^{-8}
10	150	0,5	10^{-9}
11	350	0,25	10^{-10}
12	200	0,35	10^{-9}
13	140	0,95	10^{-8}
14	420	0,85	10^{-7}
15	120	0,75	10^{-6}

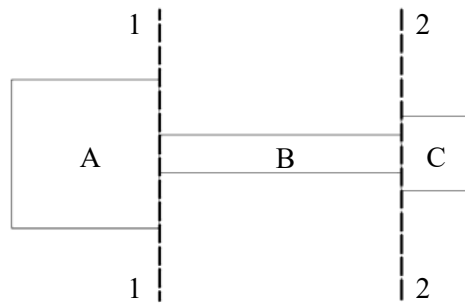


Рис 3.5 – Ділянка трубопроводу для розрахунку по даним таблиці 3.10 (задача 3.3)

4 Завдання до лабораторних робіт

4.1 Лабораторна робота «Механічні вакуумні насоси з масляним ущільненням»

Мета роботи - вивчити принцип роботи, конструкцію, особливості експлуатації і методи розрахунку основних параметрів вакуумних насосів об'ємного типу.

Механічні вакуумні насоси можна поділити на об'ємні і молекулярні. У молекулярних насосах молекулам газу передається кількість руху від пароподібному (ежекторні, дифузійні), рідкої (водоструминної) або твердої (молекулярні, турбомолекулярні) поверхні, в напрямку відкачування.

У турбомолекулярних насосах молекула, потрапляючи на швидкообертові лопатки ротора, отримує від них тангенціальні складові швидкостей в напрямку виходу з насоса. На виході насоса обов'язково повинен існувати попередній вакуум (форвакуум порядку 1Па). Граничний тиск що створюється таким насосом відповідає високому вакууму (близько 10-8Па). До достоїнств таких насосів відносять слабку залежність швидкості відкачування від роду газу, широкий діапазон робочих тисків, а також швидкий запуск насоса. Недоліком насоса є складні системи підвісу, а також підшипники ротора що швидко зношуються, із-за величезних швидкостей обертання 10-40 тис. об/хв.

Об'ємні насоси здійснюють відкачування за рахунок періодичної зміни обсягу робочої камери. За один цикл насос виконує три операції: всмоктування газу з відкачуваного об'єму, зменшення робочої камери насоса і стиснення газу що знаходиться в ній, видалення стисненого газу з робочої камери.

У ході виконання даної лабораторної роботи необхідно:

- розглянути класифікацію вакуумних насосів і вивчити їхні основні параметри;
- розібрати виданий викладачем вакуумний насос, накреслити ескіз насоса, пояснити принцип його роботи, виміряти робочий об'єм, скласти насос;

- за одержаними результатами оцінити швидкість дії насоса і порівняти її із паспортним значенням, у звіті про роботу привести паспортні характеристики даного насоса;
- ознайомитись з умовами експлуатації насоса і коротко сформулювати порядок його запуску в роботу;
- обрахувати основні розміри і максимальну споживану потужність одноступінчатого механічного вакуумного насоса з масляним ущільненням, що має реальну швидкість відкачки S_n , граничний тиск $P_{гр}$ і випускний тиск P_a (табл. 4.1). Співвідношення основних розмірів вибирається в межах:

$$\begin{aligned} r/R &= 0,7...0,9; \\ e/R &= 0,1...0,3; \\ L/R &= 1,5...3,5; \\ B/R &= 0,2...0,1; \end{aligned}$$

де R - радіус внутрішнього об'єму статора ;
 r - радіус ротора;
 e - ексцентриситет ;
 L - довжина ротора ;
 B - товщина пластини.

Частоту обертання ротора вибирають в інтервалі $n=8,3...46,7\text{с}^{-1}$, при максимальній швидкості ковзання пластин по статорі (ротору) $v_{\max} = 16 \text{ м/с}$.

Значення коефіцієнта подачі (відкачки) при $P \gg P_{гр}$ лежать у межах $\lambda=0,7...0,85$, коефіцієнта прориву $\alpha=1 \cdot 10^{-4}...1 \cdot 10^{-5}$.

Таблиця 4.1 - Вихідні дані до лабораторної роботи 4.1

Вар.	Тип насосу	Кількість пластин	Швидкість відкачки S_n , л/с	Граничний тиск $P_{гр}$, л/с	Випускний тиск P_a , Па
1	Золотниковий (I)	-	2,0	10	105
2	Пластинчато статорний (2)	1	0,2	20	104
3	Пластинчато	2	0,5	30	102

	роторний (3)				
4	1	-	1,0	100	103
5	2	1	0,3	200	104
6	3	3	0,2	300	105
7	1	-	3,0	1	103
8	2	1	0,5	2	102
9	3	3	0,5	3	103
10	1	1	1,5	10	104
11	2	2	0,1	20	103
12	3	3	0,3	50	103
13	1	1	2,5	100	105
14	2	2	0,5	200	104
15	3	3	0,3	500	105

Контрольні запитання

1. Дати класифікацію і визначення основних параметрів вакуумних насосів (швидкість відкачування, ефективна швидкість відкачування насоса або швидкість відкачування об'єкта, швидкість дії, коефіцієнт використання насоса, граничний тиск, тиск запуску, найбільший робочий тиск, найбільший випускний тиск).

2. Вивести основне рівняння вакуумної техніки.

3. Зробити ескізи поршневого, пластинчасто-роторного, пластинчасто-статорного і золотникового насосів. Пояснити роботу кожного з наведених насосів. Як позначається механічний насос на схемах вакуумних систем відповідно до ДСТУ?

4. Що таке коефіцієнт прориву, коефіцієнт дії, геометрична швидкість відкачування?

5. Зробити ескіз газобаластного насоса. Як змінюються характеристики газобаластного насосу в порівнянні зі звичайним об'ємним насосом тієї ж конструкції?

6. Пояснити принцип дії молекулярних насосів.

7. Що таке ексцентриситет? В якій точці пластина досягає максимальної (мінімальної) швидкості ковзання по ротору?

8. Як поліпшити граничний тиск насосу?

9. Що таке шкідливий простір і методи боротьби з ним?

4.2 Лабораторна робота «Пароструминні дифузійні насоси»

Мета роботи - вивчити принцип роботи, конструкцію, особливості експлуатації і методи розрахунку основних параметрів різноманітних модифікацій дифузійних насосів.

Ці насоси можна розділити на дві групи: ежекторні й дифузійні.

У ежекторних насосах застосовується струмінь якої-небудь пари (ртуть, масло, парафін, вода), який діє всмоктуючим чином на газі відкачуваного простору, через те, що всередині і поблизу струменя пари тиск нижче, ніж у відкачуваному об'ємі.

На принципі ежекторної дії, при вживанні в якості робочої рідини ртуті або масла, при низькому тиску, заснована робота перших сходинок дифузійних насосів. Ці ступені працюють як проміжні між дифузійним і форвакуумним насосами.

На противагу ежекторним насосів, які можуть працювати при тисках, починаючи від атмосферного, дифузійні насоси вимагають для своєї роботи попереднього вакууму, принаймні, порядку 100Па. Розрядження на виході дифузійного насоса має бути таким, щоб середній вільний пробіг молекул газу був досить великий для того, щоб могла відбуватися дифузія газу в струмінь пари, а також щоб молекули пари могли без сутичок досягати холодних стінок насоса і конденсуватися на них.

Основні явища в дифузійних насосах.

1. Захоплення молекул газу струменем пари так само, як у ежекторних насосах.

2. Дифузія молекул газу, що відбувається тому, що парціальний тиск сторонніх парів і газів усередині струменя пари, що виходить з сопла, дуже низький, незважаючи на те, що тиск пари та тиск відкачуваного газу вище. Таким чином, молекули газу дифундують відповідно до законів дифузії у всередину струменя і разом з цим струменем видаляються у форвакуум.

3. Конденсація пари що відкачує на стінках насоса негайно після виконання нею своїх функцій. Завдяки цьому зменшується зворотній струмінь пари, тим самим проникнення його у високий вакуум.

Особливі вимоги пред'являються до робочих рідин пароструйних насосів:

1. Стійкість до розкладання при нагріванні.
2. Мінімальний тиск насиченої пари в нормальних умовах і максимальний при робочій температурі кип'ятильника.
3. Мінімальна здатність розчиняти гази.
4. Мала теплота паротворення.
5. Хімічна стійкість.

Для зменшення зворотного потоку парів робочої рідини на насоси встановлюють пастки. За принципом дії пастки можна розділити на конденсуючі, дисоціюючі і сорбуючі.

У ході виконання роботи необхідно:

- розглянути принцип роботи, конструкційні особливості різноманітних типів паромасляних насосів і вивчити їхні основні параметри;
- розібрати виданий викладачем вакуумний насос, накреслити ескіз насоса, пояснити принцип його роботи, виконати вимірювання геометричних розмірів, зібрати насос;
- за отриманими результатами оцінити швидкість дії насоса і порівняти її з паспортним значенням;
- вивчити умови експлуатації та особливості функціонування різних модифікацій паромасляних насосів (багатоступінчастих, з фракціонуванням масла і т.д.);
- докладно розглянути фактори, які впливають на граничний тиск та швидкість відкачки дифузійних насосів;
- обчислити швидкість відкачки дифузійного насоса по різним газам (табл. 4.2, рис. 4.1), який має геометричні розміри D , L та швидкість парового струменю робочої рідини G_n . Температура у відкачуваному об'ємі $+20^{\circ}\text{C}$.

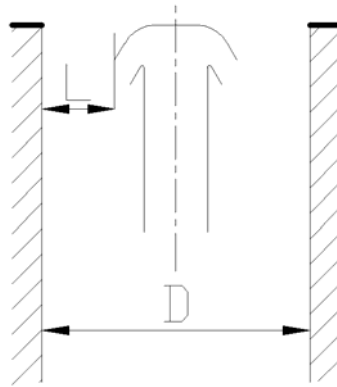


Рис 4.1 - Схема вхідного патрубка дифузійного насоса

Таблиця 4.2 - Вихідні дані до лабораторної роботи 4.2

Варіант	Газ що відкачується	D, см	L, см	G _п , м/с
1	H ₂ , Хе	15	3	20
2	Хе, Ne	13	2	150
3	H ₂ O, Ar	11	1	100
4	Ne, H ₂	9	1	50
5	CO, H ₂	7	0,8	250
6	N ₂ , Хе	5	0,6	200
7	Повітря, Ne	7	1	150
8	C ₂ , H ₂	9	1,2	100
9	A, He	11	1,2	50
10	CO ₂ , H ₂	13	1,2	300
11	Kr, He	15	2	250
12	Хе, O ₂	20	4	200
13	Hg, H ₂	25	5	250
14	H ₂ , Hg	18	2	150
15	He, Хе	14	1,5	100

Контрольні запитання

1. Дайте визначення основним параметрам вакуумного дифузійного насоса (швидкість відкачування, граничний тиск, тиск запуску, найбільший робочий тиск, найбільший випускний тиск).
2. Пояснить принципи пароструйної відкачки, а також принцип поділу на ежекторні і дифузійні насоси.
3. Що таке максимальний випускний тиск пароструйного насоса (ртутного, масляного).
4. Чим визначається і від чого залежить швидкість дії дифузійного насоса?
5. Намалювати і прокоментувати принципові схеми ежекторного і дифузійного насосів.
6. Показати основні характеристики пароструйних насосів (проілюструвати графічно, 4 графіка).
7. Для чого застосовують фракціонуючі пристрої в пароструйних насосах? Які бувають методи фракціонування? Що таке багатоступінчасті насоси?
8. Які вимоги пред'являються до робочих рідин пароструйних насосів?
9. Що таке пастки? Назвіть принципи дії різних видів пасток.
10. Як позначається дифузійний насос на схемах вакуумних систем відповідно до ДСТУ?

4.3 Лабораторна робота «Кріоадсорбційні насоси»

Мета роботи - вивчити принципи роботи, конструкцію, особливості експлуатації і методи розрахунку основних параметрів вакуумних кріосорбційних насосів.

У ході даної лабораторної роботи необхідно:

- розглянути класифікацію і принцип дії кріонасосів;
 - вивчити конструкцію кріосорбційного насоса ЦВН-1-2;
 - накреслити ескіз насоса, пояснити принцип його роботи;
- виконати вимірювання основних розмірів, необхідних для розрахунку швидкості відкачки насоса;
- за результатами вимірювань оцінити основні параметри насоса ЦВН-1-2;
 - вивчити умови експлуатації насоса і коротко сформулювати порядок його запуску в роботу;
 - вибрати конструкцію і обрахувати основні параметри кріосорбційного насоса для відкачки вакуумної камери об'ємом V від тиску P_0 до P_1 .

Таблиця 4.3 - Вихідні дані до лабораторної роботи 4.3

Варіант	Об'єм V , л	Тиск P_0 , Тор	Тиск P_1 , Тор
1	150	760	10^{-3}
2	100	100	10^{-3}
3	30	760	100
4	120	760	10^{-2}
5	50	200	$15 \cdot 10^{-2}$
6	130	760	20
7	40	760	10^{-1}
8	110	150	10^{-3}
9	70	400	10^{-2}
10	150	760	10
11	50	500	1,0
12	170	100	10^{-4}
13	80	760	10^{-2}
14	130	300	$5 \cdot 10^{-3}$

Контрольні запитання

1. Надати класифікацію і принцип дії кріонасосів.
2. Описати конструкцію кріосорбційного насоса ЦВН-1-2.
3. Накреслити ескіз насоса, пояснити принцип його роботи.
4. Як позначається кріосорбційний насос на схемах вакуумних систем відповідно до ДСТУ?

4.4 Лабораторна робота «Сублімаційні геттерні та іонно-сорбційні насоси»

Мета роботи - вивчити принцип дії, конструкцію й особливості експлуатації сублімаційного та магніто-розрядного насосів.

У ході даної роботи необхідно:

- розглянути фізичні основи принципу дії і конструкцію сублімаційного геттерного насоса ;
- вивчити порядок вмикання і зробити запуск низькотемпературного сублімаційного насоса в установці УСУ-4 ;
- розглянути класифікацію і принцип дії іонних насосів;
- вивчити рівнобіжні фізичні процеси, що призводять до відкачки різноманітних газів у магніто-розрядному насосі із саморегулюючим розпиленням активного матеріалу;
- вивчити конструкцію і накреслити ескізи різноманітних типів магніто-розрядних насосів (діодних, триодних і т.д.), пояснити принцип їхньої роботи;
- розглянути явище «аргонної нестабільності» і способи її усунення;
- вивчити умови експлуатації і сформулювати порядок запуску в роботу насосів типу НОРД, або НМД (за вказівкою викладача), розглянути особливості блоків постачання насоса;
- пояснити ефективність відкачки різних газів сублімаційним і магніто-розрядним насосами ;
- розглянути спільну роботу кріосорбційного, сублімаційного і магніто-розрядного насосів.

Контрольні запитання

1. Надати класифікацію і принцип дії магніто-розрядних насосів.
2. Описати конструкцію магніто-розрядного насоса.
3. Накреслити ескіз насоса, пояснити принцип його роботи.
4. Як позначається магніто-розрядний насос на схемах вакуумних систем відповідно до ДСТУ?

4.5 Лабораторна робота «Теплові манометричні перетворювачі»

Мета роботи - вивчити принцип роботи, конструкцію, особливості експлуатації і методи розрахунку теплових манометричних перетворювачів.

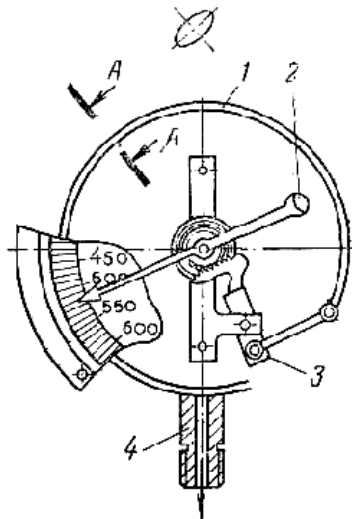


Рис. 4.2 - трубчастий манометр.

1-трубка еліптичного перерізу;
2-стрілка; 3-зубчастий сектор; 4-штуцер.

Вимірювання низького вакууму проводиться методами, заснованими на простих законах фізики. Воно полягає у визначенні сили тиску газу на поверхню відомих розмірів (механічні методи) або в безпосередньому вимірі різниці висот стовпчиків який-небудь рідини в сполучених посудинах (гідростатичні методи).

Дія механічних манометрів заснована на деформації деякої пружної перегородки, по один бік якої вимірюваний тиск, а по інший – інший тиск, найчастіше атмосферний. Різниця тисків є причиною деформації. Деформація перегородки за допомогою системи важелів приводить у рух стрілку, яка показує величину тиску на шкалі манометра (мембранні манометри, манометр з трубкою Бурдона).

Деформаційні манометри вимірюють тиск від атмосферного

до 0,1 Па. Мірою тиску в деформаційних манометрах служить величина деформації чутливого елемента, що відбувається під дією прикладеної до цього елемента різниці тисків.

Одним з основних достоїнств деформаційних манометрів є незалежність їх свідчень від роду газу. У лабораторній практиці і в промисловості для вимірювання абсолютних величин тисків в широких межах від 0,1 Па (10^{-3} мм рт. ст.) до кількох атмосфер

знайшли застосування деформаційні манометри трьох основних типів: трубчасті, мембранні та сильфоні.

В якості елемента, чутливого до різниці тисків, трубчастий манометр має трубку еліптичного перерізу, згорнуту в спіраль (рис. 4.2). Один кінець цієї трубки підключений до вакуумної системи за допомогою штуцера, а інший - запаяний і сполучений через системи важелів зі стрілкою. Зовнішня поверхня трубки завжди схильна до дії атмосферного тиску. Поки в трубці зберігається атмосферний тиск (різниця тисків дорівнює нулю), стрілка стоїть на нулі шкали, так як відсутня деформація трубки.

Зміна тиску в вакуумному об'ємі, до якого приєднаний манометр, викликає деформацію трубки під дією різниці тисків поза і всередині неї і, отже, поворот стрілки. Кут повороту стрілки пропорційний вимірюваній різниці тисків. Поділ шкали n , проти якого зупиняється стрілка, показує на скільки тиск у середині трубки нижче ніж атмосферний $p_{\text{пов}}$.

Тиск p в відкачуваному об'ємі буде дорівнювати:

$$p = p_{\text{пов}} - n.$$

Тобто свідчення манометра залежать від атмосферного тиску.

Принцип дії теплових манометрів заснований на залежності теплопровідності газу від тиску. При в'язкісному режимі, коли середня довжина вільного пробігу молекул значно менше розмірів камери датчика, теплопровідність не залежить від тиску. При високому вакуумі в молекулярному режимі, теплопровідність газу пропорційна тиску. У перехідному режимі передача тепла нелінійно збільшується зі зростанням тиску до постійного значення.

Найпростіша конструкція теплового манометра представляє собою скляні або металеву трубку, по осі якої натягнута нитка, що нагрівається пропусканням струму. Рівняння теплового балансу (що підводиться до нитки енергії):

$$I^2 R(1 + \beta \Delta T) = \alpha \Delta T p(T - T_0) A + \sigma \epsilon (T^4 - T_0^4) A + b \Delta T$$

де

$\alpha \Delta T p(T - T_0) A$ - потужність що відводиться через газ від нитки до корпусу лампи;

p - тиск газу в манометрі;

T - температура нитки;

T_0 - температура корпусу (приміщення);

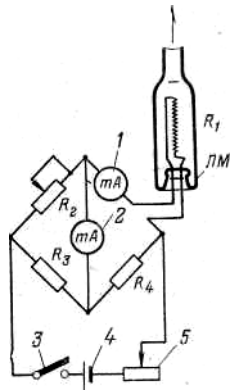


Рис. 4.3 - Схема підключення манометру опору

$\sigma (T^4 - T_0^4)$ - потужність, що розсіюється ниткою, в слідстві випромінювання;

$b\Delta T$ - потужність що відводиться через нитку та електричні вводи (для більшості випадків цією потужністю можна знехтувати);

β - температурний коефіцієнт опору (K^{-1});

α - коефіцієнт акомодатії поверхні чутливого елемента до газу ($\alpha_{Pt-H_2}=0,36$; $\alpha_{Pt-інший\ газ}=0,85$);

Δ_T - молекулярна теплопровідність газу;

A - площа поверхні чутливого елемента;

ϵ - коефіцієнт випромінювання чутливого елемента ($\epsilon_{Pt}=0,05$);

σ - постійна Стефана-Больцмана,

b - коефіцієнти пропорційності.

Добре видно що тиск p можна знайти з рівняння:

$$p = \frac{I^2 R (1 + \beta \Delta T) - \sigma \epsilon (T^4 - T_0^4) A}{\alpha \Delta_T (T - T_0) A}$$

Теплопровідність газу можна розрахувати за формулою:

$$\Delta_T = \frac{8,82 \cdot 10^{-2}}{M^{1/2}}$$

де:

M - молекулярна маса газу.

Це рівняння описує градувальну криву манометра, причому про вимір манометра можна судити як по зміні струму розжарення нитки I при постійності температур T і T_0 , так і за зміною температури нитки T при постійному струмі розжарення I .

Манометри опору. Манометрична лампа являє собою сталеву трубку, усередині якої натягнута вольфрамова нитка розжарення. Прилад для вимірювання тиску за допомогою такого датчика містить міст для вимірювання опору (рис 4.3).

Вимірювання тиску звичайно проводять при постійній температурі нитки манометричного перетворювача. При зміні тиску починає мінятися тепловідвід i , отже, температура нитки. Зменшенням струму розжарення I_n температуру нитки манометра повертають до вихідного значення і судять про тиск за значенням струму I_n , який вимірюють за допомогою міліамперметра 1.

Щоб з вимірювання струму судити про тиск, манометр заздалегідь градується.

Термопарні манометри. Манометрична лампа являє собою скляний або металевий корпус, в якому на двох вводах змонтований платиновий або нікелевий підігрівач, на двох інших вводах кріпиться термопара.

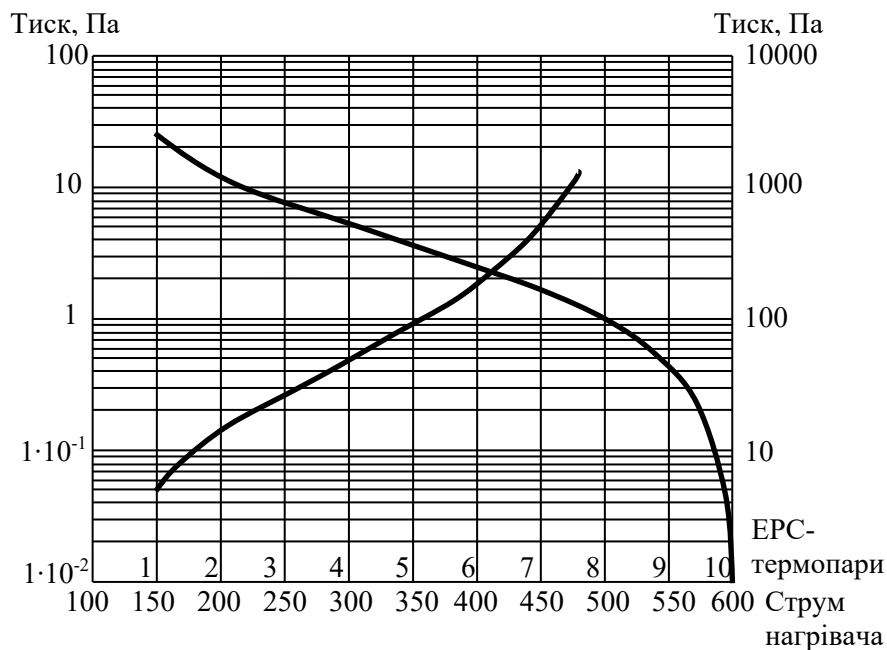


Рис 4.4 - Градувальні криві манометра типу ПМТ-2 для повітря

Термопара і підігрівач зварені через перемичку. Підігрівач нагрівається струмом, який можна регулювати змінним опором і

вимірювати міліамперметром. Спай термопари, що нагрівається підігрівачем, є джерелом термоЕРС, значення якої показує вольтметр універсальний.

Поки тиск у вакуумній системі дорівнює атмосферному, стрілка міліамперметра при заданому, для даної манометричної лампи, струмі розжарення I_n залишається поблизу нуля. При зниженні тиску в системі стрілка починає переміщатися в сторону збільшення термоЕРС, тому що зі зменшенням тиску зменшується теплопровідність газу і, отже, підвищується температура перемички. Точність вимірювання тиску термопарних манометрів істотно залежить від правильного підбору струму розжарювання підігрівача.

Струм підігрівача можна визначити для нової лампи доки вона запаяна або при відкачуванні датчика до тиску $p < 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па.

За цих тисках тепловідвід через газ від нагрівача знехтувально малий і вся потужність, що підводиться витрачається на випромінювання (63%) і тепловідвід по проводах (37%). Струм підігрівача підбирають таким чином, щоб стрілка вольтметра точно співпадала з останнім поділом шкали; при цьому свідчення міліамперметра будуть відповідати робочому току підігрівача.

Теплові перетворювачі є приладами непрямого вимірювання тиску; їх градуювальні криві різні для різних газів.

Градуювальні криві манометра типу ПМТ-2 для повітря показані на рисунку 4.4.

Принцип роботи гідростатичних перетворювачів: рідинних U-образних та компресійних манометрів описаний в літературі [1,2].

Завдання та контрольні запитання:

- розглянути загальну класифікацію методів і приладів для вимірювання низьких тисків, ознайомитися з принципом дії механічних і гідростатичних перетворювачів;
- вивчити принцип дії, конструкції і режими роботи теплових манометричних перетворювачів;
- вивчити блок схеми вакуумметрів, зазначених викладачем;
- зробити калібрування термопарного манометричного перетворювача ПМТ-2, виміряти тиск у вакуумній камері;
- оцінити нижню та верхню межі вимірюваного тиску повітря і газу, зазначеного в табл. 4.4, для асиметричного теплового

манометра опору, що має платинову робочу нитку діаметром d та довжиною L , укріплену в циліндричному корпусі діаметром D на молібденових тримачах діаметром 0,5 мм і довжиною 30 мм. Температура корпусу підтримується на рівні 300 К, а струм, що протікає по нитці, дорівнює I_n . Побудувати залежності температури нитки від тиску газів при постійному струмі I_n .

Таблиця 4.4 - Вихідні дані до лабораторної роботи 4.5

Вар.	Газ	Діаметр d , мкм	Довжина L , мм	Діаметр D , мм	Струм I_n , мА
1	H ₂	20	150	10	60
2	He	30	140	15	90
3	Ar	40	130	20	100
4	Ne	50	120	25	110
5	O ₂	60	110	10	120
6	CH ₄	70	100	15	130
7	CO ₂	80	150	20	140
8	H ₂	90	140	25	150
9	He	100	130	10	80
10	Ar	20	120	15	90
11	Ne	30	110	20	100
12	O ₂	40	100	25	110
13	Ch ₄	50	150	10	120
14	CO ₂	60	140	15	130
15	H ₂	70	130	20	140

Контрольні запитання

- 1 Як працює термопарний перетворювач?
- 2 Чи загрожує роботі теплового перетворювача прорив повітря до робочого об'єму?
3. Чому градувальні криві теплового перетворювача різні для різних газів?
4. Як позначається термопарний перетворювач на схемах вакуумних систем відповідно до ДСТУ?

4.6 Лабораторна робота «Іонізаційні манометричні перетворювачі»

Мета роботи - вивчити принцип роботи, конструкцію, особливості експлуатації і методи визначення основних параметрів іонізаційних манометрів.

У ході даної роботи необхідно:

- розглянути загальну класифікацію методів і приладів для вимірювання високих тисків, ознайомитися з принципом дії магнітних і радіоізотопних манометричних перетворювачів;
- вивчити принцип дії й особливості конструкції різноманітних типів електронних іонізаційних манометрів (ПМІ-2, модуляційного манометра Редхеда і т.д.);
- вивчити чинники, що визначають чутливість і діапазон вимірюваних тисків іонізаційних манометрів;
- вивчити порядок вмикання вакуумметрів ВІТ-2, ВІ-14 і виміряти тиск в об'ємах, зазначених викладачем;
- визначити граничний тиск іонізаційного манометра з коефіцієнтом чутливості K і струмом емісії катода I , якщо струми в ланцюзі колектора дорівнюють значенням наведеним в таблиці 4.5 де:
 - I_x , що викликається рентгенівським і УФ - випромінюванням;
 - I_a , що викликається електронною десорбцією;
 - I_{ϕ} , фотоелектронний струм зі стінок балона;
 - I_y струм відпливу.

Оцінити також тиск, при якому відхилення від пропорційності між тиском і колекторним струмом не перевищує R %.

Таблиця 4.5 - Вихідні дані до лабораторної роботи 4.6

Вар	K, Top^{-1}	I_e, A	I_x, A	I_a, A	I_{ϕ}, A	I_y, A	$R, \%$
1	20	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-9}	-	$2 \cdot 10^{-9}$	$9 \cdot 10^{-9}$	10
2	25	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-9}$	10^{-9}	-	$3 \cdot 10^{-9}$	15
3	30	$3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-10}$	$9 \cdot 10^{-10}$	-	5
4	35	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-10}$	-	$6 \cdot 10^{-10}$	10

5	40	$8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-9}$	-	-	-	15
6	45	$8 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-9}$	10^{-10}	-	10^{-10}	5
7	50	10^{-3}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-11}	-	10
8	40	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-9}$	10^{-10}	-	10^{-11}	5
9	30	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-9}$	-	10^{-11}	10^{-12}	15
10	20	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-9}$	10^{-9}	-	10^{-9}	5
11	10	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-9}$	10^{-9}	10^{-10}	-	10
12	15	$6 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-10}$	10^{-10}	-	$2 \cdot 10^{-10}$	15
13	45	$2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-10}$	-	10^{-10}	10^{-10}	15
14	35	$3 \cdot 10^{-3}$	-	10^{-9}	10^{-10}	10^{-9}	10
15	25	$5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-10}$	-	-	-	5

Контрольні запитання.

1. У якому діапазоні здатні вимірювати тиск іонізаційні манометри?
2. Чи придатні іонізаційні манометри для вимірювання тиску усіх газів і пар?
3. Чи залежать свідчення іонізаційного манометра від роду газу?
4. Навіщо при вимірах іонізаційні манометри необхідно обезгажувати?
5. Що станеться при прориві атмосфери в працюючий іонізаційний манометр?
6. Через що тиск в об'ємі манометра може не відповідати тиску у вакуумній системі?
7. Як позначається іонізаційний перетворювач на схемах вакуумних систем відповідно до ДСТУ?

4.7 Лабораторна робота «Вимірювання парціальних тисків»

Мета роботи - вивчити принципи роботи, особливості конструкції й основні параметри різноманітних типів газоаналізаторів (мас-спектрометрів).

Апаратура для вимірювання парціального тиску газів

При роботі на вакуумних установках часто необхідно знати не тільки повний тиск розрідженого газу, але і його парціальний склад. Для вимірювання парціального тиску служать газоаналізатори.

За принципом дії майже всі застосовувані газоаналізатори є мас-спектрометричними приладами побічної дії і складаються з датчика і вимірювального приладу. Датчик мас-спектрометричного приладу складається з трьох основних вузлів: джерела іонів, аналізатора і приймача іонів (колектора).

У мас-спектрометричному датчику аналізований газ іонізується, позитивні іони що утворилися розділяються по характерному для кожного з них відношенню маси іона до його заряду M/e . Відношення M/e називається масовим числом іона. Очевидно, що якщо іон іонізовано одноразово ($e=1$), то його масове число збігається з молекулярною масою і виражається в атомних одиницях маси (а.о.м.), рівних $1/16$ частини маси основного ізотопу кисню O^{16} .

Число однозарядних іонів виходить у багато разів більше числа всіх іонів з числом зарядів, більшим за одиницю. Тому вважають $M/e=M$.

Після розділення іони надходять на колектор і дають в його ланцюг струм, пропорційний парціальному тиску.

За способом поділу іонів в аналізаторі високовакуумні газоаналізатори можуть бути розділені на три великі групи:

1. Статичні мас-спектрометри, в яких розділення іонів здійснюється за допомогою магнітного відхилення іонного променя.
2. Часопролітні мас-спектрометри, у яких розділення іонів в аналізаторі відбувається під час прольоту. Мас-спектрометри цього типу носять також назву імпульсних мас-спектрометрів (хронотронов).

3. Радіочастотні мас-спектрометри, в яких характер руху іонів, наприклад, частота коливань, знаходиться в певній відповідності до прикладеної високочастотної напруги:

- а) омегатронний вимірювач парціальних тисків;
- б) квадрупольний (електричний фільтр мас) і монополярний мас-спектрометри;
- в) панорамний мас-спектрометр (фарвітрон);
- г) радіочастотний мас-спектрометр (топатрон).

Розглянемо коротко основні параметри, що характеризують мас-спектрометричні газоаналізатори.

1. Чутливість гранична. Гранична чутливість газоаналізатора виражає мінімально визначний парціальний тиск газу. Чутливість гранична залежить, як від характеристик датчика, так і від можливостей вимірювальної схеми. Для статичних мас-спектрометричних приладів чутливість часто виражається в частках відсотка і показує, яку частку окремого компонента у загальному складі газу здатний виявити даний прилад (газоаналітична чутливість). *Чутливість мас-спектрометричних газоаналізаторів різна для різних газів.* Щоб уникнути додаткових помилок, пов'язаних з переведенням відліку в парціальні тиски, запис компонентів нерідко здійснюється безпосередньо прямо в одиницях струму або напруги, а їхнє співвідношення характеризує відносний склад аналізованого газу.

2. Роздільна здатність. Роздільна здатність ρ для мас-спектрометричних приладів представляє собою відношення масового числа M до найменшого розрізняємо зміни масового числа ΔM , тобто роздільна здатність чисельно дорівнює масовому числу, при якому можуть бути повністю розділені сусідні маси, що відрізняються одна від одної на одиницю.

Залежно від типу приладу для даної роздільної здатності можуть бути постійними величини ΔM , $\Delta M/M$ або $\Delta M/M^2$. Тому, для кожного типу газоаналізатора є аналітичні формули, що виражають його роздільну здатність, хоча в ідеальному випадку бажано мати постійної величину ΔM , так як при цьому і великі і малі маси розділяються однаково добре.

Найбільшу роздільну здатність мають стаціонарні статичні мас-спектрометри з магнітним розділенням іонного променя. Для

звичайних вакуумних вимірювань достатня роздільна здатність до 50.

3. Діапазон аналізованих мас. У вакуумних системах з паромасляними дифузійними насосами утворюється безліч осколкових іонів в діапазоні мас від $M=50$ до $M=100$, які можна дослідити лише якісно. Для здійснення кількісного аналізу такої газового середовища необхідний прилад з діапазоном аналізованих мас до $M=500$.

Для вакуумних вимірювань в безмасляних системах достатній діапазон мас від 2 (водень) до 200 (ртуть).

4. Мінімальна реєстроване тиск. Зазвичай в надвисоковакуумних системах досить виміряти парціальний тиск, що становить 1% найменшого повного тиску газу, що досягається в системі. Так, якщо повний тиск дорівнює 10^{-7} Па, то мінімальне реєстрований тиск повинен становити 10^{-9} Па.

Спектр мас і його розшифровка.

На рисунку 4.5 представлений спектр монополярного масспектрометра. На ньому представлена залежність вихідного сигналу газоаналізатора I_i від масового числа M деяких газів. Мас-спектр отриманий при плавній безперервній розгортці за масами і запису вихідного сигналу на самописці.

Амплітуди піків іонних струмів пропорційні парціальним тискам окремих компонентів, іонізуючого електронного струму і чутливості газоаналізатора до відповідного компоненту:

$$I_i = s \beta_m I_e p_m$$

де I_i - амплітуда піку;

s - чутливість по азоту;

β_m - відносна чутливість;

I_e - електронний іонізуючий струм;

p_m - парціальний тиск компонента.

У деяких мас-спектрометрах, наприклад омегатронах, піки іонів певних масових чисел виділяються над рівнем невеликого фоновому струму. Фоновий струм має місце з-за багатьох причин: розсіювання іонів в камері аналізатора, недостатньою фокусування електронного і іонного потоків, нестабільності живлення, наведень,

шумів в ланцюзі посилення і ін. Відлік величини піку проводиться від середнього рівня фону.

Відносна чутливість мас-спектрометричних газоаналізаторів до різних газів практично збігається з відотною чутливістю іонізаційних манометричних датчиків.

Розгортка з масових чисел виділяє піки, які характеризуються відношенням маси іона до його заряду.

Явища, що впливають на вид спектру.

Електронний промінь і напружений катод призводять до дисоціації складних молекул газу на більш прості складові, які також іонізуються і дають в спектрі відповідні піки іонів. Наприклад, у спектрі CO_2 спостерігаються піки CO_2^+ , CO^+ , C^+ , O^+ , O_2^+ .

Пік з одним і тим же масовим числом може належати до різних речовин. Масове число 16 притаманне як метану CH_4^+ , так і атомарний кисень O^+ , масове число 28 - азоту та окису вуглецю CO^+ . Розрізнити їх можна по наявності додаткових відповідних компонентів в мас-спектрі.

Органічні сполуки дають велику кількість осколкових піків. У складних з'єднаннях переважають осколкові піки, за якими можна з відомим ступенем наближення скласти лише уявлення про вихідний продукт.

Погане видалення органічних розчинників після миття апаратури дає найбільший пік для етилового спирту і діетилового (сірчаного) ефіру в районі 31-ї маси, а для ацетону - в районі 43-ї маси.

Мінеральні масла дифузійних насосів дають серії піків з'єднань що містять вуглець, починаючи з метанових похідних до молекулярної маси самих масел. Найбільші по амплітуді піки відповідають, як правило, етан-пентановим похідним (2-5 вуглецевих атомів).

Наявність кисню в спектрі залишкових газів герметичних високовакуумних систем не характерно. Кисень утворює із завжди наявними в приладі вуглецевими забрудненнями різні сполуки, переважно окис вуглецю CO (масове число 28) і двоокис вуглецю CO_2 (масове число 44). Натікання повітря через течу дає паралельний ріст піків азоту (28), кисню (32) та аргону (40).

Після встановлення робочого режиму газоаналізатора проводиться його калібрування, яке полягає у визначенні чутливості приладу до різних газів. У систему з датчиком газоаналізатора послідовно напускається ряд відомих газів. При декількох значеннях тиску введеного газу визначається чутливість - відношення приросту вихідного сигналу газоаналізатора відповідного за збільшення тиску даного газу. Тиск газу в діапазоні $0,1-10^{-8}$ Па найбільш зручно визначати за іонізаційним манометром. Визначивши зазначеним чином середню чутливість мас-спектрометричного газоаналізатора по одному газу, можна підрахувати його орієнтовну відносну чутливість для деяких інших газів.

Одночасно відзначаються місця піків іонів даного газу на мас-спектрі або робочі параметри (частота, напруга), що відповідають цим пікам. Знаючи розташування або робочі параметри приладу для піків іонів з відомими масовими числами, можна визначити місця появи або робочі параметри піків іонів з іншими масовими числами.

Квадрупольний і монопольний мас-спектрометр (електричні фільтри мас)

1 Квадрупольний мас-спектрометр. Основними перевагами приладу цього класу у порівнянні з іншими газоаналізаторами, є велика роздільна здатність, висока чутливість і дуже широкий діапазон робочих тисків, а також відсутність магнітного поля.

Принципова схема приладу (без оболонки) наведена на рисунку 4.6. Досліджуваний газ іонізується в іонізаторі (джерело іонів) і виштовхується у вигляді іонного пучка через діафрагму в простір аналізатора.

У аналізаторі розділення іонів за масами відбувається під дією електричного поля квадруполя, створюваного чотирма паралельними циліндричними стрижнями, до яких включені змінна напруга виду $U \sim \cos \omega t$ і постійна напруга U .

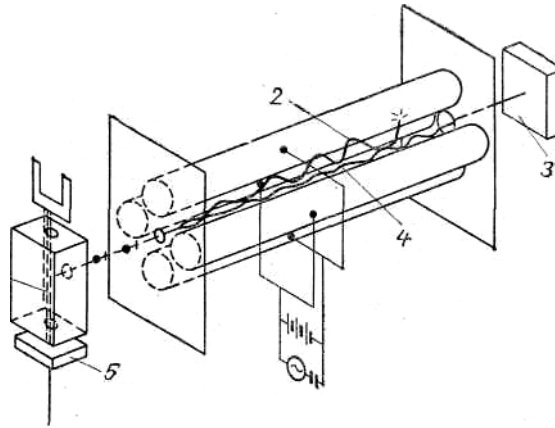


Рис. 5.2 Принципова схема квадрупольного мас-спектрометра.

- 1 - іонізуючий пучок електронів;
- 2 - іон що коливається;
- 3 - колектор іонів;
- 4 - іон що не коливається;
- 5 - колектор електронів.

Іон, що рухається вздовж осі стрижнів, буде розгойдуватися високочастотним полем, причому амплітуда коливань залежить як від масового числа іона M , так і від величини напружень на стрижнях. Іони, амплітуда коливань яких залишається менше відстані r_0 від центральної осі квадруполя до стрижня, можуть безперешкодно проходити через квадрупольні поля. Можна підібрати параметри поля так, що в залежності від напруги що подається, через аналізатор будуть проходити іони однієї певної маси.

При відповідній довжині аналізуючої системи і досить малої енергії радіального руху здійснювати стійкі коливання близько осі системи і дійти до колектора іонів зможуть тільки іони з масою

$$M = \text{const} U \sim \omega^2 r_0^2$$

Відфільтровані в аналізаторі іони певної маси дають в ланцюзі колектора струм, пропорційний парціальному тиску.

2. Монопольний мас-спектрометр. Монопольний мас-спектрометр являє собою немов би одну четверту частину

квадрупольного мас-спектрометра. Пристрій іонного джерела і приймача іонів монопольного мас-спектрометра подібний пристрою цих вузлів квадруольного мас-спектрометра.

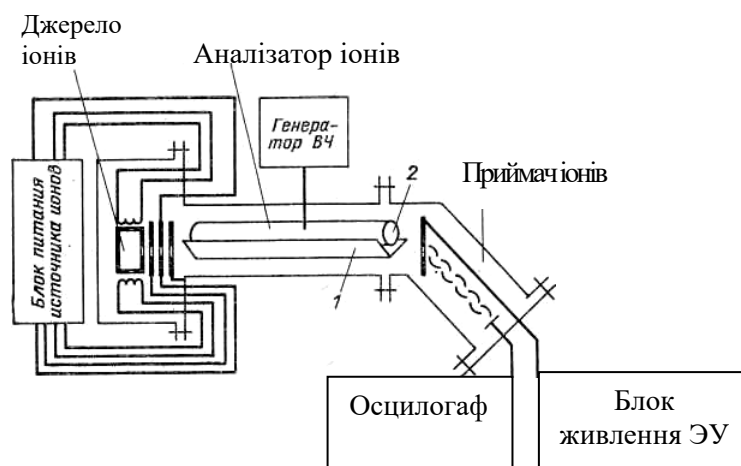


Рис. 4.7 - Принципова схема монопольного мас-спектрометра.

Аналізатор датчика складається з круглого стрижня 2 і пластини 1 кутового профілю (рис 4.7). Куток 1 знаходиться під потенціалом землі, а на стрижень 2 подається напруга виду:

$$U = +U \sim \cos \omega t$$

У зазорі між електродами розподіл потенціалів має той же вигляд, що і для квадруольного мас-спектрометра (куточок служить як би дзеркалом).

Іони з джерела запускаються в зазор між електродами. По дорозі в залежності від їх маси та заряду вони розгойдуються в полі, і потрапляють на кутовий електрод. Пройти аналізатор можуть тільки ті іони, у яких довжина хвилі **биттів** більше довжини аналізатора.

У процесі виконання роботи необхідно:

- розглянути класифікацію й основні лінії газоаналізаторів (магнітний, панорамний, циклотронний, часопротітний,

квадрупольний, монолітний), а також вивчити основні параметри, що характеризують їхню роботу;

- розібрати видані викладачем датчики парціальних тисків, визначити тип кожного з них, накреслити ескізи датчиків, що пояснюють принципи їхньої роботи, оцінити роздільну здатність і діапазон мас, що реєструється;

- визначити, як повинна змінюватися напруга, що прискорює, в іонному джерелі магнітного газоаналізатора з постійним магнітним полем, щоб розгортка по масових числах була лінійною;

- визначити, як повинна змінюватися напруженість магнітного поля в магнітному газоаналізаторі з постійною прискорюючою напругою, щоб розгортка по масових числах була лінійною;

- визначити, як змінюється частота змінної напруги на стрижнях квадруполя, якщо розгортка по масових числах лінійна (амплітуда напруги постійна);

- оцінити розміри магнітного датчика гелієвого течошукача, якщо напруженість постійного магнітного поля складає 10^4 А/м, а прискорююча напруга - 200 В;

- визначити прискорюючу напругу U (напруженість магнітного поля H) (табл. 4.7) магнітного газоаналізатору, виданого викладачем, при якому на колектор потрапляють іони типу I^{x+} .

Таблиця 4.6 Вихідні дані до лабораторної роботи 4.7

Варіант	Прискорююча напруга N , В	Напруженість магнітного поля H , А/м	Тип іонів
1	300		H_2^+
2	100		N_2^+
3	200		He^+
4	50		Ar^+
5	120		CO_2^+
6		$5 \cdot 10^4$	O_2^+
7		$2 \cdot 10^4$	H_2O^+
8		10^4	CH_4^+
9		$8 \cdot 10^3$	$C_2H_2^+$

10		$8 \cdot 10^4$	CO^+
11		10^3	C_2H_4^+
12		10^4	C_2H_6^+
13	50		Ne^+
14	100		Ne_2^{2+}
15	150		CO_2^{2+}

Контрольні запитання.

1. У чому різниця між статичними і динамічними газоаналізаторами?
2. Як відбувається розподіл іонів за масами в квадрупольном газоаналізаторі?
3. Чим визначається енергія вторинних електронів, що використовуються для аналізу в Оже-спектрометрії?
4. Як позначається газоаналізатор на схемах вакуумних систем відповідно до ДСТУ?

4.8 Лабораторна робота «Вакуумні герметичні з'єднання»

Мета роботи – вивчити основні принципи та технологічні прийоми отримання герметичних роз'ємних та не роз'ємних вакуумних з'єднань різноманітних матеріалів та елементів конструкцій вакуумних систем.

У всякій вакуумній системі завжди є ряд ділянок, найменш надійних щодо герметичності. Герметичність вакуумної системи - це властивість всіх її елементів і їх з'єднань забезпечувати настільки мале проникнення (натікання) газу через них, щоб їм можна було знехтувати в робочих умовах.

Зазвичай натікання газу відбувається через всі місця порушення герметичності, які називають течами. При всій старанності виконання вакуумних систем в цілому неможливо досягти повної відсутності течі. Можна домогтися лише того, щоб сумарне натікання залишалося в допустимих межах.

У ході виконання роботи необхідно:

- вивчити і зробити ескізи різноманітних варіантів вакуумних з'єднань, використовуваних у різних умовах експлуатації (низький, середній, високий вакуум, з'єднання, що прогріваються і не прогріваються, з'єднання металу зі склом і керамікою і т.д., шліфові, клиновидні, фланцеві й інші з'єднання);
- визначити тип і призначення, пояснити принцип пристрою вакуумних з'єднань, виданих викладачем ;
- запропонувати свій варіант з'єднання елементів вакуумних систем, виданих викладачем, для зазначених умов експлуатації, намалювати ескіз з'єднання.

4.9 Лабораторна робота «Елементи конструкцій вакуумних систем»

Мета роботи - вивчити конструкцію і принципи дії різноманітних функціональних елементів вакуумних систем.

Основні вимоги, що пред'являються до комутаційної апаратури. Комутаційна апаратура (крани, вентилі, затвори, клапани, натікачі) є одним з найважливіших елементів вакуумних систем.

Особливості конструкцій вакуумної комутаційної апаратури випливають зі специфічних вимог, різко відрізняються від вимог, що пред'являються до апаратів того ж призначення, що застосовуються в газових, пневматичних і гідравлічних системах.

До таких специфічних вимог відносяться:

1 Висока герметичність. Особливо жорсткі вимоги по герметичності пред'являються до апаратури, застосовуються в системах високого і надвисокого вакууму.

2 Максимальна провідність у відкритому положенні. Для апаратури, що працює при молекулярному режимі течії газу, це вимога найкраще забезпечується створенням прямоточних конструкцій, що надають найменший опір потоку відкачуваної газу.

3. Мінімальне газовиділення внутрішніх частин апаратури. Необхідно виключити застосування мастил та ущільнювача з високою пружністю пари. Конструкція апаратів повинна бути розбірною і не повинна мати недоступних для промивання місць і важко відкачуємих кишень.

4. Незначна адсорбція газів внутрішніми поверхнями апаратури. Апаратура повинна виготовлятися з корозійно стійких металів.

5. Апаратура, призначена для роботи в системах надвисокого вакууму, повинна допускати з метою її обезгажування можливість багаторазового прогріву до температури 300-700°C.

Конструктивне виконання комутаційної апаратури, призначеної для роботи в умовах середнього та високого вакууму, часто відрізняється лише прагненням зменшити поверхню гумових ущільнень, звернену у вакуумну порожнину. Зауважимо, що з метою уніфікації в системах середнього вакууму досить часто використовують апаратуру, призначену для роботи в системах високого вакууму, незважаючи на деяке ускладнення конструкції і

трохи більшу вартість. Комутаційну апаратуру доцільно розглядати в залежності від галузі застосування, яка часто закладає додаткові вимоги.

У ході роботи необхідно:

- вивчити принцип дії і конструкцію вакуумних кранів, клапанів і натікачів різноманітних типів і призначень;
- вивчити конструкцію і технологічні особливості сильнострумових та слабкострумових вакуумних струмовводів;
- вивчити конструкцію і принцип дії пристроїв для передачі прямування (поступального, обертального, коливального) в області високого вакууму;
- вивчити конструкцію оглядових вікон вакуумних установок.

4.10 Лабораторна робота «Типові схеми вакуумних установок. Одержання вакууму»

Мета роботи - вивчити принципи побудови і монтажу вакуумних установок різноманітних типів. На практиці використати вміння та знання що були отримані за весь час вивчення предмету.

Для визначення газового потоку в реальних системах можна використовувати метод постійного об'єму. Розглянемо схему на рис. 4.5,а. У цьому випадку насос 1 і клапан 2 використовуються в якості допоміжної вакуумної системи для одержання вакууму в об'ємі 3. У процесі вимірювання клапан 2 закривається. Газ з балона 6 через натікач 4, що знаходиться в об'ємі 3, викликає збільшення тиску p . Якщо потік газу постійний, то відбувається лінійне підвищення тиску (крива 2 на рис. 4.5,б).

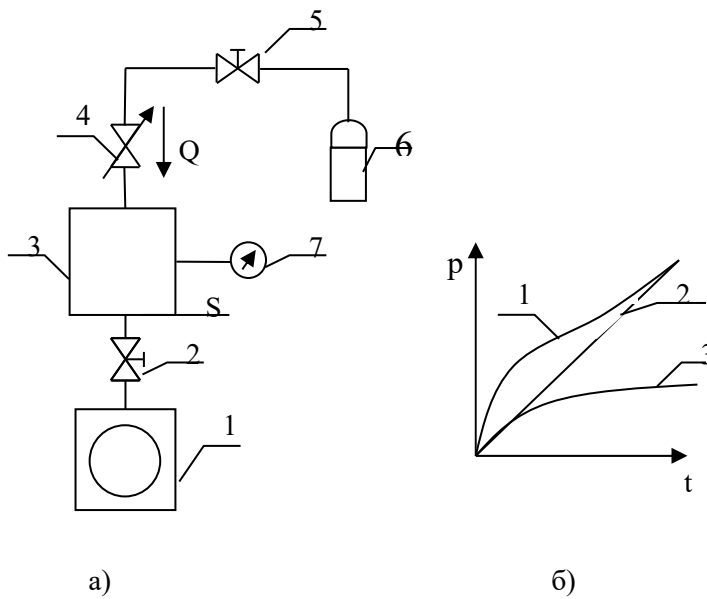


Рисунок 4.3 - Схема для визначення потоку газу методом постійного об'єму: а-вакуумна схема, б-криві відкачки.

По швидкості збільшення тиску визначають газовий потік:

$$Q = V \frac{dp}{dt}$$

В момент припинення відкачки вакуумної камери ($t=0$) у ній виникає газовиділення адсорбованих газів, що приводить до нелінійного підвищення тиску (крива 3 на рис. 4.5,б). Сумарна зміна тиску відбувається згідно кривої 1 (рис. 4.5,б). Для надійного вимірювання потоку методом постійного об'єму газовиділення повинне бути мале в порівнянні з вимірюваним газовим потоком. Цього можна досягти тривалою попередньою відкачкою вакуумної камери.

У ході роботи необхідно:

- вивчити і намалювати схему (відповідно до Держстандарту) вакуумної установки, зазначеної викладачем.
- разом з викладачем необхідно відкачати до необхідного тиску вакуумну установку ВУП-5м. Методом постійного тиску розрахувати швидкість натікання газу в камері установки.

5 Індивідуальна робота «Матеріали вакуумних систем»

Мета роботи – ознайомитись з вимогами до матеріалів вакуумних систем. Розглянути класифікацію та властивості різних матеріалів, що використовуються у вакуумній техніці.

В даній роботі готується реферат обсягом 10 сторінок, в якому необхідно розглянути наступні питання:

- дати характеристику загальних вимог до матеріалів вакуумних систем;
- дати класифікацію матеріалів, що використовуються в вакуумній техніці;
- привести загальні принципи підготовки матеріалів вакуумних систем до роботи в умовах вакууму;
- дати докладну характеристику вакуумних властивостей та призначення матеріалів, що відповідають вашому варіанту завдання (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 - Варіанти завдань до індивідуальної роботи

Варіант	1	2	3	4
Матеріал	Чорні метали	Скло	Кольорові метали	Гума
Варіант	5	6	7	8
Матеріал	Тугоплавкі метали	Вакуумні масла	Прецизійні сплави	Пластмаси
Варіант	9	10	11	
Матеріал	Кераміка	Пасти, замазки, лаки	Клей	

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

Основна:

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника: Підручник для вузів. - 2-е вид., перероб. та доп. - М.: Высш. шк. , 1990. - 320 с.
2. Грошковський Я. Техника высокого вакуума. - М.: Мир, 1975. - 623 с.
3. Розанов Л.Н. Вакуумные машины и установки. - Л.: Машиностроение, 1975. - 336 с.
4. Востров Г.А., Розанов Л.Н. Вакуумметры. - Л.: Машиностроение, 1967. - 235 с.
5. Розберн Ф. Справочник по вакуумной технике и технологии. - М.: Мир, 1972. - 456 с.

Додаткова:

6. Кузьмин В.В., Левіна Л.Е., Тиворогов И.В. Вакуумметрическая аппаратура техники высокого вакуума и течеискания. - М.: Энерго-атомиздат, 1984. - 240 с.
7. Данилін В. С., Минайчев В.Е. Основы конструирования вакуумных систем. - М.: Энергия, 1971. - 392 с.
8. Минайчев В.Е. Вакуумные крионасосы. - М.: Энергия, 1976. - 152 с.
9. Пипко А.И., Плисковський В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. - М.: Энергия, 1979. - 504 с.
10. Саксаганський Т.Д. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. - М.: Атомиздат, 1980. - 216 с.
11. Фролов Е.С. Турбомолекулярные вакуум-насосы. - М.:Машиностроение, 1980. - 119 с.
12. Цейтлин А.Б. Пароструйные вакуумные насосы. - М.; Л.: Энергия, 1965. - 400 с.
13. Балицкий А.В. Технология изготовления вакуумной аппаратуры. - М.: Энергия, 1974. - 312 с.
14. Глазков А.А., Саксаганський Г.А. Вакуум электрофизических установок и комплексов. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
15. Саксаганський Г.Л. Электрофизические вакуумные насосы. -М. : Энергоатомиздат, 1968. - 280 с.

16. Механические вакуумные насосы / Е. С. Фролов, И. В. Автономова, В.И. Васильев и др. - Н.: Машиностроение, 1989. - 288 с.
17. Дешман С. Научные основы вакуумной техники. - М.: Мир, 1964. - 715 с.

Навчальне видання
(українською мовою)

Мікасян Геннадій Ромеович

ОСНОВИ ФІЗИКИ ВАКУУМУ ТА ВАКУУМНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчальний посібник
для студентів III курсу фізичного факультету

Рецензент *Ю.О. Швець*
Відповідальний за випуск *О.С. Яновський*
Коректор *Л.М. Северина*