

621.5(075)

№12

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ФІЗИЧНИХ ОСНОВ ВАКУУМНОЇ ТЕХНІКИ

Навчальний посібник



621.5(075)
Л12

Лабораторний практикум з фізичних основ вакуумної техніки

Навчальний посібник

За загальною редакцією
кандидата фізико-математичних наук, доцента В.Б. Лободи

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів

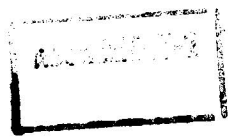
НТБ ВНТУ



468454

621.5(075) Л12 2015

Лабораторний практикум з фізичних основ



Суми
Університетська книга
2015

УДК 378.147.88:533.59+621.52

ББК 22.3Я73

Л 12

Рекомендовано до друку вченою радою Сумського державного педагогічного університету ім. А.С.Макаренка. Протокол № 5 від 25.10.2010

Рецензенти:

А.М. Черноус, доктор фізико-математичних наук, професор, проректор з наукової роботи СумДУ;

С.П. Рошупкін, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач лабораторією ІПФ НАН України;

Г.Я. Чепурних, доктор фізико-математичних наук, професор.

Гриф надано Міністерством освіти і науки України.

Лист № 1/11-11838.1 від 22.12.2010

Автори:

В.Б. Лобода, С.М. Хурсенко, Ю.О. Шкурдода, А.І. Салтикова, В.О. Кравченко

Л 12 **Лабораторний практикум з фізичних основ вакуумної техніки** : навч. посіб. / В. Б. Лобода, С. М. Хурсенко, Ю. О. Шкурдода та ін ; за заг. ред. доц. В. Б. Лободи. — Суми : Університетська книга, 2015. — 230 с.

ISBN 978-966-680-600-3

Практикум містить 10 сучасних лабораторних робіт з фізичних основ вакуумної техніки, яким передують короткі теоретичні відомості, що дозволяють студентам більш глибоко засвоїти сутність фізичних явищ та ідей, покладених в основу роботи вакуумного обладнання. Кожна лабораторна робота пропонує завдання, опис лабораторної установки, послідовність виконання операцій та методику проведення досліджень.

Посібник призначений для студентів фізичних та фізико-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів, а також інженерно-технічних працівників, фахівців у галузі вакуумної техніки.

468454

УДК 621.52
ББК 31.77я73

ISBN 978-966-680-600-3

© Лобода В.Б., Хурсенко С.М.,
Шкурдода Ю.О. та ін., 2012
© ТОВ «ВТД «Університетська
книга», 2015

НТБ ВНТУ
м.Вінниця

ЗМІСТ

Передмова	4
Лабораторна робота № 1	5
Вивчення елементів конструкцій сучасних вакуумних систем	5
Лабораторна робота № 2	21
Прилади для вимірювання форвакууму, високого та надвисокого вакууму	21
Лабораторна робота № 3	44
Вивчення конструкції форвакуумного механічного насоса та одержання форвакууму	44
Лабораторна робота № 4	71
Вивчення конструкції адсорбційного насоса та одержання безмасляного форвакууму	71
Лабораторна робота № 5	96
Вивчення конструкції паромасляного дифузійного насоса та одержання високого вакууму	96
Лабораторна робота № 6	130
Вивчення конструкції магніторозрядного насоса та одержання безмасляного високого вакууму	130
Лабораторна робота № 7	151
Вивчення конструкції орбітронного гетерно-іонного насоса та одержання безмасляного високого вакууму	151
Лабораторна робота № 8	176
Визначення складу залишкової атмосфери вакуумної установки за допомогою мас-спектрометра МХ7304А	176
Лабораторна робота № 9	196
Прилади і методи пошуку негерметичностей вакуумних систем	196
Лабораторна робота № 10	219
Вивчення конструкції та одержання високого вакууму в промисловій вакуумній установці ВУП-5	219
Довідковий розділ	229
Література	230

ПЕРЕДМОВА

Задум цього посібника виник у авторів після того, як у СумДПУ ім. А.С. Макаренка при підтримці ВАТ „Selmi” та Інституту прикладної фізики НАНУ була створена сучасна навчальна лабораторія вакуумної техніки для практичного супроводу лекційного курсу „Фізичні основи вакуумної техніки”, що викладається при підготовці майбутніх фахівців з напрямку 6.040203. Фізика.

Практикум містить 10 лабораторних робіт, які, на нашу думку, дозволять студентам не тільки одержати практичні навички використання різноманітного сучасного вакуумного обладнання при проведенні експериментальних фізичних досліджень, а й глибше зрозуміти та засвоїти фізичні ідеї, покладені в основу його роботи. Адже вся історія розвитку вакуумної техніки (починаючи з перших розробок Геде і до наших днів) надзвичайно яскраво демонструє практичну реалізацію цілої низки фізичних відкриттів, а також досягнень сучасного матеріалознавства, фізики і техніки низьких температур, фізики і хімії поверхні тощо.

Значний об'єм посібника присвячений теоретичним питанням фізики роботи вакуумного обладнання (різних типів насосів, манометричних перетворювачів тощо), що дозволяє проводити лабораторні заняття навіть у тому випадку, коли їм ще не передують відповідний лекційний курс.

Крім традиційних „класичних” лабораторних робіт з вивчення механічних та дифузійних насосів, автори пропонують кілька власних робіт з техніки безмасляного вакууму (“Адсорбційні насоси”, “Орбітронний насос” тощо), а також лабораторну роботу з вивчення складу залишкової атмосфери з використанням сучасного мас-спектрометра МХ7304А з комп'ютерним управлінням.

Вважаємо, що посібник буде корисним не тільки для студентів фізичних та фізико-технічних спеціальностей, а й для інженерно-технічних працівників, які у своїй практичній діяльності використовують сучасне вакуумне обладнання.

З огляду на те, що практикум є першим україномовним навчальним посібником фізичних основ вакуумної техніки, автори будуть вдячні за всі побажання, спрямовані на покращення його змісту.

Автори

Вивчення елементів конструкцій сучасних вакуумних систем

Мета роботи: ознайомитися з основними конструктивними елементами сучасних вакуумних систем.

Обладнання: вакуумпроводи (сильфони, гумові і пластмасові вакуумні шланги), нерозбірні з'єднання, розбірні з'єднання з різними ущільнювальними елементами (гумові, фторопластові, мідні та алюмінієві прокладки різної форми), оглядові віконця, скляні і керамічні струмовводи, вакуумні затвори та вентилі в розібраному стані.

Теоретичний матеріал

Сучасні вакуумні установки і системи (особливо надвисоковакуумні) у своїй переважній більшості є досить специфічними і складними. У них знайшли своє втілення новітні досягнення матеріалознавства, конструювання, технологій виготовлення деталей та вузлів, контролю якості тощо.

Основними конструктивними елементами та вузлами вакуумних установок є трубопроводи, нерозбірні (нерознімні) з'єднання, розбірні (рознімні) з'єднання, затвори, вентилі, натікачі, електричні вакуумні вводи, пристрої для передавання рухів у вакуумний об'єкт, оглядові вікна тощо.

Трубопроводи (у вакуумній техніці їх часто називають вакуумними проводами або вакуумпроводами) з'єднують елементи вакуумних систем. Вони повинні мати необхідну провідність і достатню механічну міцність, бути хімічно стійкими, мати малу газопроникність і незначне газовиділення з внутрішніх поверхонь.

Вакуумпроводи бувають жорсткими і гнучкими. Жорсткі вакуумпроводи виготовляються з металевих (як правило, зі спеціальних сортів нержавіючої сталі) труб різного перерізу і форми. Експериментальні вакуумні установки часто виготовляються зі спеціальних сортів скла.

Гнучкі вакуумпроводи виготовляються із сільфонів (гнучких металевих тонкостінних труб) та гумових або пластмасових шлангів. Для того, щоб вони не сплющувалися під дією сили атмосферного тиску повітря, сільфони мають спеціальну гофровану форму (рис. 1.1) з ребрами жорсткості, а товщина стінок шлангів має дорівнювати внутрішньому діаметру трубопроводу для гумових і одній чверті внутрішнього діаметра для поліетиленових трубопроводів.

З'єднання окремих трубопроводів та їх частин може бути як нерозбірним, так і розбірним.

Нерозбірні з'єднання виготовляють зварюванням і паянням. Найпоширенішим методом зварювання є електродугове зварювання в захисному (аргоновому) середовищі. У такий спосіб з'єднуються деталі зі звичайних та нержавіючих сталей, якщо товщина деталей становить 0,1–5 мм. На рис. 1. 2 наведені приклади конструкторського вирішення вузлів, які з'єднуються зварюванням.

Специфічними особливостями такого зварювання є:

- суцільність (герметичність) зварних швів;
- недопустимість двосторонніх швів;
- накладання зварювального шва на поверхні, що повернена вбік вакууму;
- недопустимість утворення «карманів», повернених увік вакууму.

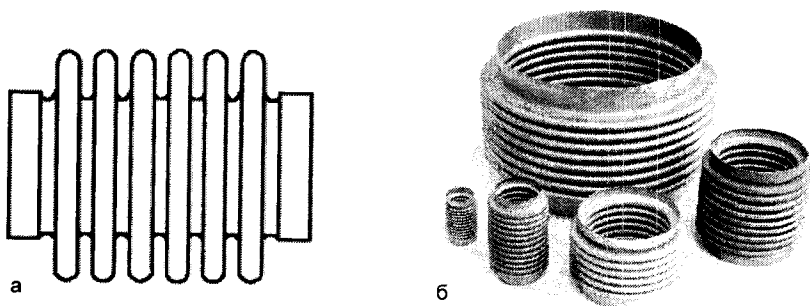


Рис. 1.1. Схематичне зображення(а) та зовнішній вигляд (б) різних сільфонів

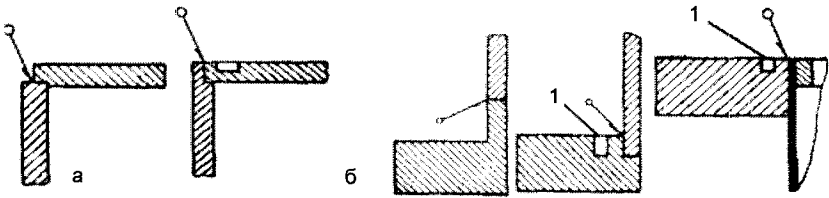


Рис. 1.2. Конструкції зварних вузлів вакуумних установок:

а – зварювання однакових за товщиною деталей; б – зварювання деталей різних за товщиною; 1 – розвантажувальна канавка

Особливо відповідальні вузли зварюють за допомогою потужного електронного променя у спеціальних вакуумних електронно – променевих зварювальних установках. Електронно-променевим зварюванням можна з'єднувати й деталі з різномірних металів – сталі та міді тощо.

З'єднання вузлів за допомогою паяння виконується за умови незначних силових і температурних навантажень на ці вузли. Перевагою паяння порівняно зі зварюванням є значно нижча температура розігрівання з'єднувальних деталей. Крім цього, паянням можна з'єднувати деталі, які не можна зварити, наприклад: сталь і латунь, мідь і нікель тощо.

Вимоги до вакуумних швів при паянні аналогічні вимогам до зварних швів.

Паяння здійснюється за допомогою м'яких або твердих припоїв залежно від експлуатаційних температурних і міцнісних вимог до конкретного вузла.

М'які припої (ПОС) складаються з олова та свинцю з незначними домішками міді. Діапазон температури плавлення таких припоїв становить 180–250 °С (залежно від концентрації компонент), їх міцність невелика. Робоча температура вузлів не повинна перевищувати 120 °С.

Тверді припої (ПСр) складаються зі срібла та міді. Температура їх плавлення лежить у діапазоні 650–800 °С (залежно від концентрації компонент). Шви, паяні твердими припоями, витримують нагрівання до 300 °С і мають значну міцність.

Нерозбірно (паянням) можуть бути з'єднані трубопроводи з деяких металів і скла. При близьких значеннях термічних коефіцієнтів розширення метал і скло утворюють узгоджений вакуумносущільний спай. З металів найчастіше для цього використовують спеціальний сплав – ковар (Co – 18%, Ni – 29%, Fe – основа), який зварюється з нержавіючими сталями і легко спаюється зі склом. Максимальна робоча температура спаїв ковару зі склом може досягати 500 °С.

У сучасній вакуумній техніці широко застосовуються спеціальні сорти кераміки, які порівняно зі склом мають набагато кращі діелектричні, міцнісні й термічні властивості. Спай металів з кераміками здійснюється або за допомогою спеціальних активних металевих припоїв, які вступають у хімічну взаємодію з матеріалом кераміки, або без використання активних припоїв – дифузійним зварюванням у вакуумі. Такі з'єднання мають високу міцність, а їх максимальна робоча температура сягає 800 °С.

На рис. 1.3 наведено приклади деталей вакуумних установок з використанням скла та кераміки.

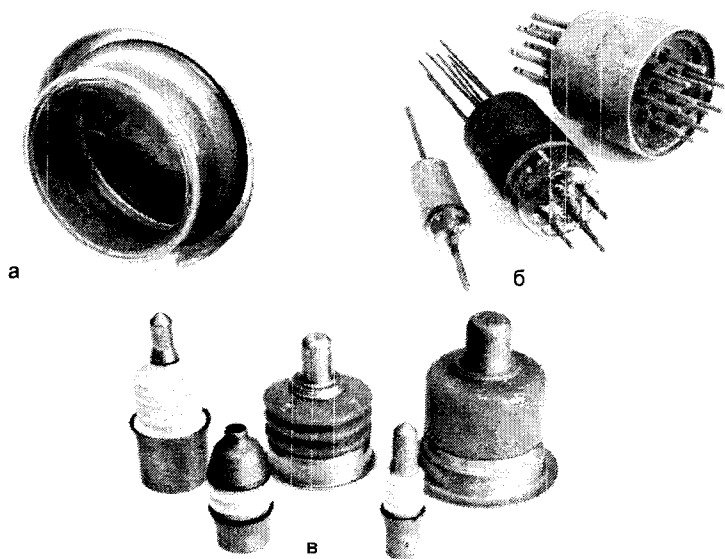


Рис. 1.3. Деталі вакуумних установок з використанням скла та кераміки:
а – оглядове скляне вікно; скляні (б) та керамічні (в) струмовводи

Розбірні з'єднання повинні відповідати таким вимогам:

- мати мінімальне натікання і газовиділення;
- бути механічно міцними, термічно стійкими, здатними зберігати герметичність після багаторазових збирань і розбирань;
- бути зручними й технологічними у виготовленні;
- легко перевірятися на герметичність.

Такі з'єднання виконуються за загальною схемою – у зазорі (проміжку) між деталями, які з'єднуються (фланцями) розташовується спеціальний елемент – ущільнювач, який, деформуючись, заповнює нерівності на поверхнях фланців і таким чином герметизує з'єднання. Фланці при цьому притискаються один до одного за допомогою болтів або якимось іншим способом (накидною гайкою, атмосферним повітрям тощо). Важливим є те, що зусилля, які забезпечують необхідну деформацію ущільнювача для герметизації деталей, повинні бути значно меншими порівняно з межею пружності матеріалів, з яких виготовлені ці деталі, і не деформувати їх.

У вакуумній техніці ущільнювачі одержали назву вакуумних ущільнювальних прокладок.

Першим матеріалом для ущільнювальних прокладок у вакуумних установках була гума – надзвичайно еластичний матеріал, який витримує багато деформаційних циклів.

Спеціально для потреб вакуумної техніки були створені особливі (вакуумні) сорти гуми, які широко використовуються в системах високого та низького вакууму й температура прогрівання яких не перевищує 200 °С. Гумові ущільнювачі у формі кілець різного діаметру і перерізу витримують практично необмежену кількість збирань і розбирань з'єднань. Невеликі зусилля для надійної герметизації вузлів з гумовими ущільнювачами (1–2 Н на 1 мм довжини ущільнювача) та невисокі вимоги до якості виготовлення поверхонь з'єднувальних деталей (гума надійно заповнює виступи й заглибини заввишки в сотні мікрометрів) забезпечують простоту і надійність таких з'єднань.

Протягом останніх десятиліть у високовакуумних системах як матеріал для ущільнювачів використовується синтетичний матеріал – фторопласт, який має достатню еластичність надзвичайно мале газовиділення і високу хімічну стійкість. Вузли із фторопластовими прокладками можна прогрівати до 250 °С.

Для одержання високого й особливо надвисокого вакууму вся вакуумна система повинна тривалий час знегажуватися нагріванням до температур 350–450 °С. Зрозуміло, що ні гума, ні фторопласт не можуть бути використані як матеріали для ущільнювачів у таких системах. Для герметизації з'єднань у них використовуються металеві ущільнювальні прокладки. Необхідною умовою для запобігання розгерметизації таких вузлів при охолодженні є рівність термічних коефіцієнтів розширення металів, з яких виготовлені прокладка й фланці у всьому температурному інтервалі. Крім цього, метал прокладки повинен бути досить пластичним, а матеріал фланця – досить твердим. Найбільш повно цим вимогам відповідають мідь (прокладка) і вакуумні сорти нержавіючих сталей (фланець). Тому ущільнювальні прокладки надвисоковакуумних установок виготовляють з особливо чистої міді.

Використання прокладок з міді потребує значних (порівняно з гумою) зусиль для деформації прокладки й створення надійної герметизації – 200–300 Н на 1 мм довжини ущільнювача. Це майже у двісті разів більші зусилля, ніж для гумових прокладок. Створення таких зусиль забезпечується великою кількістю стяжних болтів. Крім цього, мідь (незважаючи на її значну пластичність) неспроможна при деформації заповнювати значні нерівності поверхонь з'єднувальних деталей, що висуває дуже жорсткі вимоги до якості обробки їх поверхонь.

У більшості конструкцій розбірних з'єднань з мідними прокладками після розбирання вузла деформована прокладка замінюється на нову, недеформовану, тобто така прокладка є одноразовою. Для зменшення втрат досить дорогої й дефіцитної міді часто використовують прокладки з більш дешевого алюмінію. Проте, у разі тривалих і багаторазових нагрівань до 350–450 °С вузла з алюмінієвою прокладкою спостерігається дифузія легкоплавкого алюмінію в поверхневі шари з'єднувальних деталей, що призводить до «прилипання» прокладки до поверхні фланця.

Для забезпечення значних локальних зусиль, необхідних для деформації металевих прокладок (крім великої кількості стяжних болтів), ті місця фланцевих з'єднань, які безпосередньо герметизуються (притискаються до прокладки), мають ще й спеціальну форму – «клин – канавка», «зуб – зуб» тощо. Це вимагає дуже точного збігу їх розмірів на обох з'єднувальних фланцях, що значно ускладнює виготовлення й збільшує вартість цих вузлів.

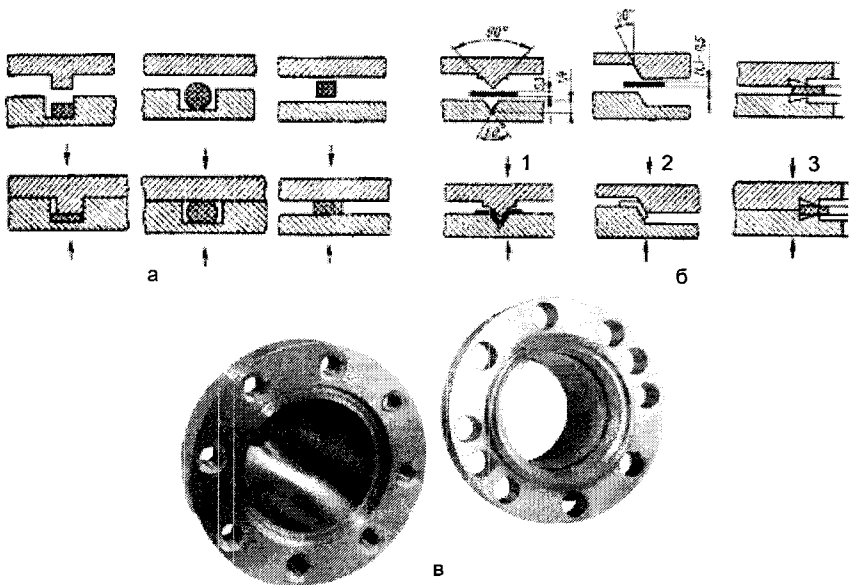


Рис. 1.4. Схеми розбірних з'єднань з гумовими (а) та металевими (б) прокладками та зовнішній вигляд (в) фланців з ущільнюванням типу «клин – канавка»:

1 – канавочно-клинове ущільнення; 2 – конусне ущільнення; 3 – ущільнення типу «конфлат»

На рис. 1.4 подані найбільш поширені схеми розбірних з'єднань з гумовими (а) та металевими (б) ущільнювачами. Тут же наведено й зовнішній вигляд деяких вузлів (в) з металевими ущільнювачами в розібраному стані.

Вакуумні затвори використовуються для комутації різних частин вакуумних установок (рис. 1.5).

Вакуумні затвори, як правило, слугують для перекривання трубопроводів з великими прохідними перерізами (діаметром 100 мм і більше). Перекривання прохідного отвору здійснюється заслінкою, яка залежно від конструкції затвору або повертається на 90° до вісі трубопроводу (рис. 1.6, а) або ж переміщується за межі трубопроводу (рис. 1.6, б).

Вакуумні затвори			
За призначенням	За робочим тиском	За геометричною формою	За типом приводу
затвори	низьковакуумні	прямі	ручні (механічні)
вентилі	високовакуумні	кутові	електромеханічні
натікачі	надвисоковакуумні	складні	електромагнітні

Рис. 1.5. Класифікація вакуумних затворів

Ущільнення робочого елемента затвора (заслінки у формі тарілки) здійснюється за допомогою гумової прокладки. Затвор може мати як ручний (механічний), так і електромеханічний (електродвигун) привід. Як правило, затвор може знаходитися у двох робочих станах – закритому і відкритому.

Різновидом вакуумних затворів є вакуумні крани та вентилі (клапани). Вакуумні крани та вентилі застосовуються, якщо немає потре-

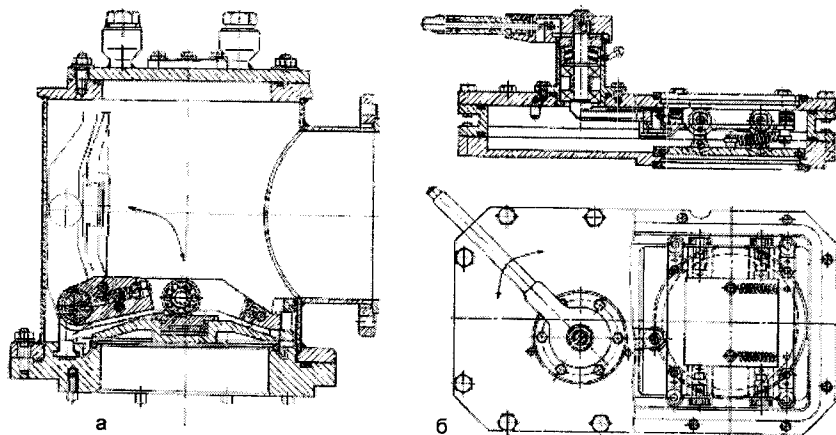


Рис. 1.6. Схематичне зображення вакуумних затворів: а – поворотний затвор; б – шиберний затвор

би у використанні трубопроводів з великою провідністю (діаметром менше 100 мм). Їх конструкції аналогічні конструкціям водопровідних кранів, вони можуть перебувати не тільки у двох крайніх станах (закритому і відкритому), а й певною мірою регулювати надходження газу у вакуумну систему. У системах, які не прогриваються в затворах, застосовуються гумові або фторопластові ущільнювачі (рис. 1.7, а). Оскільки запірні зусилля при використанні таких ущільнювачів порівняно невеликі, то такі вентилялі мають ручні, електромеханічні та електромагнітні приводи. В останніх запірне зусилля створюється пружиною, а утримання клапана у відкритому стані – електромагнітом. Використання електромеханічних та електромагнітних приводів дозволяє автоматизувати вакуумні установки.

У надвисоковакуумних системах застосовуються вентилялі, у яких запирання здійснюється внаслідок пластичної деформації металевго (нікель, мідь, алюміній) конуса (рис. 1.7, б).

У вентилях з металевим конусом для його деформації необхідні досить значні зусилля. Такі вентилялі найчастіше мають ручний привід з використанням гвинтової пари (вал – фланець). Герметизація валу від атмосфери здійснюється за допомогою сільфона. Вал обертається штурвалом або спеціальним ключем. Схематичні зображення вентилів з герметизацією за допомогою сільфону та ручним приводом подані на рис. 1.8.

Натікачі та дозувальні вентилялі використовуються для плавного напуску невеликої кількості газу у вакуумні установки.

Для реалізації таких пристроїв існує кілька способів: використання пористих матеріалів, проникних для окремих газів, наприклад,

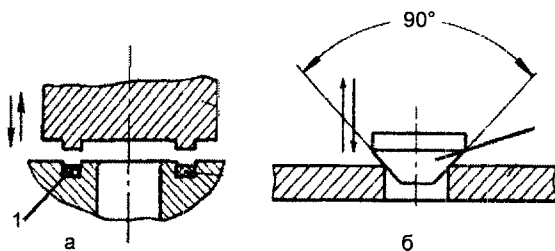


Рис. 1.7. Робочі елементи вентилів з гумовим ущільнювачем (а) та металевим конусним ущільнювачем (б): 1 – гума, фторопласт; 2 – металевий конус

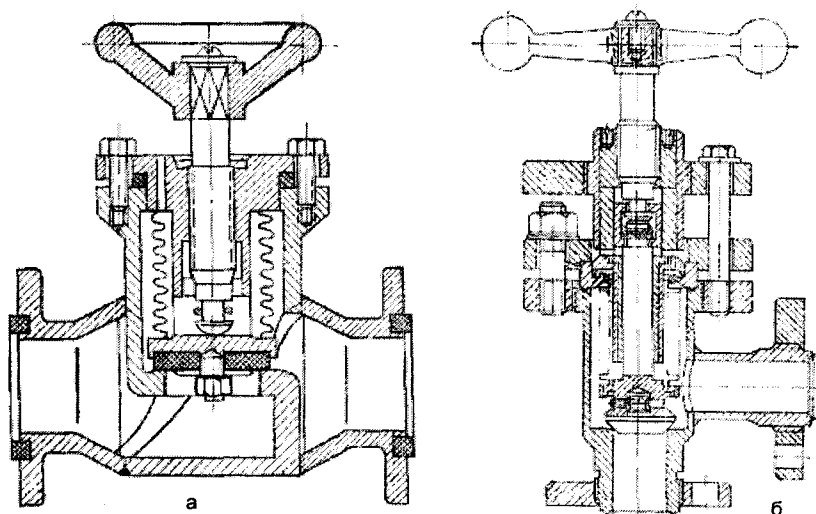


Рис. 1.7. Схематичні зображення вентилів з ручним приводом:
 а – високовакуумний прямий вентиль з гумовим ущільнювачем;
 б – надвисоковакуумний кутовий вентиль з мідним конусом

платини для водню, срібла для кисню тощо. У натікачах (дозувальних вентилях) для газових сумішей найчастіше використовується мікрометричне переміщення сталльної конічної голки у вузькому каналі (сідлі). Схематичне зображення такого вентиля та його зовнішній вигляд у розібраному стані наведені на рис. 1.9.

Голку й сідло виготовляють з високою точністю, а їх поверхні виконують з високою чистотою обробки. Мікрометричне поступальне переміщення голки здійснюється за допомогою диференціальної різьби. При обертанні рукою штурвала закріпленого на валу вентиля здійснюється мікрометричне переміщення голки. За такого переміщення голки змінюється величина кільцевого зазору між голкою й сідлом, що й зумовлює зміну провідності вентиля.

У системах з автоматичним напуском газів використовуються дозувальні вентиля, голка яких здійснює мікрометричні переміщення внаслідок зміни розмірів керамічної шайби, до якої вона прикріпле-

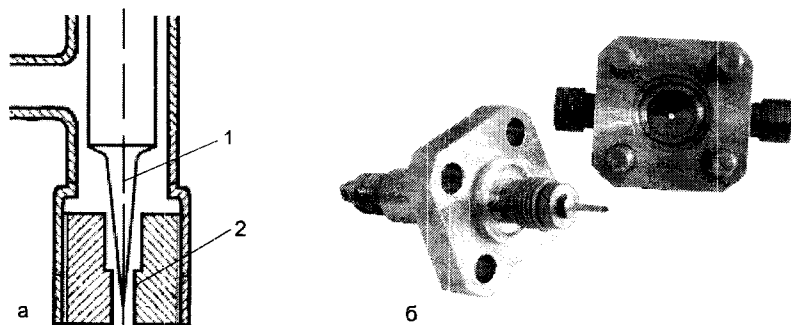


Рис. 1.8. Схематичне зображення робочих елементів (а) та зовнішній вигляд (б) дозуючого голчатого вентиля у розібраному стані: 1 – голка; 2 – сідло

на. Шайба виготовляється зі спеціальної п'єзокераміки, яка змінює свої лінійні розміри під дією прикладеної до неї високої напруги в 1–3 кВ (явище електрострикції).

Електричні вакуумні струмовводи слугують для передавання у вакуум електричного струму та напруги для живлення різних пристроїв (нагрівників, електронних гармат, відхильних електродів тощо). Їх конструкції розрізняються залежно від величини вакууму, напруги, сили та частоти струму. Як ізолятори використовуються гума або фторопласт (вакуумні системи без прогрівання) та скло або кераміка (надвисоковакуумні системи). На рис. 1.9–1.11 схематично зображені конструкції широковживаних струмовводів.

Струмовводи для великих струмів (100 А і більше) необхідно охолоджувати. У більшості випадків для охолодження стрижня струмопроводу використовується проточна вода. Конструктивно такі струмопроводи є найбільш складними, бо одночасно потрібно забезпечувати вакуумну герметичність, а також електро- та гідроізоляцію стрижня струмопроводу.

За невеликих струмів (до 10 А) досить надійними й зручними в користуванні є скляні струмовводи різних конструкцій, схематично зображені на рис. 1.11. Зовнішній вигляд деяких скляних струмовводів поданий на рис. 1.3.

Пристрій для передавання рухів у вакуумній об'єм залежно від конструкції ущільнювального елемента бувають із сальниковими

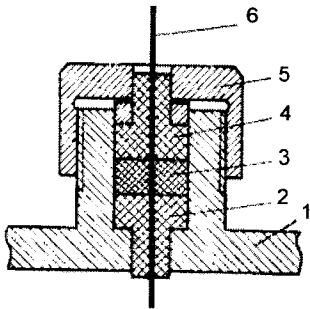


Рис. 1.9. Струміввід для вакуумних систем без прогрівання:
1 – корпус; 2 – ущільнювальні втулки; 3 – ізолятор; 5 – накидна гайка; 6 – струмопровідний стрижень

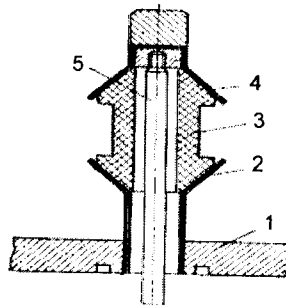


Рис. 1.10. Високовольтний керамічний струміввід для надвисоковакуумних систем: 1 – корпус; 2, 4 – металеві ковпачки; 3 – керамічний ізолятор; 5 – струмопровідний стрижень

ущільнювальними елементами (сальники) та гнучкими ущільнювальними елементами. Передавання рухів може здійснюватися також через нерухому перегородку за допомогою магнітних полів.

Сальникові ущільнення (рис. 1.12) використовуються для передавання поступальних і обертальних рухів у системах низького й середнього вакууму. Вони забезпечують передавання значних моментів і зусиль, але з малими швидкостями. Вал (1) (рис. 1.12) ущільнюється в обоймі (2) гумовою прокладкою спеціальної форми (сальник Вільсона) (3) за допомогою гайки (4) і металевого кільця (5). Для зменшення

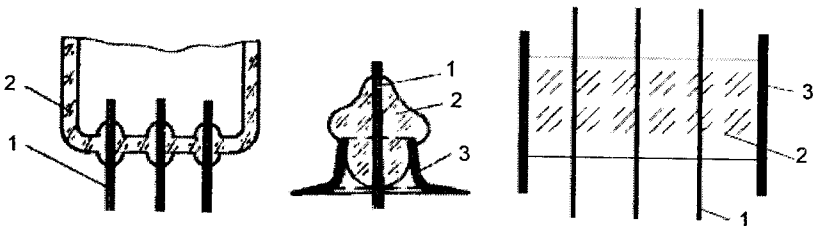


Рис. 1.11. Різні варіанти вирішення скляних вакуумних струмоводів:
1 – металевий штир; 2 – скло; 3 – відрізок коварової трубки

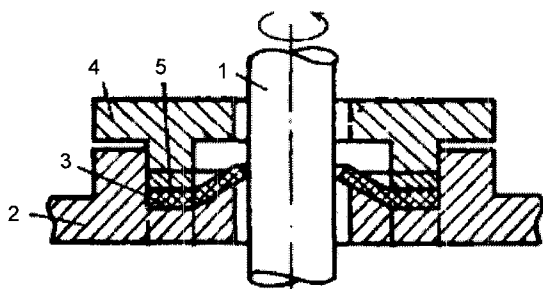


Рис. 1.12. Схема передавання обертального руху у вакуум за допомогою сальника Вільсона: 1 – вал; 2 – обойма; 3 – сальник Вільсона; 4 – гайка; 5 – металеве кільце

468454
тертя між гумовою прокладкою і валом використовуються спеціальні вакуумні мастила, що не дозволяє застосовувати сальникові ущільнення в умовах високого й надвисокого вакууму.

На рис. 1.15 зображено конструкцію пристрою для передавання у вакуум поступального руху за допомогою сільфона. Обертальний рух стрижня з різьбою (1) перетворюється в поступальний рух виконавчого елемента (2). Герметизація вузла здійснюється за допомогою металевого сільфона (3).

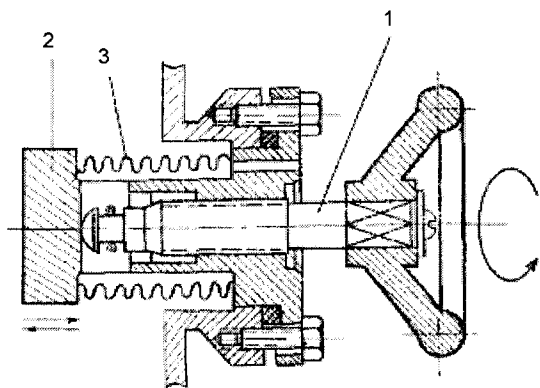


Рис. 1.13. Схема передавання поступального руху у вакуум за допомогою металевого сільфона: 1 – стрижень з різьбою, який обертається навколо своєї осі; 2 – виконавчий елемент, що рухається поступально; 3 – металевий сільфон

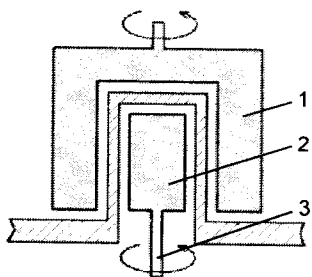


Рис. 1.14. Схема передавання руху у вакуум за допомогою магнітів:
1 – зовнішній магніт; 2 – внутрішній магніт;
3 – виконавчий вал

Така конструкція забезпечує передавання значних зусиль за невеликих швидкостей і широко використовується в розглянутих вентилях (рис. 1.8).

Передавання рухів у вакуум із застосуванням магнітів може бути використане в установках з будь-яким розрідженням. При цьому забезпечуються великі швидкості рухів з малими зусиллями. Принципова схема конструкції такого пристрою зрозуміла з рис. 1.14. Зовнішній магніт (1) через герметичну суцільну немагнітну стінку діє на внутрішній магніт (або феромагнітну деталь) (2), який жорстко зв'язаний з виконавчим валом (3) (обертання) або стрижнем (поступальний рух), який дублює рух зовнішнього магніту.

Наведені приклади далеко не вичерпують усі можливі конструкції передавальних вузлів. Для передавання комбінованих (поступальний + обертальний, поступальний + коливальний та ін.) рухів конструюються і виготовляються складні передавальні вузли відповідно до кон-

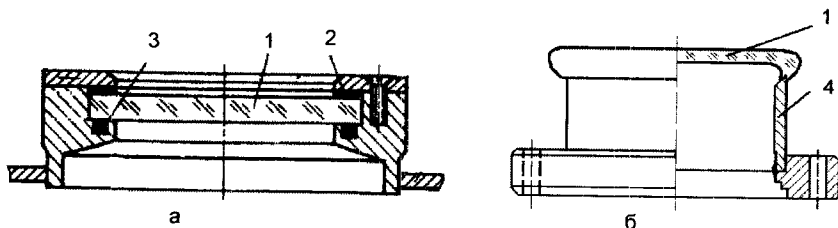


Рис. 1.15. Оглядові вікна для високого (а) та надвисокого (б) вакууму:
1 – полірований скляний диск; 2 – нажимне кільце; 3 – гумова прокладка;
4 – коваровий циліндр

кретних особливостей цих рухів (зусилля, швидкість, амплітуда коливань тощо).

Оглядові вікна (ілюмінатори) за тисків, більших ніж $5 \cdot 10^{-5}$ Па (низький, середній і високий вакуум), можуть ущільнюватися гумовими й фторопластовими прокладками (рис. 1.15, а).

Полірований скляний диск (1) завтовшки 8–10 мм за допомогою нажимного кільця (2) ущільнюється через прокладку (3). Ілюмінатори надвисоковакуумних установок (рис. 1.15, б; рис. 1.3, а) виготовляються спаюванням скла з металом. До коварового циліндра з одного боку приварюється фланець, а з другого – скляний диск. Оскільки на скляний диск у надвисоковакуумних установках діє тільки сила атмосферного тиску, то його товщина становить 2–4 мм, а не 8–10 мм.

Зміст роботи

1. Ознайомитися з конструкціями запропонованих елементів вакуумних систем. Виконати ескіз елементів.
2. Описати конструкцію одного з елементів вакуумних систем, роботу передавального механізму і приводу (за вибором викладача).

Зміст звіту

1. Ескізи вивчених елементів вакуумних систем.
2. Опис конструкції елемента вакуумної системи та його роботи.

Запитання для самоконтролю

1. З яких основних конструктивних елементів складається вакуумна установка?
2. Які основні вимоги висуваються до розбірних і нерозбірних з'єднань?
3. Чим обумовлені і в чому полягають відмінності в конструкціях розбірних з'єднань для високовакуумних і надвисоковакуумних систем?
4. Охарактеризуйте класифікацію вакуумних затворів й особливості їх конструкцій.
5. Опишіть конструкцію струмовводів для установок високого і надвисокого вакууму. Назвіть основні конструктивні відмінності в їх будові.

6. Опишіть конструкцію ілюмінаторів для установок високого і надвисокого вакууму. Назвіть основні конструктивні відмінності в їх будові.
7. Наведіть приклади різних пристроїв для передавання рухів у вакуум.
8. Запропонуйте схему для передавання у вакуум коливального руху.

Література: [1, 4–7].

Прилади для вимірювання форвакууму, високого та надвисокого вакууму

Мета роботи: ознайомитися з методами та основними приладами для вимірювання низького та високого вакууму.

Обладнання: вакуумметр ВІТ-2 (ВІТ-2А, ВІТ-2П) у комплекті з манометричними перетворювачами ПМТ-2 (ПМТ-4) та ПМІ-2; вакуумметр ВМБ-14 у комплекті з манометричним перетворювачем ПММ-32; блок вимірювання вакууму виробництва „Selmi” у комплекті з манометричним перетворювачем МІД, вакуумметр 13ВТЗ-003 з манометричним перетворювачем ПМТ-6.

Теоретичний матеріал

Ступінь розрідження газу вимірюється в одиницях тиску. У системі СІ одиницею тиску є $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Поряд з цією одиницею досить часто користуються одиницею тиску 1 Тор (1 мм рт. ст.) – тиск, який створюється стовпчиком ртуті заввишки 1 мм. Ця одиниця була історично першою одиницею тиску. Нормальний атмосферний тиск повітря становить $P_a = 760 \text{ Тор}$. Зв'язок між цими одиницями такий:

$$1 \text{ Па} = 0,00750 \text{ Тор} \approx 10^{-2} \text{ Тор}, 1 \text{ Тор} = 133,322 \text{ Па} \approx 10^2 \text{ Па}.$$

Нормальний атмосферний тиск становить $P_a = 760 \text{ Тор} \approx 10^5 \text{ Па}$. У зарубіжній літературі часто використовується одиниця тиску 1 бар = 10^5 Па та 1 мілібар (1 мбар = $10^2 \text{ Па} \approx 1 \text{ Тор}$). Діапазон тисків у сучасній вакуумній техніці надзвичайно широкий – від 10^5 Па (760 Тор) і до 10^{-12} Па (10^{-14} Тор) – тобто близько 17 порядків.

Прилади для вимірювання загальних тисків у вакуумній техніці називаються вакуумметрами. На жаль, перекрити такий широкий

діапазон тисків вакуумметром одного типу неможливо. Різні його ділянки перекриваються вакуумметрами, що використовують різні принципи роботи.

Усі вакуумметри можна поділити на дві групи – абсолютні й відносні. Покази абсолютних вакуумметрів не залежать від роду газу, вони є функцією тиску, який безпосередньо діє на поверхню вимірювального елемента вакуумметра. У приладах для відносних вимірювань використовується залежність характеристик (параметрів) деяких фізичних явищ, що відбуваються у вакуумі, від величини тиску. Такі прилади необхідно попередньо градуувати, використовуючи зразкові вакуумметри. Вакуумметр вибирають залежно від діапазону тисків вакуумної установки та вимог до точності вимірювань. Серійні промислові прилади мають похибку 20–200%, а зразкові 5–10%. Важливими якостями при цьому також є чутливість, надійність, інерційність, можливість автоматизації вимірювань тощо.

Вакуумметри, які використовуються в цій лабораторній роботі конструктивно складаються з двох частин – манометричного перетворювача (датчика) і вимірювального блоку. Вони є відносними вакуумметрами. У манометричному перетворювачі генерується електричний струм, величина якого залежить від перебігу певного фізичного процесу (теплопровідність, електропровідність) у вакуумі. Манометричний перетворювач безпосередньо вмонтовується у вакуумну систему. У вимірювальному блоці генерований перетворювачем електричний струм вимірюється (за необхідності попередньо підсилюється) і за його величиною встановлюється ступінь розрідження (величина вакууму) у вакуумній системі.

У сучасній вакуумній техніці найбільш широко використовуються теплові та іонізаційні манометричні перетворювачі.

Теплові перетворювачі були запропоновані у 1906 році Пірані (манометри Пірані) й використовуються для вимірювання тисків у діапазоні 10^3 – 10^{-1} Па (10 – 10^{-3} Тор). Їх робота ґрунтується на залежності теплопровідності газу від тиску. Датчик теплового вакуумметра (рис. 2.1) являє собою скляну або металеву циліндричну колбу діаметром D . У центрі колби вздовж її вісі натягнута тонка металева дротина діаметром d , яку нагрівають, пропускаючи по ній електричний струм I . При підведенні до дротини постійної електричної потужності $Q_{\text{ел}} = I^2 R_q$, де (R_q – опір дротини) її температура буде залежати від тис-

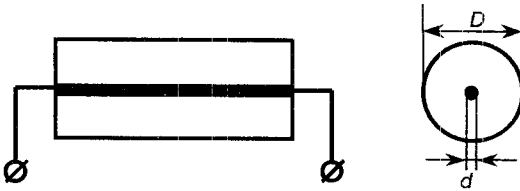


Рис. 2.1. Датчик Пірані

ку газу в колбі. Для стаціонарного стану й сталої температури дротини рівняння теплового балансу матиме вид:

$$Q_{ел} = Q_k + Q_{\sigma} + Q_m, \quad (2.1)$$

де Q_k – потужність, що відводиться від дротини через конструктивні елементи датчика (вузли кріплення дротини);

Q_{σ} – потужність, що відводиться з поверхні дротини випромінюванням;

Q_m – потужність, що відводиться від дротини газовими молекулами, які бомбардують її поверхню.

В умовах високого вакууму коефіцієнт теплопровідності газу пропорційний тиску газу. Тому в рівнянні (2.1) тільки величина Q_m залежить від тиску газу в колбі перетворювача й зменшується (унаслідок зменшення тепловіддачі молекулам газу) при зменшенні тиску газу. Таким чином, вимірявши температуру дротини, можна проградувати манометричний перетворювач в одиницях тиску газу.

Оскільки температура дротини залежатиме від тиску газу лише тоді, коли в колбі буде високий вакуум, тобто коли $\lambda \gg d$, де d – деякий характерний розмір посудини, у якій створено вакуум; λ – середня довжина вільного пробігу газових молекул. На перший погляд здається, що під d потрібно розуміти діаметр колби перетворювача D (рис. 2.1). Але детальний розгляд молекулярного механізму теплопровідності газу в перетворювачі дозволяє дійти висновку, що під цим характерним розміром слід розуміти діаметр тепловидільної дротини d за умови, коли $d \ll D$. Таким чином, умовою працездатності теплового датчика Пірані є умова $\lambda \gg d$, де d – діаметр тепловидільної дротини. При $\lambda \ll d$ (низький вакуум) коефіцієнт теплопровідності газу не залежить від його тиску, і, відповідно, температура дротини не змінюється в разі зміни тиску газу в датчику.

Сучасні технології волочіння дротів дозволяють виготовляти їх діаметром близько 1 мкм ($1 \cdot 10^{-3}$ мм), проте такі дроти дуже складно закріплювати в колбі датчика, а тому в датчиках використовуються дроти діаметром 10–12 мкм. Таким чином, верхня межа вимірювань тиску тепловим манометром з такою дротиною ($\lambda \approx d = 10$ мкм) становить близько 1000 Па (10 Тор), оскільки $\lambda \sim \frac{1}{P}$. Нижня межа вимірювань тиску тепловими манометрами (коли $\lambda \gg d$) визначається з рівняння (1) у такий спосіб. Оскільки Q_k визначається конструкцією датчика, то для даного датчика вона є величиною сталою. Величина Q_s для дротини становить

$$Q_s = \sigma S T_q^4, \quad (2.2)$$

σ – стала Стефана – Больцмана;

S – площа поверхні дротини;

T_q – температура поверхні дротини

і залежить тільки від температури дротини.

При зменшенні тиску газу в колбі датчика відведення теплоти від дротини молекулами газу зменшується, і величина Q_m може стати дуже малою порівняно з $Q_k + Q_s$:

$$Q_m \ll Q_k + Q_s, \quad (2.3)$$

а це означає, що при такому (і кращому) розрідженні величина Q_m перестає впливати на температуру дротини.

Отже, нижня межа вимірювань тиску (P_{\min}) тепловим манометром визначається умовою (2.3) – за такої величини струму, що протікає через дротину, її температура не змінюється зі зміною тиску газу в датчику.

Для зменшення нижньої межі вимірювань тиску газу (розширення діапазону вимірювань у бік більш низького тиску) потрібно зменшити Q_s . За незмінних розмірів тепловидільної дротини це можна зробити лише, якщо знизити температуру дротини T_q (формула (2.2)). Проте зниження T_q призводить до зниження чутливості датчика. Компромід досягається за $T_q = 200\text{--}300$ °С, при цьому нижня межа тисків для теплових вакуумметрів становить 10^{-1} Па (10^{-3} Тор).

Показання теплових вакуумметрів залежать від роду газу, що заповнює колбу перетворювача, оскільки коефіцієнт молекулярної теп-

лопровідності газу залежить від його молярної маси. Як правило, вакуумметр градується підприємством, що його виготовляє, для повітря або для азоту. Для вимірювання тиску інших газів користуються співвідношенням

$$P_c = \kappa_c P_n, \quad (2.4)$$

де P_c – тиск газу;

P_n – тиск повітря (показання вакуумметра);

κ_c – коефіцієнт чутливості датчика для даного газу.

Значення κ_c встановлюються експериментально і наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Значення коефіцієнтів чутливості для різних газів

Газ	Повітря	H ₂	He	Ne	N ₂	CH ₄	Ar	CO ₂
κ_c	1,00	0,67	1,12	1,31	1,00	0,61	1,56	0,94

За способом вимірювання температури тепловидільної дротини перетворювача теплові вакуумметри поділяються на два типи: вакуумметри опору і термопарні вакуумметри. У вакуумметрах опору використовується залежність опору дротини датчика від її температури, сама дротина датчика виконує дві функції – джерела теплоти й вимірювача температури, оскільки при нагріванні металевого провідника його опір R_q залежить від температури

$$R_q = R_0(1 + \alpha \Delta T), \quad (2.5)$$

де R_0 – опір провідника за температури 0 °C (T_0);

α – термічний коефіцієнт опору;

$\Delta T = T - T_0$;

T – температура провідника з опором R_q .

У термопарних вакуумметрах температура тепловидільної дротини датчика вимірюється за допомогою термопарі, прикріпленої до неї.

Вакуумметри опору представлені в лабораторній роботі вакуумметром ІЗВТЗ-003 з манометричним перетворювачем ПМТ-6-3. Зовнішній вигляд вакуумметра подано на рис. 2.2, схематичне зображення перетворювача ПМТ-6-3 та принципову електричну схему для вимірювання опору – на рис. 2.3.

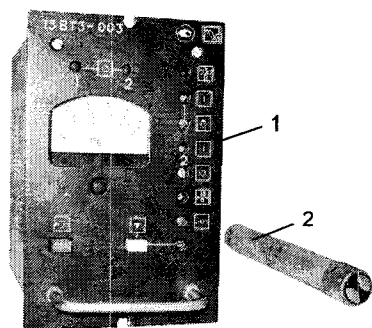


Рис. 2.2. Тепловий вакуумметр 13VT3-003 з перетворювачем ПМТ-6-3:
1 – вимірювальний блок;
2 – манометричний перетворювач

Колба датчика ПМТ-6-3 (рис. 2.3, а) є відрізком тонкостінної металевої трубки (2) діаметром 18 мм і завдовжки 175 мм. З одного боку трубка відкрита і приєднується до вакуумної системи. З другого боку трубка має герметичний цоколь з двома струмовводами (4) для приєднування його до вимірювального блоку. По центру трубки натягнута платинова тепловидільна дротина (3) діаметром 0,012 мм (12 мкм) завдовжки 80 мм та опором $R = 72 \pm 4,5 \text{ Ом}$ за $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Класичною схемою для вимірювання опору дротини R_q є мостова схема Уїнстона (рис. 2.3, б) одним з плечей якої є тепловидільна дротина датчика. Дротина з опором R_q нагрівається струмом від джерела.

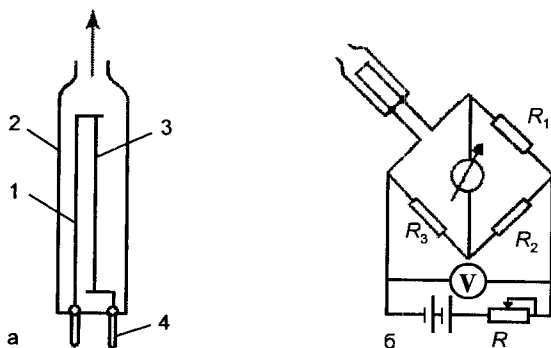


Рис. 2.3. Тепловий манометричний перетворювача опору ПМТ-6-3 (а) та принципова схема (б) вимірювання електричного опору дротини перетворювача:
1 – опора; 2 – корпус; 3 – платинова тепловидільна дротина; 4 – струмоввід

Опори R_2 і R_3 рівні між собою, а опір R_1 може змінюватися. Методика проведення вимірювань передбачає: відкачування датчика до високого вакууму (порядку 10^{-4} Па) і шляхом зміни величини опору R_1 урівноваження мосту. За такого розрідження виконується умова (2.2), і температура, а відповідно й опір дротини R_q , будуть максимальними. У разі збільшення тиску в датчику величина Q_m починає зростати, температура дротини зменшується, рівновага моста порушується (гальванометр G покаже наявність струму). Міст можна знову врівноважити, підвищивши температуру дротини збільшенням напруги живлення моста. За нової рівноваги моста опір розігрітої дротини, а відповідно і її температура, знову набудуть початкових значень.

За різних значень тиску газу P у датчику баланс моста матиме місце за різних значень напруги живлення моста U , яка вимірюється вольтметром, що дозволяє проградувати прилад.

На рис. 2.4 наведена градуовальна крива перетворювача ПМТ-6-3.

На передній панелі вакуумметра 13ВТЗ-003 (рис. 2.2) розташований вольтметр, який вимірює величину напруги живлення моста U . Для зручності шкала вольтметра відповідно до градуовальної кривої (рис. 2.4) оцифрована в одиницях тиску. У приладі 13ВТЗ-003 балансування моста відбувається автоматично (за допомогою сучасної електронної схеми), завдяки чому користування таким приладом є дуже простим і зручним. Крім цього, електронна схема вакуумметра має два незалежних канали для вмикання й вимикання виконавчих пристроїв (наприклад, форнасоса) для автоматичного підтримування тиску в діапазоні $1,3-3,9 \cdot 10^3$ Па.

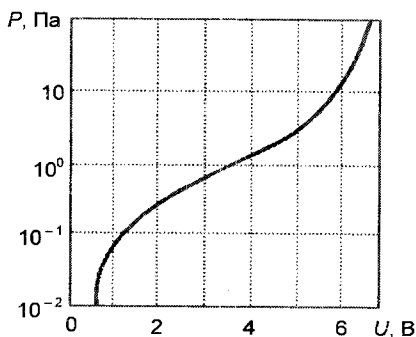


Рис. 2.4. Градуовальна крива манометричного перетворювача ПМТ-6-3 (для сухого повітря)

На точність вимірювання вакууму тепловими перетворювачами Пірані значно впливають коливання температури балона перетворювача. У сучасних перетворювачах цей недолік частково усувається завдяки дзеркальному покриттю стінок колби перетворювача. Таке покриття суттєво знижує й теплові витрати на випромінювання, у результаті чого підвищується чутливість перетворювача й розширюється діапазон його вимірювань до 10^{-3} – 10 Па (10^{-5} – 10^{-1} Тор). Таке покриття було використане в конструкції датчика ПМТ-16.

Термопарні вакуумметри представлені в лабораторній роботі комбінованими приладами ВІТ-2 (ВІТ-2А, ВІТ-2П, ВІТ-3) та чисто термопарним вакуумметром ВТ-2А.

У цих приладах для вимірювання температури тепловидільної дротини датчика використовується термопара, прикріплена до дротини. Термо-ЕРС термопарні залежить від різниці температур дротини T_d і балона датчика T_b . Дротина датчика є тільки джерелом теплоти Q_{el} (формула (2.1)).

Термопарні датчики випускаються у двох модифікаціях: ПМТ-2 та ПМТ-4М. Перетворювач манометричний термопарний ПМТ-2 має скляний балон (корпус), а ПМТ-4М – металевий з коваровою трубкою.

Зовнішній вигляд комбінованого вакуумметра ВІТ-2 з перетворювачами ПМТ-2 та ПМІ-2 поданий на рис. 2.5.

Вимірювальний блок (1) комбінованого вакуумметра ВІТ-2 (та йому аналогічних) складаються з двох незалежних електронних бло-

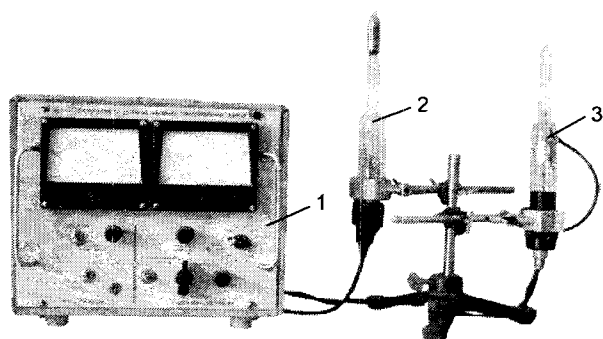


Рис. 2.5. Комбінований вакуумметр ВІТ-2: 1 – вимірювальний електронний блок; 2 – ПМТ-2; 3 – ПМІ-2

ків – лівий призначений для роботи з термопарними датчиками, а правий – для роботи з іонізаційними високовакуумними датчиками.

Вакуумметр ВТ-2А має тільки термопарну частину.

Манометричних перетворювачі ПМТ-2 та ПМТ-4М (рис. 2.6) за своєю внутрішньою будовою схожі: вони мають тепловидільну дротину з платини (ПМТ-2) або з нікелю (ПМТ-4М) і термопару (хромель-копель у ПМТ-2 та хромель-алюмель у ПМТ-4М), прикріплену до тепловидільної дротини. Балон ПМТ-4М металевий, відкритий, з ковровою приєднувальною трубкою, а балон ПМТ-2 скляний, герметично запаяний і відкачаний до розрідження не гірше ніж 10^{-2} Па (10^{-4} Тор).

Термопарні перетворювачі можуть працювати у двох режимах – постійного струму розжарення тепловидільної дротини або в режимі постійної температури тепловидільної дротини (ПМТ-2).

Схематично термопарний перетворювач та спрощена принципова електрична схема термопарного вакуумметра подані на рис. 2.6.

Найчастіше термопарний датчик працює в режимі постійного струму розжарення тепловидільної дротини (2). Величина струму розжарення регулюється опором (5) у межах 0–150 мА й вимірюється міліамперметром.

Термо-ЕРС термопари (1) вимірюється безпосередньо мілівольтметром і змінюється в межах 0–10 мВ. Платинова тепловидільна дротина ПМТ-2 діаметром 100 мкм забезпечує кращу стабільність характеристик цього перетворювача порівняно з ПМТ-4М.

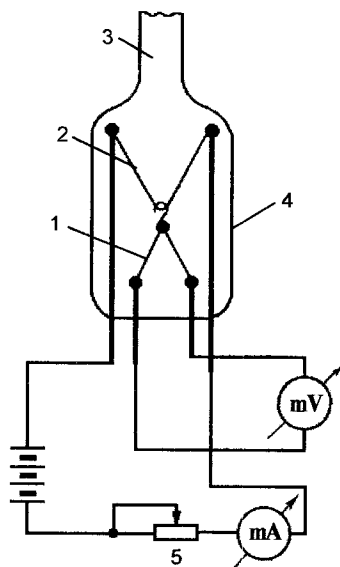


Рис. 2.6. Схема термопарного вакуумметра: 1 – термопара; 2 – тепловидільна дротина; 3 – приєднувальна трубка; 4 – колба; 5 – регулятор струму розжарення дротини

Оскільки принцип роботи термопарних перетворювачів аналогічний принципу роботи перетворювачів Пірані, то й коефіцієнти відносної чутливості для різних газів цих перетворювачів однакові (табл. 2.1).

У режимі постійного струму розжарення дробини перетворювачі мають діапазон вимірювань вакууму 10^{-1} – 10 Па (10^{-3} – 10^{-1} Тор).

Робочий струм розжарення дробини підбирається індивідуально для кожного перетворювача так, щоб термо-ЕРС термопари за тисків менших ніж 10^{-1} Па (10^{-3} Тор) була максимальною і дорівнювала 10 мВ. Значення величини струму розжарення для різних датчиків лежать у межах 90–150 мА. Оскільки ПМТ-2 герметично запааний, то перед розгерметизацією й монтажем у вакуумну систему проводять його калібрування – приєднавши нерозгерметизований датчик кабелем до вакуумметра, вмикають термопарну частину вакуумметра й підбирають такий струм розжарення тепловидільної дробини, за якого термо-ЕРС термопари становить 10 мВ. Після цього значення струму заносять у паспорт перетворювача чи в робочий зошит вакуумної установки. Робочий струм розжарення ПМТ-4М указується безпосередньо на корпусі перетворювача заводом, що його виготовляє.

Вимірювання вакууму проводиться за допомогою градуювальної кривої, поданої на рис. 2.7, яка наводиться в паспорті перетворювача.

За тисків близько 10^{-2} Па (10^{-4} Тор) показання приладу асимптотично наближаються до 10 мВ і в подальшому залишаються незмін-

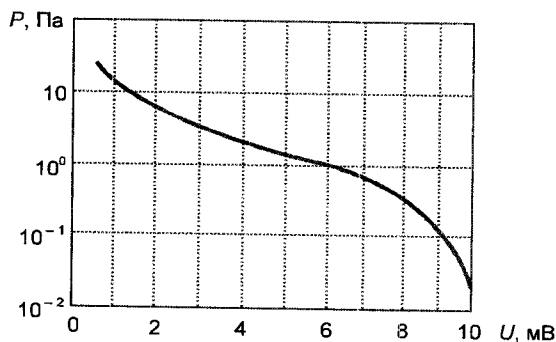


Рис. 2.7. Градувальна крива термопарного перетворювача при його роботі в режимі постійного струму

ними. Цьому стану відповідає нерівність (2.3), коли молекулярне відведення теплоти від тепловидільної дротини Q_m дуже мале. Температура дротини при цьому не залежить від тиску газу, вона максимальна й стала, а її величина визначається тільки втратами на випромінювання Q_e та теплопровідністю конструктивних елементів Q_k перетворювача.

Верхня межа тисків, які можуть бути виміряні термопарними вакуумметрами, визначається двома явищами: 1) за великих тисків порушується умова $\lambda \gg d$ (де λ – середня довжина вільного пробігу газових молекул; d – діаметр тепловидільної дротини) і теплопровідність газу перестає залежати від його тиску (аналогічно датчикам Пірані); 2) за великих тисків інтенсивне молекулярне відведення теплоти від тепловидільної дротини зменшує її температуру, а відповідно й різницю температур $T_q - T_0$ дротини й балона датчика, що призводить до втрати чутливості перетворювача. При величині струму через тепловидільну дротину близько 120 мА для ПМТ-2 верхня межа тиску становить близько 100 Па (1 Тор).

Для вимірювання більших тисків необхідно збільшити температуру тепловидільної дротини, тобто збільшити її струм розжарення. Для ПМТ-2 таким чином вдається розширити діапазон вимірювань убік високих тисків 666,6–66,66 Па ($5-5 \cdot 10^{-1}$ Тор). За таких вимірювань (режим сталої температури або сталої термо-ЕРС) калібрування перетворювача полягає в тому, що, обрізавши кінець скляного балона перетворювача (тиск повітря в ньому стане дорівнювати атмосферному P_a), необхідно розташувати його вертикально (цоколем угору) і, встановивши струм розжарення 600 мА, визначити робоче значення термо-ЕРС E_p , яке відповідає цьому струму. У разі вимірювань розрізнення за $P < P_a$, необхідно, регулюючи струм розжарення встановлювати його таким, щоб значення термо-ЕРС термопари дорівнювало E_p . Градувальна крива ПМТ-2 (залежність величини струму розжарення від тиску) міститься в паспорті датчика й наведена на рис. 2.8.

Режим сталої температури реалізується тільки за допомогою вакуумметра ВТ-2А.

Робота *іонізаційних вакуумметрів* ґрунтується на використанні явища іонізації молекул газу в манометричному перетворювачі й вимірюванні іонного струму, який залежить від тиску газу. Найбільш поширеними є два типи таких вакуумметрів.

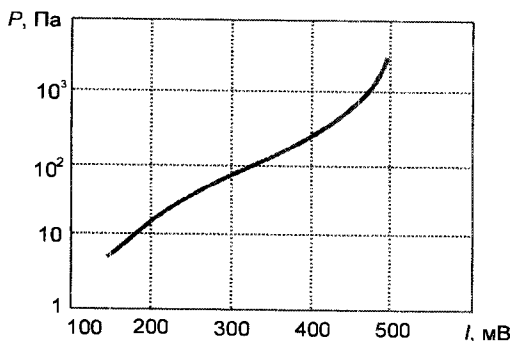


Рис .2.8. Градувальна крива ПМТ-2 у режимі сталої температури

1. Електронні іонізаційні вакуумметри. У манометричних перетворювачах цих приладів іонізація газу здійснюється потоком електронів, що емітуються розжареним катодом.

2. Магнітні іонізаційні вакуумметри. У манометричних перетворювачах цих приладів під дією схрещених електричного й магнітного полів виникає і підтримується тліючий розряд (розряд Пенінга).

У манометричних *електронних іонізаційних* перетворювачах змонтовано дві електродні системи: одна – для іонізації газових молекул, друга – для відбирання утворених іонів. В усталеному режимі роботи перетворювача швидкість утворення газових іонів дорівнює швидкості відбирання іонів й іонний струм пропорційний тиску газу.

Електронні іонізаційні вакуумметри використовуються для вимірювання тиску газу в області високого й надвисокого вакууму. Електродна система манометричного перетворювача складається з вольфрамового катода прямого розжарення, анода у вигляді рідкої сітки й колектора іонів. Конструктивно перетворювачі для високого й надвисокого вакууму дещо відрізняються, але ці три основні елементи обов'язково присутні в них.

Найпоширенішим перетворювачем для вимірювання в області високого вакууму є манометричний перетворювач ПМІ-2, конструкція якого схематично зображена на рис. 2.9, а.

Електродна система датчика зібрана в скляному балоні (1). Анод (3) у вигляді сітки розташований навколо шпилькоподібного катода (2) й має додатний потенціал відносно катода (рис. 2.9, б). Циліндри-

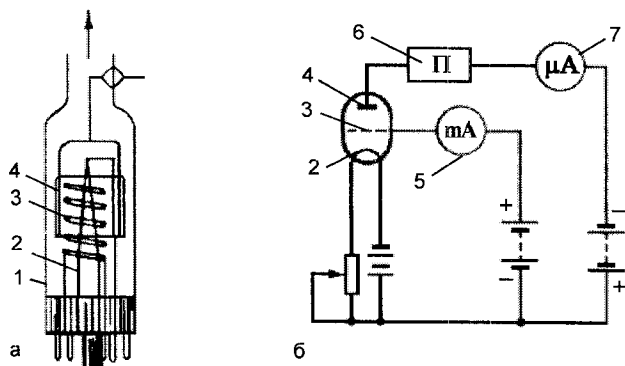


Рис. 2.9. Електронний іонізаційний датчик ПМІ-2 (а) та схема його вмикання (б): 1 – скляний балон – корпус; 2 – катод; 3 – сітка – анод; 4 – колектор; 6 – підсилювач; 5, 7 – прилади контролю струмів електронів й іонів

чний колектор іонів (4) з'єднується з входом підсилювача постійного струму (6) і має від'ємний потенціал відносно катода. Емітовані розжареним катодом електрони прискорюються анодною сіткою і, перш ніж потрапити на неї, здійснюють кілька коливань навколо її витків. Зустрічаючи на своєму шляху нейтральні атоми й молекули газу, вони їх іонізують (вибивають з них один або кілька електронів). Утворені таким чином додатні газові іони збираються колектором, створюючи в його ланцюзі іонний струм. Після підсилення іонний струм вимірюється мікроамперметром (7).

Кількість утворених іонів (іонний струм I_i) залежить від числа первинних електронів (електронний струм) і тиску газу P у перетворювачі. При сталій величині струму електронів (струму емісії електронів) іонний струм у датчику пропорційний тиску газу ($I_i \sim P$), отже, тиск газу можна визначити так:

$$P = CI_i, \tag{2.6}$$

- де I_i – іонний струм,
 C – коефіцієнт пропорційності,
 P – тиск газу.

Коефіцієнт пропорційності C називається сталою перетворювача, або чутливістю, і має розмірність Па/А (Тор/А). Таким чином, знаючи C та вимірявши іонний струм I_i , можна встановити тиск газу P .

Перетворювач манометричний іонізаційний ПМІ-2 використовується для вимірювання тиску в діапазоні $10^{-1} - 10^{-5}$ Па ($10^{-3} - 10^{-7}$ Тор). На сітку-анод подається напруга +200 В. Циліндричний колектор з потенціалом –50 В має окремий вивід на балоні перетворювача для зменшення втрат іонного струму. Струм емісії електронів стабілізується спеціальним електронним блоком і становить 0,5 мА. Стала C перетворювача ПМІ-2 для повітря дорівнює

$$C_n = (11,6 + 2,3) \cdot 10^3 \text{ Па/А або } C_n = (87 - 17) \text{ Тор/А.}$$

Для інших газів $C = C_e \cdot C_n$, де C_e – відносна чутливість для даного газу, значення якої наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Значення відносної чутливості C_e ПМІ-2 для різних газів

Газ	Сухе повітря	H ₂	He	Ne	Ar	Kr	Xe
C_e	1,00	0,47	0,18	0,25	1,31	1,98	2,71

Відмінності в значеннях величин C_e різних газів пов'язані з різною будовою електронних оболонок їх атомів й молекул і внаслідок цього – з різною кількістю утворених іонів під час іонізації атомів й молекул цих газів електронами.

Манометричний перетворювач ПМІ-2 використовується у складі комбінованого вакуумметра ВІТ-2 (та аналогічних йому) (рис. 2.5). У правій частині передньої панелі вакуумметра розташовані органи управління режимами роботи ПМІ-2 та мікроамперметр (7) (рис. 2.9, б) для вимірювання іонного струму. Діапазон вимірювань іонних струмів дуже широкий – від 10^{-4} до 10^{-9} А, а тому він розбитий на 5 піддіапазонів, кожному з яких відповідає певний діапазон тисків (табл. 2.3).

Перемикання діапазонів вимірювань іонного струму (тисків) здійснюється вручну спеціальним перемикачем – «Множник шкали». Похибка вимірювань тисків іонізаційною частиною не перевищує 30%.

З урахуванням діапазону вимірювань тисків за допомогою терморного перетворювача ПМТ-2 вакуумметр ВІТ-2 дозволяє вимірю-

Таблиця 2.3. Значення величин іонних струмів перетворювача ПМІ-2 і відповідних їм тисків газів

Множник шкали перемикача	Піддіапазон	Іонні струми, А	Тиск, Па (Тор)
1	1	10^{-5} – 10^{-4}	10^{-1} – 1 (10^{-3} – 10^{-2})
10^{-1}	2	10^{-6} – 10^{-5}	10^{-2} – 10^{-1} (10^{-4} – 10^{-3})
10^{-2}	3	10^{-7} – 10^{-6}	10^{-3} – 10^{-2} (10^{-5} – 10^{-4})
10^{-3}	4	10^{-8} – 10^{-7}	10^{-4} – 10^{-3} (10^{-6} – 10^{-5})
10^{-4}	5	10^{-9} – 10^{-8}	10^{-5} – 10^{-4} (10^{-7} – 10^{-6})

вати тиски газів у межах 20 – $1 \cdot 10^{-5}$ Па ($2 \cdot 10^{-1}$ – $1 \cdot 10^{-7}$ Тор), що робить його досить зручним у користуванні.

При експлуатації електричних іонізаційних вакуумметрів необхідно пам'ятати, що манометричний перетворювач ПМІ-2 має відкачні властивості (являє собою мініатюрний іонний насос). Відкачування газу перетворювачем пояснюється сорбцією газових іонів на електродах перетворювача. Для датчика ПМІ-2 швидкість іонного відкачування становить близько $0,01$ л/с.

Верхня межа вимірювань тиску електронним іонізаційним вакуумметром обумовлена двома причинами. По-перше, строк служби розжареного вольфрамового катода ПМІ-2 при $P < 10^{-1}$ Па (10^{-3} Тор) дуже малий, катод швидко розпиляється (перегорає). По-друге, при таких тисках порушується лінійна залежність іонного струму від тиску газу, оскільки суттєву роль при іонізації газових молекул починають відігравати й вторинні (вибиті з атома чи молекули) електрони, кількість яких неконтрольовано змінюється. Строк служби ПМІ-2 суттєво залежить від величини тиску газу в перетворювачі (катод урешті-решт перегорає, перетворювач виходить з ладу і не може бути відновленим).

Протягом останніх десятиліть був розроблений манометричний перетворювач ПМІ-3-2, електродна схема якого аналогічна ПМІ-2, але вона змонтована на фланці з нержавіючої сталі. ПМІ-3-2 не має скляного балона і приєднується до вакуумної системи через металеву ущільнювальну прокладку. У ПМІ-3-2 використовується більш стійкий іридієвий катод з окисно-ітрієвим покриттям. Такий катод не перегорає навіть у разі короткочасної роботи за атмосферного тиску.

Існують також манометричні перетворювачі (ПМІ-27), катоди у яких після їх перегорання можна замінити на нові.

Нижня межа вимірюваних тисків визначається фоновим струмом у ланцюзі колектора. Поява цього струму обумовлена тим, що електрони, які бомбардують анодну сітку, викликають появу з неї м'якого рентгенівського гальмівного випромінювання. Енергія цих рентгенівських фотонів невелика (потенціал анодної сітки лише +200 В), але цілком достатня, щоб, потрапляючи на колектор, вони спричинили фотоемісію електронів з нього. Струм фотоелектронів I_ϕ з колектора має той самий знак, що й струм додатних газових іонів I_i , що падають на колектор, але струм I_ϕ не залежить від тиску газу. При зменшенні тиску газу струм I_i зменшується. Коли I_i стає меншим за I_ϕ , подальше зниження тиску газу в перетворювачі не змінює величини струму вимірюваного вакуумметром. Оскільки колектор ПМІ-2 виготовлений у вигляді циліндра, який охоплює всю електродну систему перетворювача, то він перехоплює практично все рентгенівське випромінювання анодної сітки і нижня межа вимірюваних тисків ПМІ-2 становить $3 \cdot 10^{-6}$ Па ($2 \cdot 10^{-8}$ Тор).

Існують перетворювачі, у яких фоновий струм суттєво знижений, і завдяки цьому їх можна використовувати для вимірювання тиску в надвисоковакуумному діапазоні $P < 10^{-5}$ Па (10^{-7} Тор). Найбільш вдалим є перетворювач Баярда – Альперта, де колектор іонів у вигляді тонкої дротини розташований уздовж вісі анодної сітки, а катод – за анодною сіткою (порівняно з ПМІ-2 катод і колектор ніби помінялися місцями). Оскільки колектор у вигляді тонкої дротини перехоплює незначну кількість рентгенівських фотонів, то й струм фотоелектронів I_ϕ з колектора є дуже малим порівняно з іонним струмом I_i . Отже, за допомогою перетворювача Баярда – Альперта вдається вимірювати тиски газу набагато менші, ніж за допомогою перетворювача ПМІ-2. Саме таку конструкцію має перетворювач ПМІ-27 (та йому подібні), що дозволяє проводити вимірювання тиску близько $1 \cdot 10^{-8}$ Па ($1 \cdot 10^{-10}$ Тор). Аналогічну конструкцію має перетворювач ПМІ-39, у якому завдяки ще й модуляції іонного струму вдається вимірювати тиски до 10^{-9} Па (10^{-11} Тор). Вимірювання ще більш низьких тисків (близько 10^{-11} Па (10^{-13} Тор)) можливе лише за умови, що колектор іонів повністю екранований від рентгенівського випромінювання анода перетворювача. Існують більш складні конструкції перетворювачів (Редхеда, орбі-

тронний, Хальмера, Лафферті), які дозволяють проводити вимірювання тиску близько 10^{-12} Па (10^{-14} Тор).

Магнітні іонізаційні вакуумметри позбавлені основного ненадійного елемента електронних іонізаційних вакуумметрів – розжареного катода, а тому термін їх служби практично необмежений, а конструкція дуже проста.

Електродна схема магнітного манометричного перетворювача складається з двох металевих холодних електродів – анода (А) і катода (К), між якими прикладена висока напруга $U = 2-6$ кВ. Електроди розташовані у зовнішньому магнітному полі з індукцією $B \approx 0,1$ Тл, яке створюється постійними магнітами і орієнтоване перпендикулярно електричному полю між анодом і катодом. За певних вакуумних умов між електродами виникає самостійний тліючий розряд, який був детально вивчений Пеннінгом, тому такі перетворювачі називаються магніто-розрядними перетворювачами Пеннінга. Величина іонного струму розряду в перетворювачі пропорційна тиску газу, а тому в разі вимірювання іонного струму можна виміряти й тиск газу в проміжку між анодом і катодом.

Існує кілька варіантів конструктивного вирішення перетворювача (рис. 2.10).

У конструкції Пеннінга (рис. 2.10, а) електричний розряд виникає між катодом (К) у формі двох пластин і анодом (А) у формі циліндричного кільця, розташованого між катодними пластинами. У магнетронному (б) та інверсно-магнетронному перетворювачах (в) анод і катод є співосними циліндрами.

Виникнення тліючого розряду в міжелектродному вакуумному проміжку цих перетворювачів обумовлене появою в ньому вільних

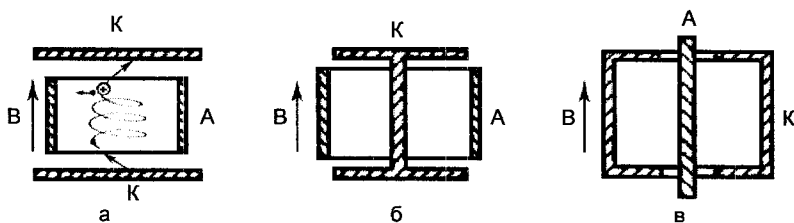


Рис. 2.10. Схеми магнітних електророзрядних перетворювачів: а – типу Пеннінга; б – магнетронного; в – інверсно-магнетронного; А – анод; К – катод

первинних електронів унаслідок якого-небудь первинного акту (іонізації нейтральних атомів і молекул газу космічним випромінюванням, холодної емісії електронів з гострих елементів катода тощо). Прискорившись у міжелектродному просторі, електрони іонізують нейтральні молекули газу, у результаті чого утворюються додатні іони і вторинні електрони (рис. 2.10, а). Останні також беруть участь в іонізації нейтральних атомів і молекул газу. Магнітне поле примушує електрони рухатися за складними просторовими траєкторіями, у результаті чого збільшується довжина їх траєкторії і ймовірність іонізації ними нейтральних газових атомів і молекул. Оскільки маси утворених іонів набагато більші за масу електрона, то траєкторії іонів слабо викривляються магнітним полем і вони рухаються до катода, створюючи в його електричному ланцюзі іонний струм. Електрони, зіткнувшись кілька разів з газовими атомами і молекулами, урешті-решт потрапляють на анод датчика, створюючи в його електричному ланцюзі електронний струм.

Унаслідок цих явищ у перетворювачі виникає тліючий газовий розряд – через проміжок між анодом і катодом проходить електричний струм розряду, а сам проміжок світиться в невисокому вакуумі.

Експериментально було встановлено, що залежність розрядного струму I_p від тиску газу P досить точно описується формулою

$$I_p = \kappa_e P^n, \quad (2.7)$$

де κ_e – деяка стала, величина якої залежить від роду газу;
 $n = 1,0-1,4$, також стала величина, що залежить від конструкції перетворювача.

Отже, знаючи сталі κ_e і n та вимірявши струм розряду I_p , можна встановити тиск газу P .

Спрощена принципова електрична схема магніторозрядного вакуумметра подана на рис. 2.11.

Баластний опір R_b обмежує величину струму через перетворювач. Це необхідне для запобігання переходу тліючого розряду в неконтрольований дуговий розряд, при якому руйнуються електроди перетворювача.

Верхня і нижня межі вимірювань тисків газів визначаються в такий спосіб.

За високих тисків у манометричному перетворювачі тліючий розряд переходить у дуговий, за якого розрядний струм не залежить від

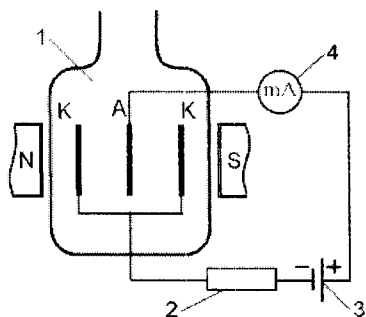


Рис. 2.11. Спрощена принципова електрична схема магніторозрядного вакуумметра: 1 – магніторозрядний манометричний перетворювач; 2 – баластний опір R_b ; 3 – джерело високої напруги 2–6 кВ; 4 – прилад для вимірювання розрядного струму I_p ; А – анод; К – катод

тиску газу і визначається величиною баластного опору R_b (опір газового проміжку при дуговому розряді близький до нуля). Зменшення R_b розширює діапазон вимірювань I_p з боку більших тисків, але при цьому виникає небезпека появи дугового розряду. Компроміс досягається за тисків 1–10 Па (10^{-2} – 10^{-1} Тор).

У разі низьких тисків утруднюється виникнення й підтримування тліючого розряду (через малу концентрацію газових молекул). Збільшення різниці потенціалів між анодом і катодом перетворювача, а також збільшення індукції магнітного поля перетворювача дещо покращують ситуацію, але при цьому зростає неконтрольований і незалежний від тиску газу фоновий струм електронів холодної емісії поблизу гострих країв катода, а також зростають габарити і маса постійних магнітів, які створюють магнітне поле датчика.

Для сучасних магніторозрядних перетворювачів нижня межа вимірюваних тисків становить $1 \cdot 10^{-11}$ Па ($1 \cdot 10^{-13}$ Тор) за різниці потенціалів між електродами 6 кВ і індукції магнітного поля 0,18 Тл. Такому тиску відповідають розрядні струми порядку 10^{-14} А, що становить певні труднощі їх надійного вимірювання.

При роботі іонізаційних манометричних перетворювачів, як електронних, так і магнітних, у вакуумних установках з дифузійними паромасляними насосами електроди перетворювачів покриваються

масляними плівками та продуктами їх крекінгу й полімеризації, які створюють ізолювальні покриття. У результаті в електронних іонізаційних перетворювачах погіршується емісійна здатність термокатоду, а в магнітних – має місце утруднення появи розряду. У всіх перетворювачів неконтрольовано змінюється чутливість.

Ідеальним є використання таких перетворювачів в установках з «безмасляним» вакуумом. У разі вимірювання в установках з «масляним» вакуумом необхідне періодичне знегажування перетворювачів прогріванням їх до високих температур. Електронні перетворювачі необхідно переводити в спеціальні режими роботи – «прогрівання» та «знегажування», а магніторозрядні – знегажувати прогріванням, за допомогою зовнішнього нагрівника.

Дана лабораторна робота передбачає знайомство студентів з двома типами магніторозрядних вакуумметрів – ВМБ-14 з перетворювачем ПММ-32-1 (рис. 2.12, а) та вакуумметром виробництва ВАТ «Selmi» з перетворювачем МІД (рис. 2.12, б), які мають приблизно однакові характеристики. Зовнішній вигляд перетворювачів разом з електронними блоками поданий на рис. 2.14 та рис. 2.15.

Перетворювач ПММ-32 (рис. 2.12, а) є перетворювачем інверсно-магнетронного типу, основними частинами якого є стрижневий анод (1), кільцевий катод (2) і фланець (3), на якому зібрана електродна схема перетворювача. Катод (2) являє собою порожнистий циліндричний магніт.

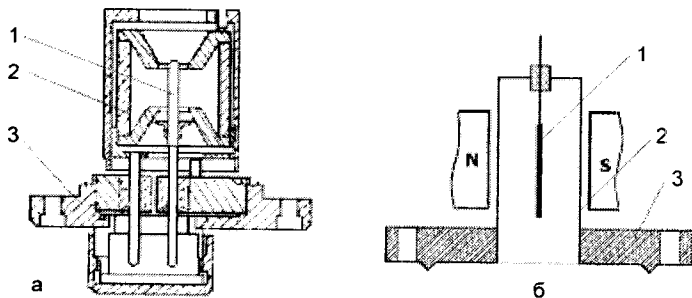


Рис. 2.12. Магніторозрядні манометричні перетворювачі ПММ-32-1 (а) та МІД (б): 1 – анод; 2 – катод; 3 – приєднувальний фланець

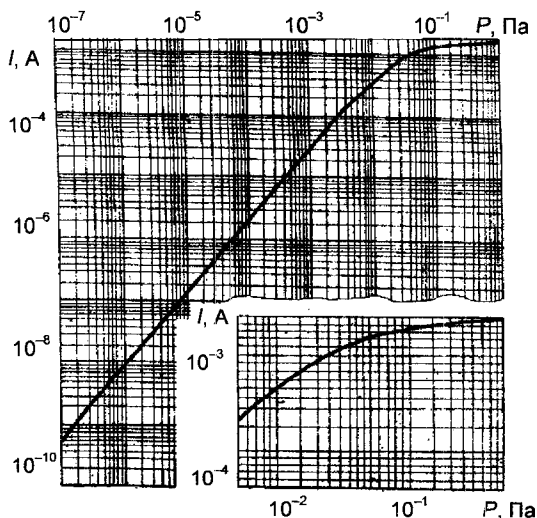


Рис. 2.13. Типова градувальна крива для повітря перетворювача ПММ-32-1

Анод (1) перетворювача типу МІД (рис. 2.12, б) виготовлений у вигляді рідкої сітки, закріпленої посередині герметичної камери (2) перетворювача, яка грає роль катода. Магнітне поле створюється за допомогою постійного магніту, який легко знімається.

Типова градувальна крива перетворювача ПММ-32-1 подана на рис. 2.13.

Перетворювач призначений для вимірювання тиску в діапазоні від $1 \cdot 10^{-7}$ до 1,3 Па (від $7,5 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ Тор) і має лінійну характеристику (рис. 2.13) майже у всьому діапазоні вимірювань тисків.

Манометричний перетворювач типу МІД має діапазон вимірювань тиску від $1 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ Па (від $1 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ Тор). Магніторозрядні перетворювачі також мають неоднакову чутливість для різних газів з тих самих причин, що й електронні.

Хід роботи

1. За заводськими інструкціями до вакуумметра ВІТ-2 (рис. 2.5) ознайомитися з порядком вмикання приладу та проведення вимірю-

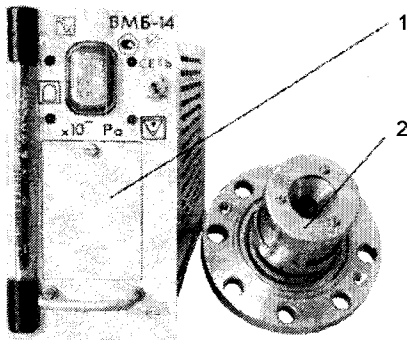


Рис. 2.14. Загальний вигляд електронного блоку вакуумметра ВМБ-14 (1) з манометричним перетворювачем ПММ-32 (2)

вань низького (манометричний перетворювач ПМТ-2) та високого (манометричний перетворювач ПМІ-2) вакууму.

2. Увімкнути прилад і виконати калібрування запаяного манометричного перетворювача ПМТ-2 (експериментально підібрати такий струм розжарення нагрівника, при якому електрорушійна сила термопари буде становити 10 мВ). Записати в зошит одержане значення струму.
3. Увімкнути прилад та провести вимірювання високого вакууму в запаяному манометричному перетворювачі ПМІ-2 (користуючись заводською інструкцією). Виконати прогрівання та знегажування манометричного перетворювача (користуючись заводською інструкцією). Після цього провести вимірювання розрідження в манометричному перетворювачі ПМТ-2 (користуючись заводською інструкцією).

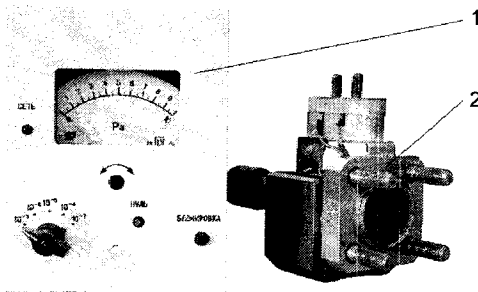


Рис. 2.15. Загальний вигляд блоку вимірювання вакууму виробництва „Selmi” (1) з манометричним перетворювачем МІД (2)

метричному перетворювачі ПМІ-2. Результати вимірювань занести до робочого зошита.

4. Увімкнути вакуумметр 13ВТЗ-003 (рис. 2.2) та виміряти форвакуум за допомогою манометричного перетворювача ПМТ-6-3. Результати вимірювань занести до робочого зошита.
5. Увімкнути вакуумметр ВМБ-14 (рис. 2.14) та виконати вимірювання високого вакууму за допомогою манометричного перетворювача ПММ-32. Результати вимірювань занести до робочого зошита.
6. Увімкнути блок вимірювання вакууму виробництва ВАТ „Selmi” (рис. 2.15) та виміряти високий вакуум за допомогою манометричного перетворювача МІД. Результати вимірювань занести до робочого зошита.

Зміст звіту

1. Ескізи конструкцій вивчених перетворювачів.
2. Основні технічні характеристики вакуумметрів, використаних у лабораторній роботі.
3. Результати вимірювань тиску та градуювань.

Запитання для самоконтролю

1. Дати визначення поняття вакууму. Які існують ступені вакууму?
2. Який принцип дії теплових вакуумметрів?
3. Чому теплові вакуумметри мають верхню і нижню межі вимірювань тисків?
4. Який принцип дії електричних іонізаційних перетворювачів?
5. Чому іонізаційні вакуумметри мають верхню і нижню межі вимірювань тисків?
6. Який принцип дії магніторозрядних перетворювачів?
7. Чому магніторозрядні вакуумметри мають верхню і нижню межі вимірювань тисків?
8. Чому теплові і іонізаційні вакуумметри мають неоднакову чутливість до різних газів?

Література: [1, 4–7].

Вивчення конструкції форвакуумного механічного насоса та одержання форвакууму

Мета роботи: ознайомитися з конструкцією та принципом роботи механічного форвакуумного насоса 2НВР-5ДМ; навчитися одержувати форвакуум за допомогою цього насоса; розрахувати ефективну швидкість відкачування насоса.

Обладнання: форвакуумний насос 2НВР-5ДМ у розібраному стані; паспорт насоса; вакуумна установка для одержання форвакууму, до складу якої входять вакуумна камера об'ємом $V = 8$ л та форвакуумний насос 2НВР-5ДМ, вакуумметр термопарний ВТ-2А з манометричними перетворювачами ПМТ-2, ПМТ-4; вакуумметр 13ВТЗ-003 з манометричним перетворювачем ПМТ-6.

Теоретичний матеріал

Загальні характеристики вакуумних насосів. Пристрої для одержання і підтримування вакууму одержали назву вакуумних насосів. Сучасна вакуумна техніка має у своєму арсеналі широкий спектр вакуумних насосів, які відрізняються принципом дії, областю вакууму, конструкцією та ін. Оскільки область тисків, доступна для сучасної вакуумної техніки, знаходиться в межах від атмосферного тиску (10^5 Па $\approx 10^3$ Тор) і до менш ніж 10^{-12} Па $\approx 10^{-14}$ Тор, що становить 17 порядків, то, як виявилось, створити такі розрідження газового середовища неможливо вакуумними насосами якогось одного типу. Усі насоси за призначенням поділяються на дві основні групи з урахуванням класифікації ступенів вакууму: низьковакуумні і високовакуумні. У середині кожної групи можна виокремити більш вузькоспеціалізовані підгру-

пи насосів – надвисоковакуумні, високовакуумні, насоси середнього і насоси низького вакууму.

Незалежно від області розрідження всі вакуумні насоси у своїй роботі реалізують два основні принципи. Перший – усунення газових молекул за межі вакуумної системи (як правило, в атмосферу), другий – зв'язування молекул газу у вакуумній системі (як правило, у самому насосі). Насоси, що використовують у своїй роботі перший принцип, називають *газопереміщувальними*. Насоси, що використовують у своїй роботі другий принцип, називають *уловлювальними (поглинальними)* насосами. Загальна класифікація вакуумних насосів наведена на рис. 3.1.

Газопереміщувальні насоси можна вважати механічними, оскільки в цих насосах газові молекули одержують механічний імпульс у певному напрямку, унаслідок чого вони залишають вакуумну систему.

Така передача імпульсу молекулам газу може здійснюватись у різні способи:

- від струменя рідини, пари чи газу, що рухається в насосі;
- від рухомих робочих частин насосу.

Отже, усі вакуумні насоси, зазначені в лівій частині рис. 3.1 (газопереміщувальні насоси), можна вважати механічними. У більш вузькому розумінні механічними (центральна частина рис. 3.1) часто називають насоси з механічним рухом деяких їх деталей (робочі поверхні). Такими робочими поверхнями, які передають імпульс газовим молекулам, є поверхні поршнів, пластин, роторів, лопаток та інші поверхні рухомих елементів насосів. Конкретні назви механічних насосів (пластинчасто-статорний, пластинчасто-роторний, турбомолекулярний та ін.) указують на основний робочий елемент насоса, який змінює імпульс газових молекул.

У поглинальних (уловлювальних) насосах газові молекули поглинаються гетером (речовина, яка зв'язує газові молекули шляхом хемосорбції), сорбентом (речовина, яка зв'язує газові молекули шляхом фізичної сорбції) або ж шляхом конденсації на охолодженій поверхні. У деяких поглинальних насосах використовується комбінація цих способів з використанням електричних і магнітних полів. Такі насоси називають фізико-хімічними.

До основних параметрів будь-якого вакуумного насоса належать швидкість дії (швидкість відкачування), граничний тиск (максимальне

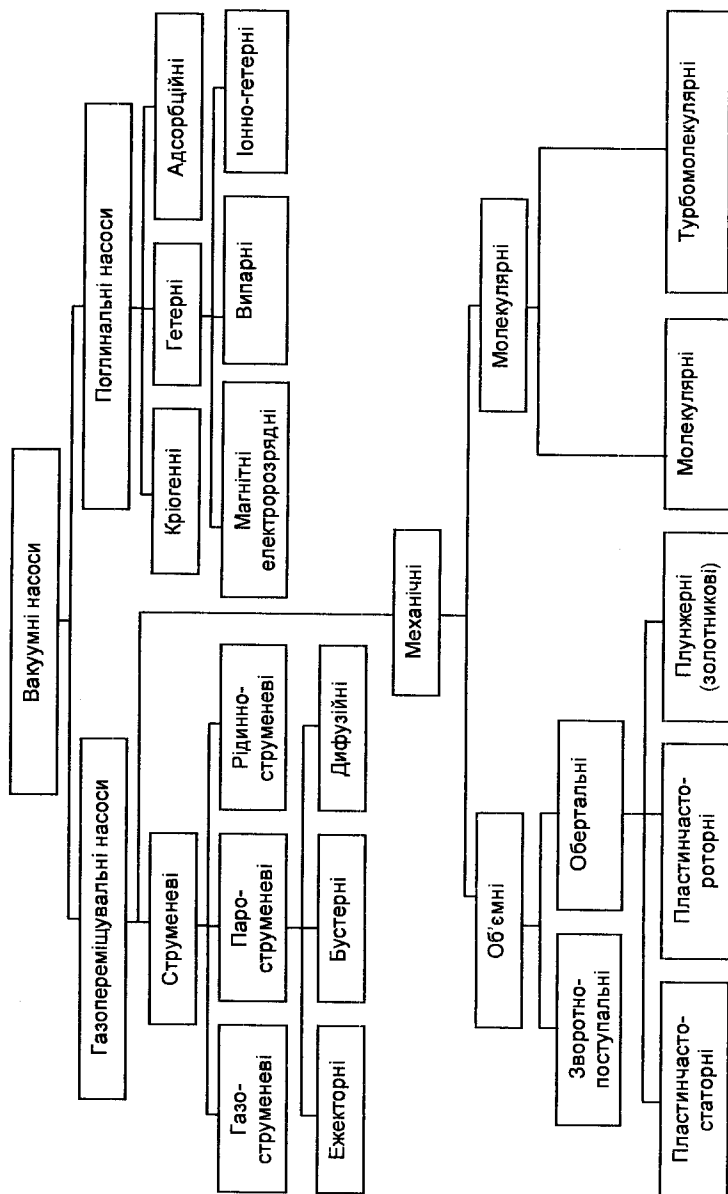


Рис. 3.1. Загальна класифікація вакуумних насосів

розрідження), найбільший тиск запуску, найбільший випускний тиск та деякі ін.

Розглянемо схему найпростішої вакуумної установки (рис. 3.2), яка складається з об'єкта, що відкачується (1), вимірювачів вакууму (2) і (3), насоса (4) та трубопроводу (5). Рух газу з об'єкта, що відкачується, у насос відбувається внаслідок різниці тисків ($P_1 - P_2$), причому $P_1 > P_2$. **Швидкість дії насоса** – це величина, що чисельно дорівнює об'єму газу, який відкачується насосом за одиницю часу через вхідний отвір насоса під час його роботи,

$$S_H = \left(\frac{dV}{dt} \right)_{P_2}, \text{ м}^3/\text{с, л/с.} \quad (3.1)$$

Величина S_O , що чисельно дорівнює об'єму газу, який надходить за одиницю часу з об'єкта у трубопровід за величини тиску P_1 , називається **швидкістю відкачування об'єкта**:

$$S_O = \left(\frac{dV}{dt} \right)_{P_1}. \quad (3.2)$$

Цю величину у вакуумній техніці часто називають **ефективною швидкістю відкачування насоса**.

Відношення ефективної швидкості відкачування насоса до швидкості його дії називається **коефіцієнтом використання насоса**:

$$K_H = \frac{S_O}{S_H}. \quad (3.3)$$

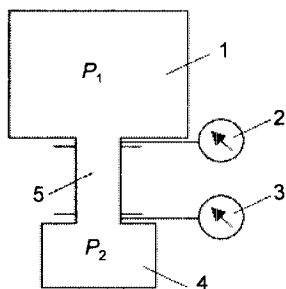


Рис. 3.2. Схема найпростішої вакуумної установки

Потік газу Q , який проходить через вхідний переріз насоса, отримав назву **продуктивності насоса**. Для стаціонарного газового потоку можна записати умову нерозривності газового потоку

$$P_1 S_O = P_2 S_H = Q. \quad (3.4)$$

З'ясуємо, який зв'язок існує між трьома основними характеристиками вакуумної системи: швидкістю дії насоса S_H , швидкістю відкачування об'єкта S_O і провідністю U вакуумної магістралі між насосом і об'єктом.

$$S_H = \frac{Q}{P_2} = \frac{U(P_1 - P_2)}{P_2}, \quad (3.5)$$

$$S_O = \frac{Q}{P_1} = \frac{U(P_1 - P_2)}{P_1}. \quad (3.6)$$

Співвідношення (3.5) і (3.6) можна переписати у вигляді

$$\frac{1}{S_H} = \frac{P_2}{U(P_1 - P_2)}, \quad \frac{1}{S_O} = \frac{P_1}{U(P_1 - P_2)}. \quad (3.7)$$

Після віднімання цих виразів одержимо

$$\frac{1}{S_O} - \frac{1}{S_H} = \frac{1}{U}. \quad (3.8)$$

Рівняння (3.8) часто називають **основним рівнянням вакуумної техніки**. Воно може мати вигляд

$$S_O = \frac{S_H U}{S_H + U}. \quad (3.9)$$

Проаналізуємо одержану формулу. Якщо $S_H = U$, то з (3.9) одержимо, що $S_O = 0,5 S_H$. Якщо ж $U \rightarrow \infty$, то $S_O \rightarrow S_H$ і навпаки, якщо $U \rightarrow 0$, то і $S_O \rightarrow 0$.

Таким чином, наявність трубопроводу між насосом і об'єктом завжди приводить до зменшення швидкості відкачування об'єкта, і тільки в разі дуже великої провідності трубопроводу ($U \rightarrow \infty$) швидкість відкачування об'єкта наближається до швидкості дії насоса. Застосу-

вавши формулу для коефіцієнта використання насоса K_H (3.3), одержимо два корисні співвідношення:

$$K_H = \frac{U}{S_H + U}, \quad (3.10)$$

$$U = \frac{S_H K_H}{1 - K_H}. \quad (3.11)$$

Графічно залежність (3.10) зображена на рис. 3.3. З графіка бачимо, що максимальне значення коефіцієнта використання насоса дорівнює одиниці, і воно реалізується, якщо $U > 100S_H$. На практиці вакуумпровід між насосом і об'єктом вибирають таким, щоб його провідність $U > 10S_H$.

Швидкість дії насоса S_H визначається принципом його роботи та особливостями конструкції. Максимально можлива величина швидкості дії насоса може бути теоретично розрахована лише для „ідеального” вакуумного насоса, яким є отвір у посудині з ідеальним вакуумом. Оскільки для ідеального вакууму концентрація газових молекул $n = 0$, то і тиск P_2 в „ідеальному” насосі також дорівнює нулю. Приєднавши до такого „ідеального” вакуумного насоса посудину, у якій необхідно створити розрідження, одержимо „ідеальну вакуумну систему”, швидкість відкачування якої дуже легко розрахувати, користуючись найпростішими формулами молекулярно-кінетичної теорії газів.

Для „ідеальної вакуумної системи” молекула газу, що залишає посудину через отвір, до якого приєднаний насос, уже не повертається назад і, таким чином, тиск у посудині зменшується. Нехай тиск у посудині, яка відкачується в такий спосіб, становить $P_1 = nkT$, а площа отвору, через який відбувається відкачування, дорівнює A . Тоді

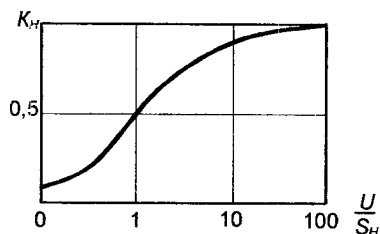


Рис. 3.3. Залежність коефіцієнта використання насоса від відношення провідності трубопроводу до швидкості дії насоса

об'єм газу V' , який проходить через цей отвір за одиницю часу, становить:

$$V' = \frac{1}{4} \tilde{v} A, \quad (3.12)$$

де \tilde{v} – середня швидкість руху газових молекул.

Величина V' і буде швидкістю дії такого насоса $S_H = V'$. Виразивши середню швидкість через параметри газу $\left(\tilde{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \right)$, одержимо:

$$S_H = \sqrt{\frac{R}{2\pi}} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}} \cdot A, \quad (3.13)$$

де R – універсальна газова стала;
 T – абсолютна температура газу в об'єкті;
 μ – молярна маса газу.

Цікавою особливістю такого „ідеального насоса” є те, що швидкість його дії не залежить від тиску газу P_1 в об'єкті, який відкачується.

Для практичних розрахунків, підставивши у (3.13) значення сталих, одержимо:

$$S_H = 36,4A \sqrt{\frac{T}{\mu}}, \text{ м}^3/\text{с}, \text{ якщо } A \text{ в м}^2; \quad (3.14)$$

$$S_H = 3,64A \sqrt{\frac{T}{\mu}}, \text{ л/с}, \text{ якщо } A \text{ в см}^2. \quad (3.15)$$

У формулах (3.14) і (3.15) уже враховано порядок величини молярної маси μ (10^{-3}), тому при розрахунках швидкості відкачування для різних газів у формули підставляється лише ціла частина значення молярної маси (для водню – 2, для кисню – 32, для аргону – 40 і т.д.).

Якщо відкачування об'єкта відбувається не „ідеальним вакуумним насосом” ($P_2 \neq 0$), то газові молекули рухатимуться через отвір в обох напрямках. Тоді результируючий об'єм газу V' , який проникає з посудини в насос, дорівнюватиме різниці об'ємів газу, що рухаються через

отвір з різних боків. Формула для розрахунку швидкості дії такого насоса має вигляд:

$$S_H = 36,4A \sqrt{\frac{T}{\mu} \left(1 - \frac{P_2}{P_1}\right)}, \text{ м}^3/\text{с, якщо } A \text{ в м}^2, \quad (3.16)$$

$$S_H = 3,64A \sqrt{\frac{T}{\mu} \left(1 - \frac{P_2}{P_1}\right)}, \text{ л/с, якщо } A \text{ в см}^2. \quad (3.17)$$

Добуток $A(1 - P_2/P_1)$ є однією з основних характеристик насоса. Якщо $P_2 \ll P_1$, відкачувальна спроможність насоса визначається лише площею пропускного отвору (як і для „ідеального насоса”). У процесі відкачування тиск P_1 в об’єкті поступово зменшується, наближаючись до значення P_2 , при цьому зменшується і S_H . За умови $P_1 = P_2$ відкачування припиняється (у розумінні зменшення тиску в об’єкті). Отже, реальний насос не може створити в об’єкті тиск нижчий ніж P_2 . Цей тиск називається граничним залишковим тиском $P_{сп}$.

Граничним залишковим тиском $P_{сп}$ називається мінімальний тиск, який може бути забезпечений вакуумним насосом, що працює без навантаження (сам на себе), тобто без об’єкта, який відкачується. Граничний тиск більшості вакуумних насосів визначається газовиділенням матеріалів, з яких виготовлений насос, перетіканням газу через конструктивні зазори в насосі та деякими іншими явищами, що виникають у процесі його роботи.

Найбільший (первинний) тиск запуску насоса P_3 – це максимальний тиск у насосі, за якого він здатний почати працювати. Значення P_3 визначається принципом роботи насоса і його конструктивними особливостями. Деякі насоси можуть починати працювати за атмосферного тиску повітря в них, для інших необхідне попереднє відкачування і насоса, і об’єкта до певного тиску. Таке попереднє розрідження отримало назву „форвакууму” (попереднього вакууму).

Найбільший випускний тиск P_6 – це найбільший тиск на виході з насоса, за якого він ще здатний нормально працювати.

Області дії вакуумних насосів. Як уже зазначалося, залежно від ступеня вакууму, який створюється тим чи іншим насосом, насоси можна класифікувати на низьковакуумні, високовакуумні та надвисоко-

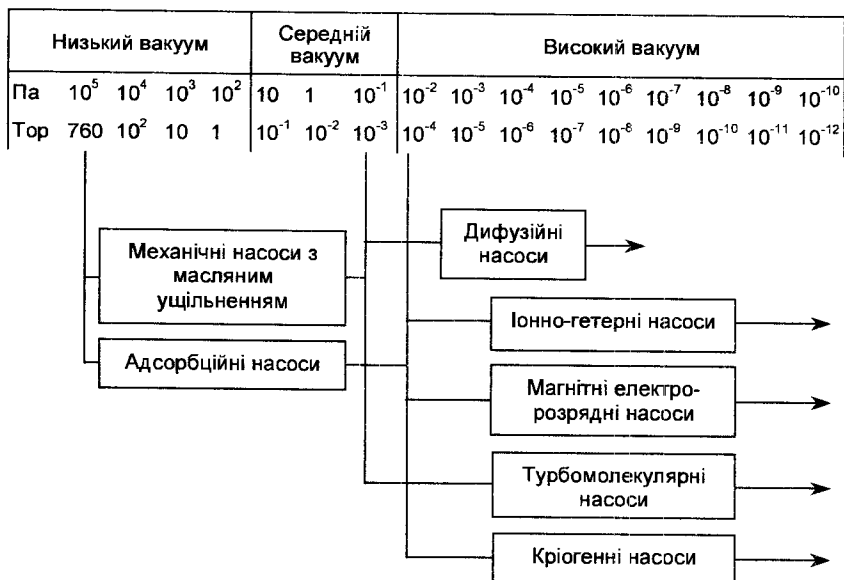


Рис. 3.4. Области дії вакуумних насосів

вакуумні. На рис. 3.4 наведені діапазони робочих тисків вакуумних насосів, які найчастіше використовуються у вакуумній техніці.

Низьковакуумні насоси працюють в області тисків 10^5 – 10^2 Па (760–1 Тор). До них належать деякі механічні насоси (поршневі, водокільцеві та ін.) та деякі струменеві насоси (водоструменеві, газоструменеві та ін.). Робочий діапазон тисків цих насосів є досить вузьким, вони не набули широкого використання у вакуумній техніці і застосовуються для спеціальних цілей (медицина, фармакологія тощо).

Середньовакуумні насоси працюють в області тисків 10^2 – 10^{-1} Па (1 – 10^{-3} Тор), проте деякі з них здатні (не дуже довго) працювати й за більш високих (атмосферного) тисків. До них належать механічні насоси (з масляним ущільненням та двороторні), пароструменеві (парортутні та паромасляні ежекторні насоси), паромасляні бустерні та адсорбційні насоси.

Високовакуумні насоси працюють в області тисків 10^{-1} – 10^{-5} Па (10^{-3} – 10^{-7} Тор). До них належать дифузійні, турбомолекулярні, іонно-

гетерні, а також сорбційні та криогенні насоси. **Надвисоковакуумні насоси** працюють в області тисків, менших за 10^{-5} Па (10^{-7} Тор). Для одержання як високого, так і надвисокого вакууму, можуть використовуватися одні й ті самі насоси. Як бачимо з рис. 3.4, області дії високовакуумних і надвисоковакуумних насосів перекриваються.

Для правильного вибору й використання насосів необхідно знати ще деякі їх характеристики (не пов'язані з розглянутими вище): споживання електроенергії та охолоджувальної води, масу насоса та його розміри, рівень шумів та вібрацій, які створюються під час роботи насоса, тощо. Необхідно також знати час запуску та зупинки насоса, склад залишкових газів, можливість сумісної роботи насосів та ін.

Об'ємне відкачування. Об'ємні насоси у своїй роботі використовують принцип збільшення об'єму газу, який відкачується (як правило, за його незмінної температури), унаслідок чого згідно із законом Бойля – Маріотта ($PV = \text{const}$) тиск цього газу зменшується.

Збільшення об'єму газу може бути здійснене в різні способи. Історично першим був створений поршневий вакуумний насос (рис. 3.5). Він складається із циліндричної камери (1), усередині якої рухається поршень (2).

Принцип роботи поршневого насоса неважко зрозуміти, користуючись рис. 3.5. Під час руху поршня вниз відкривається впускний клапан (4), і при закритому клапані (3) газ заповнює порожнину камери насоса (1). Це перший етап роботи насоса – процес заповнення або засмоктування. Унаслідок розширення газу з відкачуваного об'єкта в камеру насоса тиск газу в об'єкті знижується. Під час руху поршня вгору клапан (4) закривається, засмоктаний газ стискається і після відкривання випускного клапана (3) виштовхується за межі насоса (вихлоп).

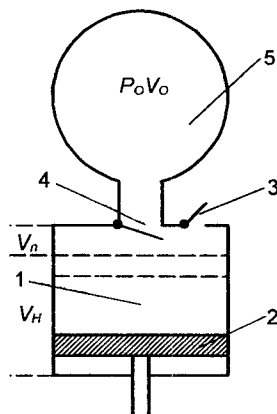


Рис. 3.5. Схема поршневого вакуумного насоса:
1 – робоча камера; 2 – поршень; 3 – випускний клапан; 4 – впускний клапан; 5 – відкачуваний об'єм

Отже, об'ємний насос за кожний цикл відкачування забирає з об'єкта один і той самий об'єм газу V_O при тому тиску, який в даний момент існує в ньому. Маса ж газу, відкачаного за кожний цикл, у міру зниження тиску зменшується.

Після n циклів відкачування тиск в об'єкті визначається виразом

$$P_n = P_O \left(\frac{V_O}{V_O + V_H} \right)^n = P_O \frac{1}{\left(1 + \frac{V_H}{V_O} \right)^n}. \quad (3.19)$$

Проаналізуємо дану формулу. Чим більше відношення V_H/V_O , тим меншу кількість циклів n потрібно здійснити для того, щоб одержати необхідний вакуум P_n . Теоретично, якщо $n \rightarrow \infty$ циклів відкачування, досягається значення $P_H = 0$. Насправді це зовсім не так. Внаслідок наявності паразитного об'єму V_n (угорі під поршнем на рис. 3.5), негерметичності між стінкою камери і поршнем, наявності парів мастила і т. ін. після здійснення досить великої кількості циклів досягається деяке граничне розрідження P_{sp} , яке не дорівнює нулю й величина якого визначається сукупною дією всіх перерахованих вище чинників.

Швидкість дії такого об'ємного насоса можна розрахувати таким чином. Якщо об'єм камери насоса під час руху поршня з частотою n змінюється в межах від V_H до V_n , то об'єм газу, який виводиться з насоса за одиницю часу (швидкість дії насоса S_H), виражається формулою:

$$S_{HK} = \frac{dV}{dt} = v(V_H - V_n) = vV_H \left(1 - \frac{V_n}{V_H} \right). \quad (3.20)$$

Цю величину називають **конструктивною швидкістю дії** насоса S_{HK} , бо вона визначається частотою руху поршня і розмірами камери насоса.

Збільшення S_{HK} можливе за рахунок збільшення об'єму камери насоса V_H (збільшення розмірів насоса) та частоти руху поршня. Розміри насоса визначають його масу, потужність двигуна, вартість. Збільшення частоти має свої обмеження, зумовлені часом заповнення камери насоса газом (це відбувається не миттєво). Частота руху поршня вибирається з урахуванням ще деяких обставин (прискорення поршня і пов'язані з ним сили, зношування поверхонь та ін.).

При тиску P на вході в насос газовий потік через нього становить з (3.20)

$$Q = PS_{HK} = \nu V_H \left(1 - \frac{V_n}{V_H} \right) P. \quad (3.21)$$

Якщо на виході з насоса (вихлоп) існує тиск $P_{вих}$, то в паразитному об'ємі V_n є деяка кількість газу $P_{вих} \cdot V_n$. Оскільки $P_{вих} > P$, то частина цього газу потрапить через негерметичність у момент вихлопу назад у насос і спричинить так званий зворотний газовий потік, який можна виразити як:

$$Q' = \mu \nu V_n P_{вих}. \quad (3.22)$$

Таким чином, результуюча продуктивність насоса дорівнюватиме різниці цих потоків

$$Q_H = Q - Q' = \nu V_H \left(1 - \frac{V_n}{V_H} \right) P - \mu \nu V_n P_{вих}.$$

Виконавши віднімання, одержимо

$$Q_H = \nu V_H P \left(1 - \frac{V_n}{V_H} \right) \left[1 - \frac{\mu \frac{V_n}{V_H} P_{вих}}{\left(1 - \frac{V_n}{V_H} \right) P} \right]. \quad (3.23)$$

Даний вираз можна дещо спростити, поклавши $V_n/V_H \ll 1$, і тоді одержимо формулу для теоретично можливої (найбільшої) швидкості дії такого насоса

$$S_{теор} = S_{max} = \frac{Q_H}{P} = \nu V_H \left(1 - \mu \frac{V_n P_{вих}}{V_H P} \right).$$

З урахуванням (3.20) одержимо:

$$S_{max} = S_{HK} \left(1 - \mu \frac{V_n P_{вих}}{V_H P} \right). \quad (3.24)$$

Розглянемо вираз у дужках у формулі (3.24). Позначимо:

$$P_{ep} = \mu \frac{V_n}{V_H} P_{вих}. \quad (3.25)$$

Очевидно, що P_{ep} і буде тим граничним тиском, який створить насос після досить тривалої роботи за умови $n \rightarrow \infty$. Вираз (3.25) ураховує наявність паразитного об'єму V_n і негерметичність насоса в момент вихлопу (μ , $P_{вих}$).

З урахуванням (3.25) одержимо кінцевий вираз для швидкості дії насоса в такому вигляді

$$S_{\max} = S_{HK} \left(1 - \frac{P_{ep}}{P} \right). \quad (3.26)$$

Якщо $P \gg P_{ep}$, одержуємо, що $S_{\max} = S_{HK}$. Оскільки в процесі відкачування тиск P у насосі зменшується, наближаючись до P_{ep} , то і швидкість дії зменшується, а за умови $P = P_{ep}$ стає рівною нулю.

Граничний тиск об'ємного насоса. Проаналізуємо вираз для граничного тиску насоса (3.25). Величина граничного тиску визначається трьома параметрами – паразитним об'ємом V_n , коефіцієнтом μ та тиском на виході з насоса $P_{вих}$ (за певного значення об'єму робочої камери насоса V_H). Зменшення цих величин приводить до зменшення P_{ep} , що покращує цю одну з найважливіших характеристик насоса. Зменшення величини паразитного об'єму V_n досягається шляхом удосконалення конструкції насоса (це суто конструктивний параметр). Зменшення коефіцієнта μ досягається шляхом заповнення об'єму V_n маслом, у результаті чого з об'єму V_n у насос потрапляє менша кількість газу. Зменшення $P_{вих}$ досягається шляхом послідовного з'єднання кількох насосів (як правило, двох). У результаті перший насос (перший ступінь відкачування), який стикується з відкачуванним об'єктом, виштовхує газ з камери не безпосередньо в атмосферу ($P_{вих} \rightarrow 10^5$ Па), а в такий самий насос, де $P_{вих} \ll 10^5$ Па, а вже той виштовхує газ в атмосферу.

Внесення в насос масла для зменшення величини паразитного об'єму V_n та зменшення тертя поршня об стінки камери зумовлює появу парів цього масла у складі газу, який відкачується насосом. Через це реальний граничний вакуум P_{ep}^p насоса дещо погіршується:

$$P_{gp}^p = P_{gp} + P_n, \quad (3.27)$$

де P_{gp} визначається за формулою (3.25);

P_{nac} – тиск насиченої пари ущільнювальних масел за температури камери насоса (як правило, під час роботи корпус насоса нагрівається).

У разі неправильного вибору масла (високий тиск його насиченої пари P_{nac}) усі конструктивні вдосконалення насоса будуть зведені нанівець. Тому для вакуумних насосів такого типу були створені спеціальні сорти масел (вакуумні масла), які, крім гарних трибологічних характеристик, мають ще й низькі значення пружності насичених парів (у кращих сортів вакуумних масел тиск насиченої пари становить $P_{nac} = 10^{-5} - 10^{-6}$ Па за робочих температур насоса).

Основна конструктивна особливість поршневих насосів – зворот-но-поступальний рух поршня – не дозволяє повною мірою використовувати можливості електродвигунів (при передачі руху від вала електродвигуна до поршня потрібний проміжний механізм, що знижує ККД й ускладнює конструкцію насоса в цілому).

У сучасній вакуумній техніці поршневі вакуумні насоси не використовуються, проте розглянуті фізичні явища і закономірності, які виникають під час їх роботи, є однаковими для всіх об'ємних насосів незалежно від їх конструкції.

Сучасні вакуумні об'ємні механічні насоси є обертальними (ротаційними) насосами („поршень” у таких насосах обертається в насосній камері). Залежно від того, використовується для ущільнення системи камера – „поршень” масло чи ні, їх можна розділити на змащувані (масляні) і незмащувані (безмасляні).

Ротаційні масляні насоси

Сучасні ротаційні масляні насоси мають три основні конструктивні модифікації: пластинчасто-роторні, пластинчасто-статорні і плунжерні (золотникові) насоси. Свою назву вони одержали від назви основних конструктивних елементів, які забезпечують процес відкачування.

Пластинчасто-роторний насос (рис. 3.6) складається з циліндричного ротора (1), вісь обертання якого розташована ексцентрично відносно вісі статора (4), так що ротор і статор торкаються один одного на деякій твірній ab . Ротор має діаметральний паз, у якому знаходяться дві підпружинені пластини (2, 3), що щільно притискаються до

внутрішньої циліндричної поверхні статора. У статорі також є впускний і випускний канали (вхід і вихід). У випускному каналі змонтований шариковий клапан. Таким чином, ротор, статор і пластини утворюють три об'єми A , B і C , які періодично змінюють свою величину під час руху ротора. Об'єм A називається впускним, об'єм B між пластинами називається переносним а об'єм C – випускним.

Під час обертання ротора (рис. 3.6) у напрямку, який показаний стрілкою, об'єм A збільшується і через вхідний отвір засмоктується газ. Водночас об'єм C зменшується, газ у ньому стискується і в певний момент виштовхується назовні. Після проходження пластини (3) через випускний отвір засмоктування продовжується, і переносний об'єм B стає випускним. Після проходження пластини (3) через твірну ab і випускний отвір об'єм засмоктування перейде в об'єм переносу й увесь цикл повториться.

За один оберт ротора насос виштовхує об'єм газу V_H (сума об'ємів A , B і C), який приблизно дорівнює різниці об'ємів порожнини статора та об'єму ротора (нехтуючи об'ємом пластин). Таким чином, максимальна швидкість дії насоса може бути описана формулою

$$S_H \approx \nu V_H, \quad (3.28)$$

де ν – частота обертання ротора;
 V_H – об'єм робочої камери насоса.

Паразитними об'ємами в цьому насосі є об'єми між спільною твірною ab та впускним і випускним отворами в статорі (рис. 3.6). Оскільки біля вихідного отвору (об'єм C) газ значно стискується, а біля вхідного отвору (об'єм A) створюється розрідження, то мож-

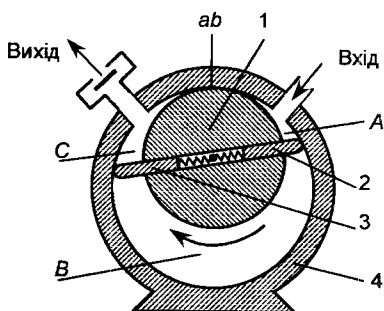


Рис. 3.6. Схематичне зображення пластинчасто-роторного насоса: 1 – ротор; 2, 3 – пластини; 4 – корпус (статор) насоса

ливе проривання газу з об'єму C в об'єм A , а з нього у відкачувану систему.

Поверхні насоса, які труться (ротор, пластини, статор), обробляються з високим ступенем чистоти і змащуються спеціальним маслом. Масло також заповнює й об'єм C наприкінці стиснення, оскільки в разі наближення розрідження в насосі до граничної межі, тиску стисненого газу недостатньо для відкривання вихлопного клапану. Таким чином, під час вихлопу з насоса виштовхується газо-масляна суміш. Сучасні насоси мають спеціальні пристрої для уловлювання цього масла і повернення його в насос.

Як і для раніше розглянутого поршневого насоса (формула (3.25)), граничний вакуум $P_{гр}$ пластинчасто-роторного насоса залежить не тільки від величини паразитного об'єму та якості обробки поверхонь, а й від тиску насиченої пари масла (формула (3.27)) і, як правило, для одноступеневого насоса $P_{гр}$ становить $10^{-1} - 10^{-2}$ Тор ($10 - 1$ Па). Для покращення граничного вакууму використовується послідовне з'єднання двох насосів, як показано на рис. 3.7. Обидва насоси виконуються в одному статорному блоці, їх ротори обертаються синхронно від одного електродвигуна. Насос першого ступеня має більший об'єм робочої камери і виштовхує стиснений газ у робочу камеру насоса другого ступеня, а той – безпосередньо в атмосферу.

Граничний вакуум такого двоступеневого насоса становить близько $1 \cdot 10^{-4}$ Тор (10^{-2} Па) (рис. 3.8). Усі сучасні пластинчасто-роторні насоси є двоступеневими.

Відповідно до формули (3.26) швидкість дії пластинчасто-роторного насоса є функцією тиску і при наближенні вхідного тиску P до граничного $P_{гр}$ зменшується до нуля. На рис. 3.9 наведена типова

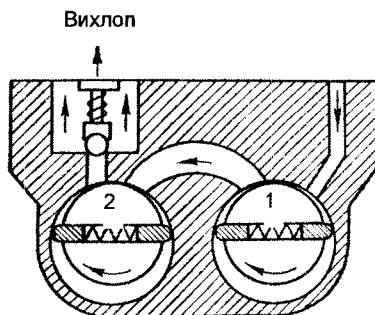


Рис. 3.7. Двоступеневий пластинчасто-статорний насос: 1 – насос першого ступеня; 2 – насос другого ступеня

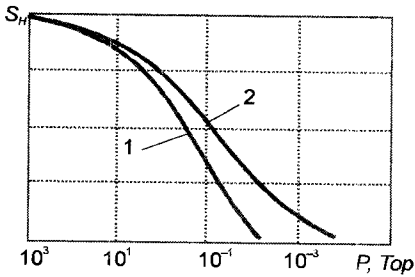


Рис. 3.8. Залежність швидкості дії від тиску одноступеневого (1) та двоступеневого (2) пластинчасторооторного насосів

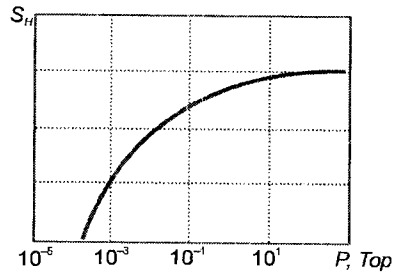


Рис. 3.9. Залежність швидкості дії пластинчасторооторного насоса від вхідного тиску

залежність швидкості дії пластинчасторооторного насоса від вхідного тиску.

Робочі рідини (масла) для ротаційних насосів. Граничний тиск і деякі інші параметри механічних насосів з масляним ущільненням визначаються переважно властивостями робочої рідини (масла), залитої в насос. Як і гази, пари масел створюють зворотний потік, потрапляють на вхід насоса й забруднюють створений ним вакуум.

Слід зазначити, що ці пари не є безпосередньо парами робочих рідин. Тиск насиченої пари сучасних робочих рідин становить 10^{-3} – 10^{-5} Па (10^{-5} – 10^{-7} Тор), що значно менше від граничного тиску насосів 10^{-1} – 10^{-2} Па (10^{-3} – 10^{-4} Тор), який здебільшого визначається якістю їх виготовлення.

При обертанні ротора насоса в місцях контакту поверхонь, що труться (поверхня пластини з поверхнею статора, поверхня пластини з поверхнею ротора, поверхня ротора і поверхня статора та ін.), локально виникають досить високі температури, у результаті чого в цих місцях відбувається крекінг (розкладання) масла. Легколеткі продукти крекінгу масла мають значно більші тиски насичення, тому саме ними й забруднюється створений насосом вакуум.

Як робочі рідини для механічних обертальних насосів звичайно використовують так звані вакуумні масла, одержані з промислових машинних мінеральних масел у результаті їх вакуумної дистиляції, під

час якої відбираються як легкі, так і важкі фракції. Особливими „вакуумними” властивостями таких масел є:

- 1) низька пружність насиченої пари за робочих температур;
- 2) нерозчинність газів, що відкачуються, висока вологостійкість (нерозчинність водяної пари);
- 3) стійкість до хімічної взаємодії з конструктивними матеріалами насоса і киснем повітря. За іншими параметрами вакуумні масла повинні задовольняти стандартним вимогам до мастил: мати низьку кислотність, необхідну в'язкість, гарні мастильні властивості, високу температуру спалаху тощо. Цим вимогам значною мірою задовольняють вітчизняні вакуумні масла ВМ-4 і ВМ-6.

Масло ВМ-4 одержують шляхом вакуумної дистиляції з машинного масла СУ, при цьому з нього вилучається 13–15 % летких фракцій. Масло неоднорідне за своїм складом і є сумішшю вуглеводнів з різною молекулярною масою і різною температурою кипіння. Високої вологостійкості і стійкості до окислення воно не має.

Таблиця. 3.1. Фізико-хімічні властивості вакуумних масел для ротаційних насосів

Параметр	Вакуумні масла	
	ВМ-4	ВМ-6
Вихідна сировина	машинне масло СУ	машинне масло С
Пружність насиченої пари за $t\ 20\ ^\circ\text{C}$	$(5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5})$ Тор	$(1 \cdot 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-7})$ Тор
В'язкість кінематична, $10^{-6}\ \text{м}^2/\text{с}$		
- за $t\ 20\ ^\circ\text{C}$	370–385	165–215
- за $t\ 100\ ^\circ\text{C}$	8–11	6–8
Фракційний склад (температурні межі дистиляції, $^\circ\text{C}$)		
- початок	130	140–165
- кінець	245	190–210
Густина за $t\ 20\ ^\circ\text{C}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	870	870
Молекулярна маса, а.о.м	400	400
Температура спалаху, $^\circ\text{C}$	206–230	220–230
Температура застигання, $^\circ\text{C}$	-20	-15
Вологостійкість (поглинання води), %	0,60–0,80	0,20–0,30

Масло ВМ-6 одержують шляхом вакуумної дистиляції машинного масла С. Порівняно з маслом ВМ-4 воно є більш однорідним за складом і не має легколетких фракцій. Це масло порівняно з маслом ВМ-4 у 3–4 рази є більш вологостійким і нездатним до окислення.

Основні фізико-хімічні характеристики вакуумних масел ВМ-4 і ВМ-6 наведені в табл. 3.1.

Крім цих робочих рідин, для обертальних насосів можуть бути використані вакуумні масла для дифузійних насосів ВМ-1 та ВМ-5. Вони є більш дорогими, але граничний вакуум насосів з ними покращується приблизно на порядок.

Конструктивні особливості ротаційних насосів. Основними параметрами розглянутих насосів є швидкість дії S_H та граничний вакуум $P_{гр}$. Згідно з формулою (3.28) швидкість дії ротаційного насоса залежить від частоти обертання ротора η та об'єму робочої камери насоса V_H .

Сучасні насоси мають приводи від електродвигунів, і, як правило, ротор насоса безпосередньо стикується з ротором електродвигуна та обертається з тією самою частотою.

Пластинчасто-роторні насоси, які серійно виготовляються, мають швидкості дії у діапазоні від 0,1 л/с до 10 л/с. У переважній своїй більшості швидкість обертання роторів насосів становить близько 1500 об/хв, тому відмінності у швидкостях дії насосів обумовлюються відмінностями у величинах об'ємів їх робочих камер (насоси з більшими швидкостями дії мають більші об'єми робочих камер і відповідно більші розміри самих насосів).

За багато років усі виробники пластинчасто-роторних насосів – як вітчизняні, так і зарубіжні – прийшли до практично однакових конструкцій цих насосів. У невеликих насосах робочі камери є герметизованими від атмосферного повітря занурюванням їх у масло, тому корпус насоса виконує роль масляної ванни, всередині якої знаходиться власне насос. Вал насоса виводиться з масляної ванни (корпусу) через самозатягувальну гумову манжету, яка запобігає виливанню масла.

У вхідних патрубках насосів іноді встановлюють металеві сітки для захисту механізму насоса від потрапляння дрібних твердих предметів. Вихлоп з другого ступеня насоса здійснюється безпосередньо в масляну ванну, а вихідний патрубок закріплюється на корпусі насоса. Тому робота насоса за великих впускних тисків (більше ніж 100 Тор) супро-

воджується викиданням крапель масла у вихідний патрубок разом з потоком відкачуваного газу. Для запобігання цьому біля вихлопного отвору насоса встановлюють спеціальні масловідбивні пластини.

За впускних тисків (100–1) Тор робота насосів супроводжується утворенням помітної кількості масляного туману, який виходить з вихлопного патрубку насоса у вигляді сизо-білого диму. Для запобігання цьому на вихлопному патрубку закріплюються спеціальні пористі фільтри.

Під час роботи насоса в області граничного вакууму має місце зворотний потік масляних парів з насоса у відкачуваний об'єкт. Наявність зворотного потоку масляних парів спричинює забруднення відкачуваних об'єктів і погіршення властивостей (унаслідок змішування) робочих рідин дифузійних насосів (особливо надвисоковакуумних). Щоб запобігти цьому явищу, на вхідному патрубку насоса встановлюють різні уловлювачі масляних парів (сорбційні, охолоджувані водою або рідким азотом).

Газовим середовищем, яке відкачується форвакуумним ротаційним насосом, переважно є повітря. Повітря являє собою складну суміш багатьох газів (азот, кисень, аргон та ін.). Крім цього, до складу повітря входить водяна пара (H_2O), кількість якої залежить від багатьох обставин (місце, пора року, погода тощо). Водяна пара має низку властивостей, які утруднюють її відкачування. Так, тиск насиченої водяної пари за температури $20\text{ }^\circ\text{C}$ становить 2333 Па ($17,5\text{ Тор}$). Порівняно з тиском насиченої пари вакуумного масла 10^{-6} – 10^{-3} Па (10^{-8} – 10^{-5} Тор) цей тиск є дуже великим. У звичайному ротаційному насосі (рис. 3.7) вихлопний клапан відкривається, коли відкачуваний газ стискається в робочій камері другого ступеня до тиску дещо більшого ніж атмосферний. Одак ще раніше водяна пара в камері другого ступеня стає насиченою, і, незважаючи на зменшення об'єму, її тиск не збільшується, а сама пара конденсується в рідку фазу (воду). У результаті водяна пара не відкачується, а утворений конденсат (вода), змішуючись з маслом, утворює емульсію, яка має значну кислотність, що спричинює корозію робочих поверхонь насоса. Масло з емульсією втрачає свої трибологічні та вакуумні властивості, і насос перестає працювати нормально.

З метою запобігання цьому негативному явищу сучасні форвакуумні насоси облаштовуються газобаластним пристроєм. Його робота базується на тому, що в насосі, крім вхідного і вихідного отвору, у ро-

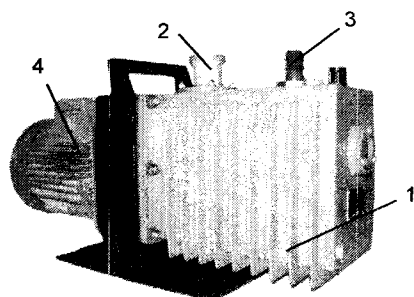


Рис. 3.10. Зовнішній вигляд пластинчасто-роторного насоса 2НВР-5ДМ: 1 – корпус насоса, 2 – вхідний патрубок, 3 – вихлопний патрубок, 4 – електродвигун

бочій камері другого ступеня є ще один отвір, у який у певний момент стиснення газу автоматично напускається атмосферне повітря. У результаті повний тиск у робочій камері другого ступеня різко зростає, при цьому випускний клапан відкривається, а парціальний тиск водяної пари в робочій камері не встигає збільшитися до тиску насичення. Водяна пара залишається парою (не конденсується в рідину) і виштовхується в атмосферу разом зі стиснутим газом і повітрям, що надійшло.

У разі роботи з газобаластним пристроєм граничний тиск насоса значно зростає. Як правило, газобаластний пристрій вмикається на деякий час для висушування масла (після того як насос тривалий час не працював) або для відкачування великої кількості вологого повітря.

Зовнішній вигляд пластинчасто-роторного насоса 2НВР-5ДМ зображено на рис. 3.10.

Вимірювання швидкості відкачування. У даній роботі для вимірювання швидкості відкачування вакуумної камери використовується метод постійного об'єму, який є квазістаціонарним, оскільки вакуумна система працює в змінному режимі, якщо й провідність вакуумпроводу та швидкість дії насоса змінюються в часі.

Розрахунок швидкості відкачування вакуумної камери проводиться за експериментально отриманою кривою відкачування $P = P(t)$ для відомої величини геометричного об'єму вакуумної камери (об'єм вакуумної камери вказаний на установці).

Вважаючи процес відкачування повітря ізотермічним ($PV = \text{const}$, де P – тиск повітря в камері, V – об'єм камери) і виконавши диференціювання виразу $PV = \text{const}$, отримаємо:

$$PdV + VdP = 0, \quad (3.29)$$

звідки $dV = -V \frac{dP}{P}$, (3.30)

Ефективна швидкість відкачування насоса становить

$$S_{ef} = \frac{dV}{dt}, \quad (3.31)$$

або, скориставшись формулою (3.30), одержуємо:

$$S_{ef} = \frac{dV}{dt} = -\frac{V}{P} \frac{dP}{dt}. \quad (3.32)$$

Розділивши змінні і виконавши інтегрування за часом у межах від t_1 до t_2 і відповідних тисків від P_1 до P_2 , одержимо формулу для обчислення ефективної швидкості відкачування за результатами вимірювань $P = P(t)$:

$$S_{ef} dt = -V \frac{dP}{P};$$

$$\int_{t_1}^{t_2} S_{ef} dt = -V \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P};$$

$$S_{ef} = \frac{V}{t_2 - t_1} \ln \frac{P_1}{P_2}. \quad (3.33)$$

Провідність трубопроводу. Провідність трубопроводу (елемента вакуумної магістралі) чисельно дорівнює газовому потоку, який проходить через трубопровід за умови різниці тисків на його кінцях $\Delta P = 1$.

Провідність позначається буквою U , вимірюється в $\frac{M^3}{c} \left(\frac{l}{c} \right)$, якщо газовий потік вимірюється добутком PV .

Залежно від режиму протікання газу (в'язкісний ($\frac{\lambda}{d} \ll 1$, де λ – довжина вільного пробігу газової молекули, d – діаметр трубопроводу) чи молекулярний ($\frac{\lambda}{d} \ll 1$) провідність трубопроводу круглого по-

перечного перерізу d і завдовжки l обчислюється за формулами:

$$U_s = \frac{\pi d^4}{128 \eta l} \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (\text{в'язкісний режим течії газу}) \quad (3.34)$$

та

$$U_\mu = 1,2 \frac{d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (\text{молекулярний режим течії газу}), \quad (3.35)$$

де d – діаметр трубопроводу;

l – довжина трубопроводу;

η – коефіцієнт в'язкості газу;

T – температура газу;

M – молекулярна маса газу;

P_1 та P_2 – тиски газу на початку та в кінці трубопроводу.

Для повітря за кімнатної температури, коли d та l виражені в см, а P – в Тор, U виражається в $\frac{l}{c}$ і формули мають вигляд:

$$U_s = 182 \frac{d^4}{l} \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (3.36)$$

та

$$U_\mu = 12,1 \frac{d^3}{l}. \quad (3.37)$$

З формули (3.37) бачимо, що для конкретного газу провідність трубопроводу в молекулярному режимі течії газу є чисто геометричною характеристикою трубопроводу (у формулу входять лише геометричні розміри трубопроводу).

Завдання до роботи

1. Ознайомитися з технічними характеристиками та конструкцією форвакуумного насоса 2НВП-5ДМ (паспорт насоса, розібраний насос).

- Теоретично розрахувати швидкість дії насоса, визначивши величину робочого об'єму камери насоса та швидкість обертання ротора.
- Ознайомитися з конструкцією вакуумної установки та приладами для вимірювання вакууму (вакуумметр ВТ-2А з манометричними перетворювачами ПМТ-4 або ПМТ-2, вакуумметр 13ВТЗ-003 з манометричним перетворювачем ПМТ-6).
- Приєднати насос до вакуумної камери, одержати в ній форвакуум та виміряти його величину, побудувати криву відкачування вакуумної камери $P = P(t)$.
- Розрахувати провідність U вакуумної магістралі між насосом і камерою, вимірявши діаметр трубопроводу та його довжину. Побудувати теоретичну залежність провідності цього трубопроводу $U(P)$ для області тисків $10^{-3} < P < 10^3$ Тор.
- Користуючись одержаною кривою відкачування $P = P(t)$, розрахувати швидкість відкачування камери (ефективну швидкість відкачування насоса) $S_{\text{еф}}$. Побудувати графік залежності $S_{\text{еф}} = S_{\text{еф}}(P)$. Порівняти одержані дані з результатами розрахунку $U = U(P)$ та паспортною швидкістю дії насоса. Зробити висновки.

Хід роботи

- Ознайомитися з будовою вакуумної установки, схема якої наведена на рис. 3.11.
- У початковому стані в камері (4) знаходиться повітря за атмосферного тиску. Увімкнути вакуумметр ВТ-2А (тумблер „СЕТЬ”), тумблер „ТОК НАКАЛА”/„ИЗМЕРЕНИЕ” перевести в положення „ТОК НАКАЛА” і за допомогою регулятора виставити струм

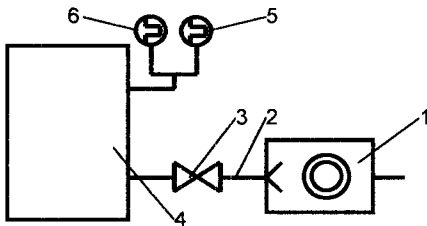


Рис. 3.11. Принципова схема вакуумної установки:
 1 – форвакуумний насос 2НВР-5ДМ;
 2 – вакуумпровід; 3 – вентиль;
 4 – вакуумна камера об'ємом $V = 8$ л; 5 – манометричний перетворювач ПМТ-4М (ПМТ-2);
 6 – манометричний перетворювач ПМТ-6

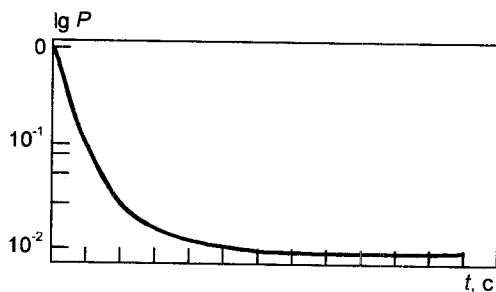


Рис. 3.12. Крива відкачування

нагрівника, який вказано на манометричному перетворювачі ПМТ-4М. Перевести тумблер в стан „ИЗМЕРЕНИЕ”. Увімкнути вакуумметр 13ВТЗ-003.

3. За закритого вентиля (3) (вправо до упору) увімкнути живлення форнасоса. Дати можливість форнасосу попрацювати „самому на себе” 5–10 хвилин. Плавню відкрити вентиль (вліву до упору), увімкнувши секундомір. Занести до табл. 3.2 результати вимірювання тиску в різні моменти часу. За одержаними даними побудувати криву відкачування $\lg P(t)$ (рис. 3.12).
4. Користуючись формулою (3.33), обчислити значення ефективної швидкості відкачування $S_{\text{еф}}$. Результати розрахунків $S_{\text{еф}}$ занести до табл. 3.2. Побудувати графік залежності $S_{\text{еф}} = S_{\text{еф}}(P)$.
5. Користуючись формулами (3.36) та (3.37), провести теоретичні розрахунки провідності U вакуумної магістралі, що з’єднує форнасос з вакуумною камерою ($d = 10$ мм, $l = 70$ см) для в’язкісного та молекулярного режимів протікання газу в області тисків $10^{-3} < P < 10^3$ Тор.

Результати розрахунків занести до табл. 3.3 та побудувати графік

Таблиця 3.2. Результати вимірювання $P = P(t)$

t, c	$P, \text{Тор}$	$\lg P$	P_1	P_2	$t_2 - t_1$	$S_{\text{еф}}$

залежності $U = U(P)$ (рис. 3.13).

Таблиця 3.3. Результати розрахунків провідності трубопроводу ($d = 1$ см, $l = 70$ см)

P , Тор	10^3	10^2	10^1	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}
U , л/с							

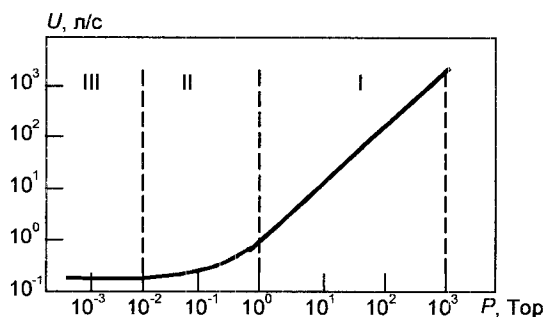


Рис. 3.13. Залежність провідності круглого трубопроводу діаметром d та завдовжки l від тиску (I – в'язкісний, II – перехідний, III – молекулярний режим протікання повітря)

Зміст звіту

1. Схематична будова форвакуумного пластинчасто-роторного насоса. Параметри насоса. Схема вакуумної установки.
2. Основні формули.
3. Результати вимірювань і розрахунки (табл. 3.2, табл. 3.3).
4. Графіки $P(t)$, $S_{эф}(P)$, $U(P)$.
5. Висновки (порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними).

Запитання для самоконтролю

1. Який принцип роботи механічного пластинчасто-роторного вакуумного насоса? Для чого в насосі використовується вакуумне масло? Які вимоги висуваються до вакуумних масел? Для чого використовується газобаластний пристрій?
2. Від чого залежить швидкість дії насоса?
3. Що таке провідність трубопроводу? Від чого залежить провідність трубопроводу? Які критерії вибору провідності трубопроводу?
4. Чим визначається швидкість відкачування вакуумної камери? Виведіть формулу для розрахунку швидкості відкачування вакуумної камери, що використовується в цій роботі.
5. Наведіть основне рівняння вакуумної техніки. Який фізичний зміст величин, що входять у нього?

Література: [4–7].

Вивчення конструкції адсорбційного насоса та одержання безмасляного форвакууму

Мета роботи: ознайомитися з конструкцією та принципом роботи адсорбційного насоса; навчитися одержувати безмасляний форвакуум за допомогою адсорбційних насосів; розрахувати швидкість відкачування вакуумної камери.

Обладнання: відкачний агрегат у складі двох адсорбційних вугільних насосів виробництва ВАТ «Selmi», вакуумна камера, вакуумметр термопарний ВТ-2А з манометричним перетворювачем ПМТ-2, (ПМТ-4), вакуумметр 13ВТ3-003 з манометричним перетворювачем ПМТ-6, посудина Д'юара з рідким азотом, секундомір.

Теоретичні матеріали

Адсорбційні вакуумні насоси. У сорбційних насосах зв'язування газових молекул відбувається на сильно розвинених поверхнях деяких мікропористих матеріалів (активоване вугілля, цеоліти, силікагелі). Як правило, газові молекули утримуються на поверхні сорбенту силами Ван-дер-Ваальса (фізична сорбція). З огляду на це сорбційні насоси є адсорбційними насосами. Оскільки час знаходження газових молекул на поверхні сорбенту залежить від енергії їх зв'язку з поверхнею ΔQ_ϕ (для фізичної сорбції вона є незначною – $\Delta Q_\phi < 100$ кДж/моль) та температури поверхні сорбенту, то з метою більш ефективного утримання газових молекул поверхнею сорбенту останній охолоджують до низьких (гелієвих, водневих, азотних) температур. Найчастіше використовують охолодження сорбентів до азотних температур (77 К). Саме такі насоси і називаються *адсорбційними насосами*. Найбільш простими за своєю конструкцією й зручними в експлуатації є адсорбційні

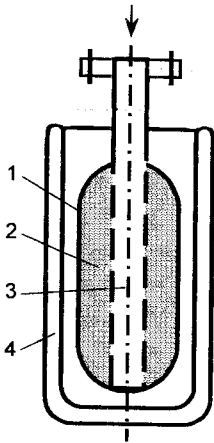


Рис. 4.1. Схематичне зображення адсорбційного форвакуумного насоса: 1 – корпус; 2 – адсорбент; 3 – сітчастий патрон; 4 – посудина для рідкого азоту

насоси попереднього розрідження (форвакуумні). На рис. 4.1 схематично зображена конструкція форвакуумного адсорбційного насоса.

Корпус насоса (1) являє собою циліндричну металеву (нержавіюча сталь) колбу, заповнену адсорбентом (2) (активоване вугілля або цеоліт).

Сітчастий патрон (3), вварений у корпус насоса, призначений для покращення доступу відкачуваного газу до сорбенту. Посудина (4), у яку заливається рідкий азот, може бути як скляною посудиною Дьюара (що досить незручно), так і виготовленою із сучасних піноматеріалів з низькою теплопровідністю стінок. При регенерації сорбента вона замінюється електропіччю.

Насоси такої конструкції здатні створювати розрідження близько 10^{-2} Па (10^{-4} Тор) у разі відкачування об'єкта від атмосферного тиску. Вони не придатні для створення високого і надвисокого вакууму (через неефективний доступ відкачуваного газу до сорбенту в умовах високого вакууму) і тому використовуються для попереднього відкачування вакуумних установок.

Адсорбенти для вакуумних адсорбційних насосів. Усі адсорбенти для вакуумних адсорбційних насосів можна поділити на три основні групи: вуглецеві сорбенти (активоване вугілля), цеоліти (молекулярні сита) і силікагелі. Загальними характеристиками всіх цих сорбентів є: питома площа поверхні (площа поверхні пор одиниці маси речовини); насипна маса (маса одиниці об'єму речовини); об'єм, розміри й розподіл адсорбційних пор.

Оскільки фізична адсорбція більшості газів є результатом дії дисперсійних сил, то вплив розмірів пор на адсорбцію газів є суттєвим.

За М.М. Дубиніним, усі групи адсорбентів можна поділити на два граничних структурних типи залежно від особливостей їх пористої структури.

Для адсорбентів першого типу характерною є наявність особливо дрібних пор (мікропор), діаметри яких сумірні з діаметрами сорбованих молекул. У мікропорах поля адсорбційних сил перекриваються, що посилює адсорбцію.

Для адсорбентів другого типу характерною є наявність більш широких пор, у яких поля адсорбційних сил не перекриваються, що зменшує адсорбцію.

До адсорбентів першого типу належать цеоліти (молекулярні сита), деякі сорти активованого вугілля і тонкопористі силікагелі. До адсорбентів другого типу – широкопористі силікагелі і алюмогелі та деякі різновиди активованого вугілля.

Більшість відомих на сьогодні адсорбентів не можуть бути віднесені ні до першого, ні до другого типу, оскільки мають пористу структуру з особливостями як сорбентів першого, так і другого типу. Виняток становлять лише цеоліти із „ситовими” властивостями (молекулярні сита).

Активоване вугілля – пористий вуглецевий матеріал у вигляді гранул та порошку. У сучасних технологіях виробництва активованого вугілля як вихідну сировину використовують відходи деревини, вугілля, торф та деякі полімери. Спочатку вуглецеву сировину карбонізують – нагрівають до високої температури в інертному середовищі без доступу повітря (піроліз), а потім активують водяною парою та CO_2 для утворення дрібнопористої структури та покращення адсорбційних властивостей. Походження (сировина) активованого вугілля інколи відображається в назві сорту вугілля: БАУ – березове активоване вугілля, СКТ – вугілля, одержане з торфу і т.п.

Усі вуглецеві сорбенти складаються з дрібних кристаликів вуглецю з кристалографічною решіткою графіту (шестигранна призма заввишки близько 9 Å й діаметром близько 23 Å). Елементарні кристалики об'єднуються в конгломерати різних розмірів залежно від вихідного матеріалу та умов його обробки. Проміжки між окремими кристалами та порожнини між їх конгломератами утворюють сітку пор, яка й визначає адсорбційні властивості такого матеріалу, причому для сорбції газів визначальними є найдрібніші пори. На рис. 4.2 наведена мікрофотографія пористої структури активованого вугілля, зроблена за допомогою електронного мікроскопа. У структурі активованого вугілля розрізняють три категорії пор: макро-, мезо- та мікропори. Найбільш важливими для сорбції газів є мікро- та мезопори. Ефективний

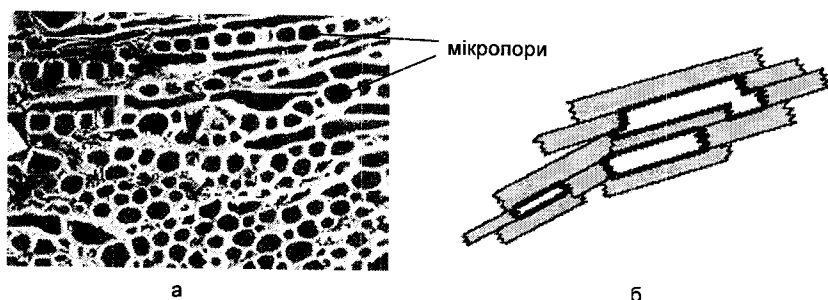


Рис. 4.2. Структура активованого вугілля (а) та схематичне зображення системи його пор (б)

радіус мікропор становить $5\text{--}20 \text{ \AA}$, за своєю формі вони близькі до клиноподібних і плоскопаралельних щілин. Макропори мають розміри більші ніж 500 \AA і є газотранспортними каналами, які забезпечують газовим молекулам доступ до мікропор. Мезопори (проміжні пори) мають лінійні розміри в межах від 20 до 500 \AA .

Ефективність активованого вугілля як сорбента визначається розмірами площі внутрішньої поверхні пор, доступної для сорбції. Зрозуміло, що величина цієї площі залежить від розмірів пор і є найбільшою для мікропор.

Залежно від особливостей пористої структури активоване вугілля поділяється на газові, рекупераційні та освітлювальні сорти. У вакуумній техніці для вакуумних адсорбційних насосів застосовується лише газове активоване вугілля сортів БАУ, АГ, СКТ та деякі ін. За структурою ці сорти вугілля переважно є мікропористими. Одним з найкращих сортів активованого вугілля для вакуумної техніки є активоване вугілля зі шкаралупин кокосових горіхів. Його характеристики близькі до вітчизняного вугілля СКТ. Для адсорбційних насосів використовують вугілля у вигляді гранул, спресованих з вугільного порошку. Протягом останніх $10\text{--}15$ років були створені вуглецеві сорбенти з унікальними властивостями – вуглецеве активоване волокно *Carbosieve* з розмірами мікропор $3\text{--}7 \text{ \AA}$ та АХ-21 з розмірами мікропор $3\text{--}20 \text{ \AA}$ і питомою поверхнею $3400 \text{ м}^2/\text{г}$, що наближає ці вуглецеві сорбенти до молекулярних сит.

У табл. 4.1 наведені деякі характеристики сортів активованого вугілля для адсорбційних насосів.

Таблиця 4.1. Деякі характеристики активованого вугілля

Марка	Насипна маса, г/см ³	Питома поверхня, м ² /г	Питомий об'єм мікропор, см ³ /г	Розмір гранул, мм
БАУ	0,22	650–700	0,23–0,35	1,0–3,5
АГ-2	–	700–800	–	2,00–2,75
СКТ	0,45	1300–1500	0,30–0,60	1,75–2,00
СКТ-2	0,50	1300–1500	0,40	–
3 кокосових горіхів	0,50	800–1050	–	–

Цеоліти – це синтетичні або природні мінерали (алюмосилікати) із загальною формулою



де M – лужний або лужноземельний метал;
 n, x, y – цілі числа.

Цеоліти, як мінерали, були відкриті близько 200 років тому. Свою назву „цеоліт” (камінь, що кипить) вони одержали внаслідок того, що при нагріванні ці природні мінерали зпучуються (закипають).

Через незначну кількість природних родовищ цих мінералів та їх невисоку поглинальну здатність та широке використання цеолітів у хімічній промисловості у другій половині ХХ століття були розроблені технології створення синтетичних аналогів природних цеолітів. Селективність адсорбції ними молекул певних речовин обумовлена наявністю тонких пор цілком конкретного розміру, унаслідок чого цеоліти поглинають одні молекули речовин і не поглинають інші залежно від їх геометричних розмірів (діаметр, довжина). Тому часто цеоліти називають молекулярними ситами.

Згідно із сучасними уявленнями про структуру цеолітів (рис. 4.3) вони мають кристалічну решітку, що складається з кремній-алюмокисневих кубооктаєдрів, зв'язаних між собою або у вигляді просторової кубічної структури (цеоліти типу А, рис. 4.3, б), або у вигляді більш рихлої тетраедральної структури (цеоліти типу Х, рис. 4.3, в).

Хімічна формула цеоліту NaA – $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4,5H_2O$. Його просторову структуру складають великі й малі адсорбційні порожнини (рис. 4.3 а, б). Великі порожнини мають майже сферичну форму

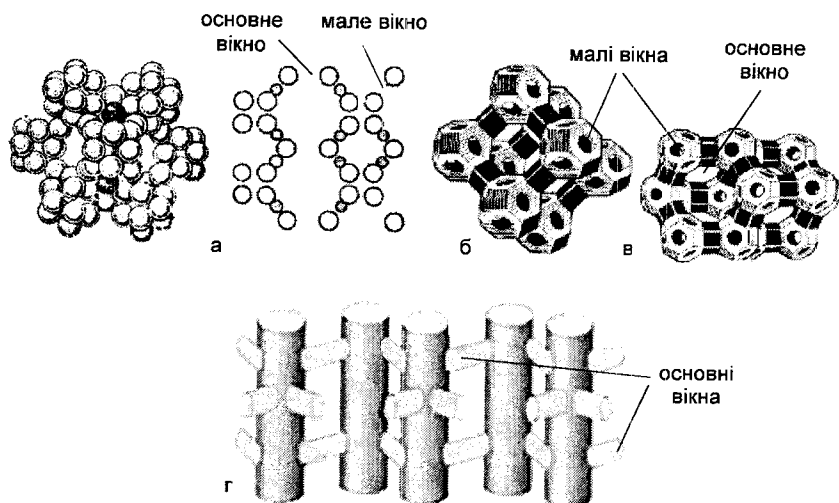
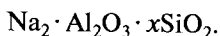


Рис. 4.3. Схематичне зображення структури цеолітів: а – атомна модель цеоліту типу А; б – просторова решітка цеоліту типу А; в – просторова решітка цеоліту типу Х; г – схематичне зображення адсорбційних порожнин цеолітів

діаметром 11,4 Å, малі – також сферичну форму діаметром 6,6 Å. Великі порожнини становлять майже 0,84 об'єму цеоліту. У великі порожнини ведуть вікна діаметром 4,2 Å, а в малі – вікна діаметром 2,2 Å. Оскільки малі адсорбційні порожнини практично недоступні для адсорбції газових молекул (дуже малі вікна), то основний доступ газових молекул здійснюється у великі порожнини через вікна діаметром 4,2 Å (основні вікна доступу).

Цеоліти типу Х у дегідратованому стані мають склад:



Велика порожнина діаметром близько 12 Å має чотири входи (вікна) діаметром 8–9 Å (рис. 4.3, в). Малі порожнини мають ті самі розміри й вікна, що і для цеолітів типу А. Оскільки основні вікна доступу для цеолітів типу Х мають більші діаметри, ніж для цеолітів типу А, така структура є більш доступною для проникнення газових молекул.

У 80-ті роки минулого століття були синтезовані цеоліти типу Е з хімічним складом $\text{Ca}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (цеоліт СаЕ). Цей цеоліт

має підвищену адсорбційну ємність за температури 77 К практично для всіх складових повітря.

Схематично модель адсорбційних порожнин цеолітів можна подати у вигляді просторової сітки з порожнин діаметром 11–12 Å, з'єднаних короткими мікропорами „вікнами” діаметром 4–9 Å, як зображено на рис. 4.3, г. Через вікна газові молекули потрапляють у порожнини, на внутрішній поверхні яких і відбувається їх адсорбція. Свою назву „молекулярні сита” цеоліти одержали унаслідок того, що діаметри вікон сумірні з розмірами газових молекул, і отже, через них можуть проходити і в подальшому адсорбуватися лише ті газові молекули, розміри яких не перевищують діаметрів вікон.

Розміри вікон визначаються природою катіону (Na- або Ca-) в алюмосилікатному скелеті. Після синтезу цеоліту його пори, як правило, заповнені молекулами води. Після високотемпературного прожарювання вода випаровується і у звільнені пори можуть бути сорбовані газові молекули.

Таким чином, пориста структура цеолітів відрізняється від пористої структури вуглецевих сорбентів чіткими розмірами пор для кожного типу цеоліта та наявністю вікон також строго фіксованих розмірів, які визначають доступність порожнин цеолітів для адсорбції газових молекул. Крім цього, на внутрішній поверхні пор знаходяться додатні іони алюмінію і кремнію. Унаслідок цього під час адсорбції полярних молекул газів (H_2O , CO та ін.), крім дисперсійних сил, в утриманні таких молекул суттєву роль відіграють і електростатичні сили, у результаті чого адсорбція полярних молекул зростає.

Характеристики структури низки цеолітів наведені в табл. 4.2.

Найбільш перспективними для потреб вакуумної техніки є нові цеоліти CaET та CaEH, ємність яких порівняно з цеолітами CaA та CaX значно більша (особливо для водню).

Цеоліти виготовляються у вигляді пресованих гранул різної форми. У вакуумній техніці використовуються в основному цеоліти у вигляді сферичних гранул діаметром 1,6–3,2 мм.

Силікагелі являють собою аморфну форму гідратованого кремнезему із загальною хімічною формулою $SiO_2 \cdot nH_2O$. Їх одержують у результаті взаємодії силікатів лужних металів з мінеральними кислотами. Під час висушування в них утворюється структурна сітка з частинок сферичної форми і дрібних пор між ними. Розміри пор становлять 10–70 Å залежно від способу термообробки. Питома внутрішня

Таблиця 4.2. Характеристики цеолітів

Характеристика	NaA	NaX	CaA	CaX	KA
Склад	натрій алюмо-силікат	натрій алюмо-силікат	кальцій алюмо-силікат	кальцій алюмо-силікат	–
Діаметр вхідних вікон, Å	4	8–9	5	7	3
Діаметр порожнин	11,4	11,6	11,4	11,6	11,4
Питома поверхня, м ² /г	750–800	1030	750–800	1000	–
Насипна маса, г/см ³	1,55	1,55	1,55	1,55	–
Максимальна адсорбція за азотом, л · Тор/г	118	140	120	140	118

площа пор досягає 500 м²/г, насипна густина 0,7 г/см³. Силікагелі є найдешевшими серед існуючих сорбентів. Вони найкраще поглинають пари води, але мають малу сорбційну ємність для більшості газів і тому як адсорбенти для одержання вакууму в адсорбційних насосах практично не використовуються. Здебільшого їх застосовують для осушування повітря в замкнених контейнерах.

Адсорбція газів за низьких температур. Незважаючи на те, що адсорбційні явища надзвичайно поширені в живій і неживій природі, на них сьогодні ґрунтуються багато промислових технологій і які інтенсивно досліджуються вже більше ніж 100 років, єдиної теорії, що досить повно й коректно описувала б усі види адсорбції, не існує.

Адсорбція молекул поверхнею твердого тіла відбувається завдяки силам притягання збоку частинок (атомів, молекул чи іонів), що знаходяться на поверхні. Оточення останніх є дещо іншим, ніж усередині об'ємної твердої фази (принаймні з одного боку вони не мають сусідів).

Схематично адсорбцію газових молекул поверхнею твердого тіла (чи шаром вже сорбованих молекул) можна зобразити таким чином (рис. 4.4).

Газові молекули, потрапляючи на поверхню твердого тіла, протягом деякого часу τ_a знаходяться на ній у зв'язаному стані. Час перебування в цьому стані τ_a визначається за формулою Френкеля

$$\tau_a = \tau_0 e^{\frac{\Delta Q_a}{RT}}, \quad (4.2)$$

де $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с, ΔQ_a – теплота адсорбції;
 T – температура поверхні;
 R – універсальна газова стала.

Універсальна газова стала залежить від природи поверхні і молекули та температури поверхні.

На початкових етапах сорбції газові молекули покривають поверхню не суцільним шаром (рис. 4.4, а), і нові молекули, що осідають на поверхню, займають вільні місця. Якщо ж вільних місць на поверхні вже не залишилося (утворився мономолекулярний шар (рис. 4.4, б)), шар з раніше сконденсованих молекул починає виконувати роль нової адсорбційної поверхні (полімолекулярна адсорбція (рис. 4.4, б, в)).

Найбільш часто експериментальні дослідження адсорбції проводять шляхом знаходження ізотерм адсорбції. *Ізотермою адсорбції* називають криву, що виражає залежність кількості поглинутого одиницею маси сорбенту газу a від тиску P даного газу над поверхнею сорбенту за сталої температури T (звідси і назва кривої – ізотерма)

$$a = f(P) \text{ за } T = \text{const}, \quad (4.3)$$

де $a = A/m$ – кількість газу, поглинутого одиницею маси адсорбенту;
 A – загальна кількість поглинутого газу;
 m – маса адсорбенту.

На рис. 4.5 зображені експериментальні ізотерми адсорбції повітря різними адсорбентами (цеоліти CaA, NaX, MnX, AgX, активоване вугілля СКТ-М).

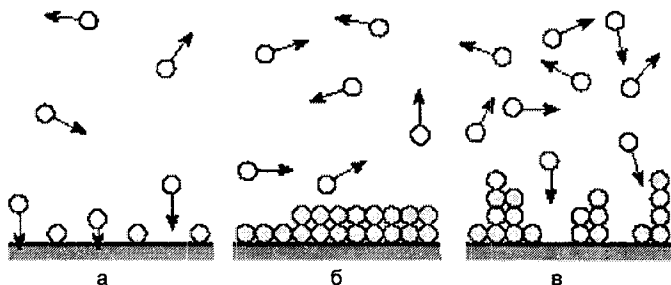


Рис. 4.4. Адсорбція молекул газу на поверхні твердого тіла:
 а – мала ступінь покриття; б – утворення моношару і початок полімолекулярної адсорбції; в – острівцева полімолекулярна адсорбція

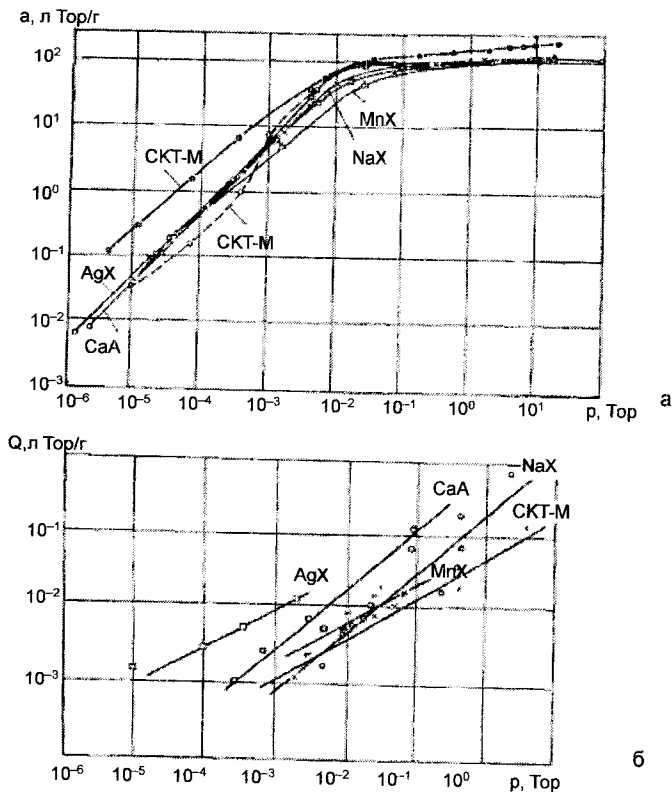


Рис. 4.5. Експериментальні ізотерми адсорбції повітря різними адсорбентами за температур 77 К (а) і 293 К (б)

Порівнюючи ізотерми, одержані за $T = 77 \text{ K}$ і $T = 293 \text{ K}$, легко доходить висновку, що ємність (кількість поглинутого газу) цих сорбентів за $T = 293 \text{ K}$ менша ніж за $T = 77 \text{ K}$ у кілька тисяч разів. Користуючись експериментальними ізотермами адсорбції, можна розрахувати граничний вакуум, створюваний адсорбційним насосом.

Швидкість дії і граничний вакуум адсорбційних насосів. Оскільки адсорбційні насоси не є газопереміщувальними (вони не відводять газові молекули за межі насоса, а поглинають їх), то й швидкість дії та

граничний вакуум таких насосів визначається в першу чергу готовністю і можливістю адсорбенту більш-менш швидко поглинути ту чи іншу кількість газових молекул. Максимальна кількість газових молекул, що може бути поглинута адсорбентом, визначається типом адсорбенту, його температурою, а також видом газу. Складність і неповнота сучасних теоретичних моделей адсорбції не дозволяє теоретично розрахувати швидкість дії і граничний вакуум адсорбційного насоса. Тому обидва ці параметри визначаються експериментально для конкретної конструкції насоса з використанням ізотерм адсорбції для конкретних адсорбентів і газів.

При конструюванні адсорбційних насосів у першу чергу звертають увагу на те, у якій області тисків повинен працювати даний насос – буде це насос для створення попереднього вакууму чи високого. Оскільки всі без винятку існуючі адсорбенти мають обмежену поглинальну здатність, до того ж вона зменшується в процесі роботи насоса (пори адсорбента заповнюються), швидкість дії адсорбційного насоса в цілому зменшується з часом. Лише в разі, якщо адсорбційна спроможність адсорбента велика порівняно з кількістю поглинутого газу, швидкість дії насоса протягом певного часу залишається незмінною.

Узагальнюючи численні експериментальні дані, можна стверджувати, що для насосів з активованим вугіллям типу СКТ початкова швидкість дії становить $S_0 \approx 1$ л/с на 1 грам сорбента (для повітря чи азоту) за температури сорбента 77 К. Слід зазначити, що ця величина орієнтовна і можливі її відхилення вбік більших значень приблизно в 10 разів залежно від області тисків газу. Як правило, швидкість дії адсорбційного насоса є сталою за тисків газів $P < 10^{-3}$ Па (10^{-5} Тор) і швидко зменшується за більших тисків.

Для адсорбційних насосів з адсорбентами-цеолітами швидкість дії є дещо меншою $(0,3-0,7)S_0$ залежно від типу цеоліту (приблизно в стільки ж разів менша їх питома площа пор). Оскільки за азотних температур гелій, неон і водень практично не адсорбуються жодним з розглянутих адсорбентів, швидкість відкачування цих газів практично є нульовою. Через це адсорбційні насоси є неефективними в динамічних вакуумних системах (системах з напусками газів, і особливо за наявності в складі газів He, Ne і H₂). При використанні адсорбційних насосів для створення попереднього вакууму, без вжиття запобіжних заходів, про які йтиметься нижче, граничне розрідження насоса визначатиметься парціальним тиском цих газів (перш за все неону) у повітрі.

Якщо йдеться про швидкість дії конкретного адсорбційного насоса, необхідно зауважити, що її величина значною мірою залежить ще від кількох факторів, головними з яких є наявність ефективного доступу газових молекул до кожної гранули сорбенту та ефективність відведення від кожної гранули сорбенту теплоти, що виділяється під час адсорбції газу. Можливо, значні розбіжності в експериментальних даних стосовно швидкості дії адсорбційних насосів пов'язані саме з цими факторами.

Граничний вакуум адсорбційного насоса можна розрахувати, користуючись ізотермами адсорбції для азотної і кімнатної температур (рис. 4.5). За низьких тисків експериментальна ізотерма адсорбції може бути подана в аналітичній формі у вигляді лінійного рівняння Генрі

$$a = K_T P, \quad (4.4)$$

де a – кількість газу, поглинутого одиницею маси адсорбенту;

P – тиск газу;

K_T – коефіцієнт пропорційності, що залежить від роду газу, температури адсорбенту та його типу а також області тисків газу.

Значення коефіцієнта K_T можна знайти безпосередньо з експериментальних ізотерм. Для ізотерм, наведених на рис. 4.5, значення K_T повітря наведені в табл. 4.3.

Як бачимо, значення коефіцієнтів K_T за температур $T = 77$ К більші за значення коефіцієнтів K_T за температур $T = 293$ К у тисячі разів.

При відкачуванні адсорбційним насосом кількість газу у вакуумній системі (відкачуваний об'єкт + насос) залишається незмінною, відбувається лише його перерозподіл – одна частина газу залишається

Таблиця 4.3. Середні значення коефіцієнтів K_T різних адсорбентів для повітря (діапазон тисків $10^{-2} - 10^{-6}$ Тор для температури адсорбенту $T = 77$ К,)

Адсорбент	K_{77} , л/г	K_{293} , л/г	Діапазон тисків для K_{293} , Тор
СКТ-М	16200	0,1	$10^1 - 10^{-3}$
Са А	5610	2,5	$10^1 - 10^{-4}$
Ag X	5000	30	$10^2 - 10^{-5}$
Na X	4460	0,31	$10^3 - 10^{-3}$
Mn X	3980	0,7	$10^1 - 10^{-2}$

в газовій фазі у відкачуваному об'єкті, а друга його частина знаходиться в адсорбованому стані в насосі.

Нехай об'єм насоса становить V_n , а об'єм відкачуваного об'єкта – V_k . Тоді повний об'єм системи дорівнює $V = V_n + V_k$. Позначимо через P_0 початковий тиск газу у відкачуваному об'єкті, а через P_1 – кінцевий (після відкачування) тиск газу в об'єкті. Запишемо рівняння, що виражає закон збереження кількості газу до і після відкачування для одиниці маси адсорбенту:

$$P_0 \vartheta + a_1(P_0) = P_1 \left(\vartheta_n \frac{T_1}{T_2} + \vartheta_k \right) + a_2(P_1) \quad (4.5)$$

де $\vartheta = \frac{V}{m}$, $\vartheta_n = \frac{V_n}{m}$ – об'єми системи і насоса, приведені до одиниці маси

адсорбенту, відповідно;

m – маса адсорбенту;

$T_1 = 293$ К, $T_2 = 77$ К – початкова і кінцева температури адсорбенту відповідно;

$a_1(P_0)$ і $a_2(P_1)$ – кількості газу, поглинуті одиницею маси адсорбенту за тисків P_0 і P_1 та температур T_1 і T_2 , відповідно.

Розв'язавши це рівняння відносно кінцевого (граничного) розрідження P_1 та скориставшись рівнянням Генрі (4), одержимо:

$$P_1 = P_0 \frac{\vartheta + K_1}{\vartheta_n \frac{T_1}{T_2} + \vartheta_k + K_2}, \quad (4.6)$$

де K_1 – коефіцієнт Генрі для адсорбенту за температури $T_1 = 293$ К;

K_2 – коефіцієнт Генрі для цього самого адсорбенту за температури $T_2 = 77$ К.

Значення коефіцієнтів Генрі K_1 і K_2 знаходять з експериментальних ізотерм адсорбції (для випадку ізотерм, наведених на рис. 4.6, значення $K_1 = K_{293}$ і $K_2 = K_{77}$ подані в табл. 4.3).

Відкачування за допомогою адсорбційних насосів здійснюється здебільшого за схемою (рис. 4.6). У відкачуванні беруть участь n насосів, приєднаних до вакуумної камери паралельно. Усі n насосів працюють почергово, забезпечуючи n циклів відкачування (після закін-

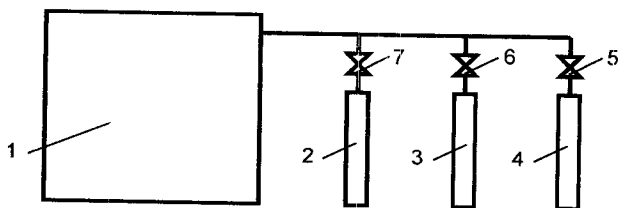


Рис. 4.6. Схема ступеневого відкачування адсорбційними насосами: 1 – вакуумна камера; 2–4 – адсорбційні насоси; 5–7 – вакуумні вентилі

чення роботи першого насоса він від'єднується від системи відповідним вентилем і починає роботу другий насос і т.д.).

Випадок 1. Об'ємом насосів порівняно з об'ємом вакуумної камери можна знехтувати ($V_k \gg V_n$, $V = V_k$), і насоси перед запуском не прогріваються.

Після першого циклу відкачування (перший насос відкачує камеру й інші $(n - 1)$ насоси) тиск P_1 визначається з рівняння, аналогічного рівнянню (4.5)

$$P_0 \vartheta + K_{293} P_0 n = P_1 \vartheta + K_{293} P_1 (n-1) + K_{77} P_1, \quad (4.7)$$

де $K_{293} P_0 n$ – кількість повітря, що знаходиться в сорбованому стані в насосах за початкового тиску P_0 та $T = 293$ К; $K_{293} P_1 (n - 1)$ – кількість повітря у сорбованому стані в $(n - 1)$ насосах за тиску P_1 та $T = 293$ К;

$\vartheta = \frac{V}{m}$ – об'ємне навантаження насоса (V – об'єм системи, m – маса адсорбента в насосі).

З цього рівняння одержуємо значення тиску повітря P_1 після роботи першого насоса

$$P_1 = P_0 \frac{\vartheta + n K_{293}}{\vartheta + (n-1) K_{293} + K_{77}}. \quad (4.8)$$

Після n -го циклу відкачування тиск повітря P_n становитиме

$$P_n = P_0 \left(\frac{1}{1+b_n} \right) \left(\frac{1}{1+b_{n-1}} \right) \dots \left(\frac{1}{1+b_1} \right), \quad (4.9)$$

$$\text{де } b_n = \frac{K_{77} - K_{293}}{\vartheta + nK_{293}}. \quad (4.10)$$

Формулу (4.9) можна спростити із запасом убік збільшення кінцевого тиску

$$P_n \approx P_0 \left(\frac{1}{1 + b_n} \right)^n. \quad (4.11)$$

Випадок 2. Об'ємом насосів порівняно з об'ємом вакуумної камери можна знехтувати, і насоси перед запуском прогрівуються до $T \approx 400\text{--}600\text{ К}$.

У цьому випадку рівняння (4.11) буде також справедливим, але для b_n необхідно прийняти новий вираз

$$b_n = \frac{K_{77}}{\vartheta}, \quad (4.12)$$

бо K_{293} порівняно з K_{77} є вже досить малою величиною (табл. 4.3), а $K_{400\text{--}600}$ буде ще меншою величиною, якою можна повністю знехтувати.

Розрахуємо граничний тиск повітря після триступеневого відкачування (рис. 4.6). Нехай адсорбентом є активоване вугілля СКТ-М і всі три насоси мають об'ємне навантаження $\vartheta = 1\text{ л/г}$. З табл. 4.3 знаходимо для СКТ-М $K_{77} = 16\ 200\text{ л/г}$ і $K_{293} = 0,1\text{ л/г}$. Граничний тиск P_3 , розрахований за формулою (4.11) за умови (4.10), становить $P_3 = 5 \cdot 10^{-8}\text{ Па}$, а за умови (4.12) – $P_3 = 2 \cdot 10^{-8}\text{ Па}$. Таким чином, прогрівання насосів перед роботою є необов'язковим, і воно в основному використовується для звільнення насосів від раніше поглинутого ними газу (регенерація).

Конструкція адсорбційно вугільного насоса. Найбільш широко адсорбційні насоси останніми десятиліттями застосовуються для створення попереднього розрідження (близько $P \approx 10^{-2}\text{ Па}$), необхідного для запуску електророзрядних безмасляних вакуумних насосів. Саме такі насоси є обов'язковим компонентом усіх сучасних безмасляних надвисоковакуумних установок.

У 80-ті роки на кафедрі фізики СумДПУ ім. А.С. Макаренка одним з авторів В.Б. Лободою разом з інженерами ВАТ „Selmi” було створено малогабаритний відкачний агрегат на базі двох адсорбційних вугільних насосів для одержання безмасляного попереднього (близько 10^{-2} Па) вакууму при відкачуванні вакуумних систем об'ємом до 20 л (камера аналізатора мас-спектрометра, магніторозрядні насоси та низка технологічних стендів при виробництві мас-спектрометрів). Агрегат був упроваджений у виробництво і виготовляється до цього часу в різних модифікаціях.

Зовнішній вигляд одного з варіантів такого агрегату поданий на рис. 4.7. Агрегат складається з двох однакових адсорбційних вугільних насосів (1), приєднаних до вакуумних вентилів ДУ-12 (4) через фланець з металевим ущільнювачем (мідна прокладка).

До корпусу вентиля приварений патрубок з пружинним клапаном (3) випуску газу під час регенерації насоса. Вакуум у системі вимірюється за допомогою манометричного перетворювача ПМТ-6 або ПМТ-4. До відкачуваної системи агрегат приєднується за допомогою патрубка ДУ-12 із фланцем (6) з ущільненням мідною прокладкою.

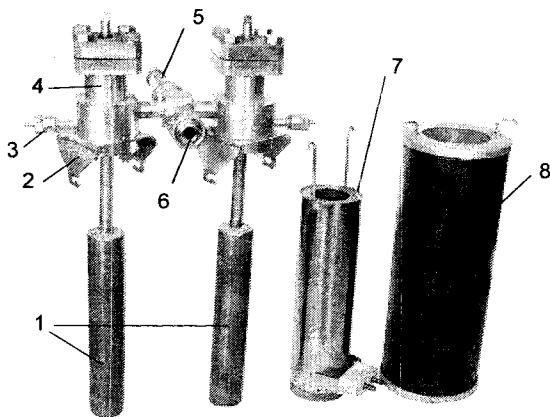


Рис. 4.7. Адсорбційний агрегат ВАТ „Selmi”: 1 – адсорбційний насос; 2 – кронштейн; 3 – клапан випуску газу; 4 – вакуумний вентиль ДУ-12; 5 – манометричний перетворювач; 6 – приєднувальний фланець; 7 – електропіч; 8 – ємність для рідкого азоту

Регенерація активованого вугілля здійснюється за допомогою електропечі (7). Корпус насоса і адсорбент охолоджується рідким азотом ($T = 77 \text{ K}$), який заливається в резервуар (8), виготовлений з піноматеріалу з малим коефіцієнтом теплопровідності. Електропіч або резервуар для рідкого азоту закріплюються в робочому положенні за допомогою кронштейна (2).

Конструкція адсорбційного вугільного насоса схематично подана на рис. 4.8. Основою корпусу насоса (2) є тонкостінна труба з нержавіючої сталі X18H10T. Зовнішній діаметр корпусу насоса становить 40 мм, висота – 220 мм. Для інтенсифікації процесу охолодження адсорбента в корпус вварена г-подібна тонкостінна трубка (3) діаметром 12 мм. Усередину корпусу засипається вугільний адсорбент (4). За допомогою фланця (1) насос приєднується до вентиля ДУ-12 (рис. 4.7). У кожному з насосів розміщено близько 100 г активованого вугілля СКТ-М або СКТ-2. Цієї кількості адсорбента (з розрахунку, що максимальна адсорбційна ємність активованого вугілля даних сортів становить $a_m \approx 160 \text{ л} \cdot \text{Тор/г}$) цілком достатньо для одноразового відкачування одним насосом основної маси повітря з вакуумної системи об'ємом до $V = 20 \text{ л}$.

Регенерація адсорбента відбувається при нагріванні корпусу насоса до температури 150–200 °С протягом 2–3 годин (залежно від передісторії адсорбента). Оскільки власний об'єм насоса становить лише $V_n = 0,25 \text{ л}$, то після відкачування системи об'ємом 20 л від атмосферного тиску при відігріванні до кімнатної температури все це повітря виділиться з адсорбента і створить у насосі тиск близько 80 атм. Такий тиск може призвести до руйнування корпусу насоса. Для запобігання цьому небезпечному явищу слугує пружинний клапан випуску газу (3) (рис. 4.8), який спрацьовує при зростанні тиску повітря в насосі до 1,2 атм.

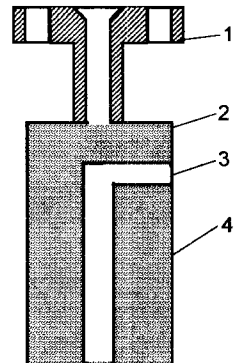


Рис. 4.8. Адсорбційний насос ВАТ „Selmi”:
1 – приєднувальний фланець; 2 – корпус насоса;
3 – г-подібна трубка; 4 – адсорбент

Електропіч (7) (рис. 4.7) являє собою двостінний стакан з нержавіючої сталі, між стінками якого розміщений ніхромовий нагрівник потужністю 250 Вт. Витрати рідкого азоту при відкачуванні вакуумної системи об'ємом 20 л до розрідження 10^{-2} Па становлять близько 5 л. Час відкачування системи до такого розрідження складається з часу охолодження адсорбента (близько 20 хв) і власне часу, протягом якого відбувається відкачування – близько 20 хв.

Під час регенерації, після того як спрацював клапан випуску газу (3), його необхідно розібрати і зняти з патрубку виходу газу (як ущільнювальний елемент клапана використовується гумовий диск діаметром 10 мм, який небажано нагрівати до температур більше ніж 100 °С). Після закінчення регенерації клапан збирається і закривається. Після цього електропіч знімається з кронштейнів насоса і насос охолоджується до кімнатної температури. У закритому стані насос зберігає адсорбційну здатність протягом багатьох днів, тому немає необхідності знову прогрівати його перед роботою.

Особливості експлуатації адсорбційних насосів. Перш ніж розглядати особливості експлуатації адсорбційних насосів, слід більш докладно зупинитися на результатах граничного розрідження адсорбційних насосів, одержаних вище.

Наведені результати для граничного розрідження $P = (2 - 5) \cdot 10^{-8}$ Па, на жаль, реально не можуть бути досягнуті з певних причин, основна з яких – наявність у повітрі He, Ne і H_2 – газів, критичні температури яких набагато менші за $T = 77$ К. Для відкачування повітряної суміші (особливо для багатоступеневої системи) вагомим чинником є недостатня адсорбційна ємність усіх відомих адсорбентів за $T = 77$ К для цих газів. У результаті цього граничний тиск, одержаний за допомогою тільки адсорбційних насосів, визначається парціальним тиском несорбованих газів, і в першу чергу неону (парціальний тиск неону серед цих газів у атмосферному повітрі найбільший і становить 1,83 Па, гелію – $5,4 \cdot 10^{-1}$ Па, водню – $5,1 \cdot 10^{-2}$ Па).

Сорбційна ємність цеоліту CaA для водню приблизно в 10^3 разів менша, ніж для азоту. Аналогічною є картина і для неону та гелію – сорбційна ємність цеоліту для них також у тисячі разів менша, ніж для азоту.

З активованим вугіллям ситуація така сама – сорбційна ємність для цих трьох газів також у тисячі разів менша, ніж для азоту. Більш-менш ефективна адсорбція гелію, неону та водню може відбуватися лише за температур менших ніж 20 К.

Як адсорбент, активоване вугілля типу СКТ має низку переваг перед цеолітами з точки зору одержання максимального розрідження та зручності експлуатації адсорбційних насосів. По-перше, адсорбційна ємність активованого вугілля СКТ є найбільшою серед усіх існуючих адсорбентів. За атмосферного тиску воно має незначну адсорбційну здатність до молекул водяної пари, тому насоси першого ступеня відкачування не потребують прогрівання до високих температур. Цеолітовий насос, який працює як насос першого ступеня відкачування, обов'язково необхідно прогрівати перед початком роботи, оскільки полярні молекули водяної пари надійно блокують вхідні вікна (рис. 4.3) і не дають молекулам інших газів проникати через них в адсорбційні порожнини цеолітів.

Після того, як адсорбент набув стану насичення, його необхідно регенерувати, тобто видалити з нього сорбований газ. Регенерацію можна здійснити в різні способи, з яких найбільш поширеним є спосіб нагрівання адсорбенту до 300–500 °С з одночасним відкачуванням газу, що звільняється, механічним або дифузійним насосом. Залежно від конструкції насоса нагрівання адсорбенту можна здійснити різними методами: за допомогою газоподібного теплоносія, за допомогою височастотних електромагнітних полів, за допомогою електроречей та ін.

Адсорбент у насосах невеликих розмірів і нескладних геометричних форм найчастіше регенерують за допомогою електричних нагрівників, розташованих або безпосередньо в самому насосі, або в невеликих зйомних електроречах, у які поміщається весь насос.

Цеоліт регенерується нагріванням до температур 400–600 °С з одночасним відкачуванням високовакуумним насосом протягом 10–20 годин.

Активоване вугілля регенерується за найбільш низьких температур 150–200 °С протягом кількох годин. Свіже активоване вугілля, як і цеоліти, адсорбувало значні обсяги водяної пари з повітря, тому перше його нагрівання супроводжується випаровуванням з вугілля значної кількості води і триває близько 10 годин. Цю процедуру бажано проводити, розмістивши і вугілля і цеоліт не в насосі, а в окремій посудині, а в насос його необхідно засипати після першого нагрівання.

Адсорбційні насоси в основному слугують для безмасляного попереднього відкачування систем від атмосферного тиску. Для цього, як правило, використовують кілька (мінімум два) адсорбційних насосів, приєднаних до системи через відповідні вентиля. Залежно від конкретних умов насоси працюють або одночасно (паралельно), або

почергово. У разі почергової роботи насосів один з них („чорновий”) починає працювати з атмосферного тиску. „Чорновий” насос ефективніше працює з адсорбентом – активованим вугіллям (краще марок СКТ), оскільки за атмосферного тиску та кімнатних температур активоване вугілля має незначну адсорбційну спроможність до молекул води, чого не можна сказати про цеолітові адсорбенти. Крім того, температури регенерації вуглецевих адсорбентів становлять 150–200 °С проти 400–600 °С для цеолітів.

Як уже зазначалося, і одно- і багатоступеневе відкачування адсорбційними насосами об'єктів від атмосферного тиску забезпечує досягнення граничного тиску, який визначається сумою парціальних тисків гелію, неону і водню, що для повітря становить 1,83 Па ($1,4 \cdot 10^{-2}$ Тор). Практично граничний тиск, створюваний адсорбційними насосами, близький до цієї величини. За відсутності цих компонент у повітрі (відкачуваний об'єм заповнений, наприклад, азотом) розрахунковий (за ізотермою адсорбції) граничний тиск становив би 10^{-1} – 10^{-2} Па при одноступеневому відкачуванні та 10^{-8} Па при двоступеневому відкачуванні від атмосферного тиску.

Один з методів одержання більш низького граничного тиску полягає в заміні повітря або „промиванні” вакуумної системи перед її відкачуванням газом, що легко адсорбується, наприклад, азотом, вуглекислим газом тощо. Граничне розрідження в цьому випадку є набагато кращим і визначається в здебільшому газовиділенням з внутрішніх елементів вакуумної системи водню.

Значного зниження граничного тиску при адсорбційному відкачуванні можна досягти шляхом відкачування основної маси повітря з об'єкта (від атмосферного тиску до кількох Тор) за допомогою будь-яких газопереміщувальних насосів (механічні, водоструменеві, ежекторні). Оскільки розрідженню в кілька Тор (кілька сотень Па) відповідає нижня межа в'язкісного режиму течії газу, то міграція парів масел з насоса у відкачуваний об'єкт повністю виключається, а ці насоси досить ефективно відкачують при таких тисках ті складові повітря, які не поглинаються в адсорбційному насосі.

Існує ще один надзвичайно простий і оригінальний метод підвищення ефективності двоступеневого відкачування від атмосферного тиску лише адсорбційними насосами, який використовує так званий „ефект кріозахоплення”. Його сутність полягає в тому, що „чорновий” насос відкачує вакуумну систему та адсорбційний „чистовий”

насос не до максимально можливого розрідження (близько 10^{-2} Тор), а до тиску близько 1 Тор (нижня межа в'язкісного режиму течії газу). У процесі його роботи відкачуване повітря надходить у насос зі збереженням свого складу. У насосі поглинаються складові повітря, що адсорбуються за $T = 77$ К і накопичуються ті його складові, що не адсорбуються за $T = 77$ К (неон, водень, гелій). При цьому тиск останніх у насосі збільшується, а у відкачуваному об'єкті зменшується. Обернена дифузія цих газів з насоса в об'єкт ускладнюється через ламінарну течію основної маси газу в насос та досить високого тиску. Зі зниженням тиску коефіцієнт дифузії не адсорбованих у насосі газів зростає і при встановленні молекулярного режиму течії газу ($P \approx 10^{-2}$ Тор і менше) концентрації неадсорбованих газів у насосі й у відкачуваному об'єкті вирівнюються дуже швидко. Переривання відкачування об'єкта „чорновим” насосом при досягненні в ньому розрідження близько 1 Тор дозволяє не випустити неадсорбовані гази з „чорнового” насоса, що дає можливість насосу другого ступеня створити більш низький остаточний тиск в об'єкті і досягти граничного розрідження 10^{-4} Тор (10^{-2} Па).

Намагання отримати якомога краще розрідження за допомогою „чорнового” насоса (10^{-2} Тор, а не 1 Тор) призводить до того, що насос другого ступеня практично не допомагає покращити отримане в об'єкті розрідження (хоча парціальний тиск складових, що адсорбуються, і знижується) і результуюче розрідження залишається на рівні 10^{-2} Тор (залишкова атмосфера збагачена неоном, гелієм і воднем, які не адсорбувалися за $T = 77$ К). На рис. 4.9 наведені експериментальні залежності зміни тиску у відкачуваному об'єкті з часом за різних варіантів відкачування. У випадку відкачування з викорис-

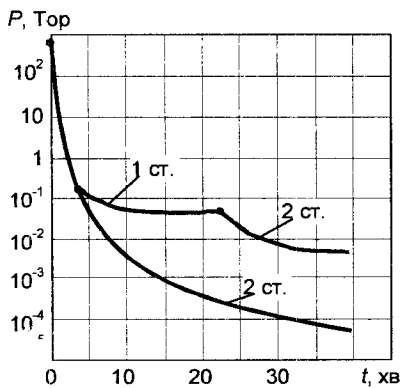


Рис. 4.9. Експериментальні залежності зміни тиску у відкачуваному об'єкті з часом за різних варіантів відкачування

танням „ефекту криозахоплення” граничний вакуум, створений насосом другого ступеня, майже на два порядки кращій.

Однією з найцінніших властивостей адсорбційних насосів є можливість багаторазового (багато сотень разів) використання одного й того самого адсорбента без його заміни. Ця властивість базується на оборотності явища фізичної адсорбції, і після нагрівання адсорбента до кімнатної температури практично весь адсорбований ним газ виділяється. Виняток становлять гази і пари, які добре сорбуються за кімнатної температури. Для цеолітів це в першу чергу пари H_2O , CO , деякі органічні речовини. При чергуванні адсорбція – десорбція (до кімнатної температури) ці речовини накопичуються в адсорбенті (їх молекули закупорюють вхідні вікна цеоліту), що призводить до поступового зниження його адсорбційної здатності. Тому необхідно періодично проводити температурну регенерацію адсорбенту, нагріваючи його до температури 150–200 °С (активоване вугілля) або до 400–600 °С (цеоліти). Для насосів попереднього відкачування з цеолітовим адсорбентом температурну регенерацію „чорнових” насосів необхідно виконувати щоразу після закінчення циклу їх роботи. Насоси другого ступеня регенерують нагріванням до 400–600 °С у випадку, коли стає помітним зниження їх сорбційної ємності

Оскільки насоси з вуглецевими адсорбентами мають дуже низьку адсорбційну здатність щодо молекул води та інших полярних молекул, то обов’язкової температурної регенерації ні „чорнові”, ні „чистові” насоси не потребують після кожного циклу відкачування. Вони практично повністю звільняються від поглинутих газів при відігріванні до кімнатної температури. У цьому плані адсорбційні насоси з адсорбентом – активованим вугіллям є набагато простішими в експлуатації, ніж цеолітові.

На жаль, у процесі роботи, особливо в „чорнових” насосах, і вуглецеві, і цеолітні адсорбенти через тертя (на початку відкачування та регенерації) розкришуються і в насосі з’являються частинки дрібного пилу, який може проникати у відкачувані об’єкти. Для запобігання забруднення відкачуваних об’єктів цим пилом на вході в адсорбційні насоси встановлюють різні фільтри.

Завдання до роботи

1. Ознайомитися з технічними характеристиками та конструкцією відкачного агрегату у складі двох адсорбційних вугільних насосів (рис. 4.7).
2. Ознайомитися з конструкцією вакуумної установки (рис. 4.10) та приладами для вимірювання вакууму (манометричні перетворювачі ПМТ-2, ПМТ-4М, ПМТ-6, вакуумметри ВТ-2А та 13ВРТ).
3. Одержати і виміряти форвакуум у вакуумній камері. Побудувати криву відкачування вакуумної камери $P = P(t)$.
4. Розрахувати швидкість відкачування камери насосом першого ступеня та насосом другого ступеня.

Хід роботи

1. Закріпити за допомогою кронштейнів (2) (рис. 4.7) на обох насосах (1) ємності для рідкого азоту (8).
2. Перевірити стан вакуумних вентилів (4). Обидва вентиля повинні знаходитися в закритому (вправо до упору) стані. Перевірити стан клапанів випуску газу (3). Обидва клапани мають бути зібрані й закриті.
3. Дуже обережно (не допускаючи розливання) за допомогою спеціальної кружки заповнити обидві ємності (8) рідким азотом з посудини Д'юара.

Увага! Рідкий азот має дуже низьку температуру ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), і його потрапляння на відкриті ділянки шкіри спричиняє важкі опіки.

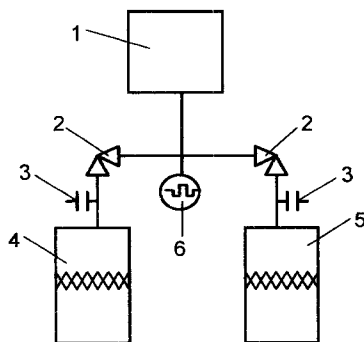


Рис. 4.10. Принципова схема вакуумної установки: 1 – вакуумна камера; 2 – кутівий вакуумний вентиль ДУ-12; 3 – клапан виходу газу; 4 – адсорбційний насос першого ступеня („чорновий”); 5 – адсорбційний насос другого ступеня; 6 – тепловий манометричний перетворювач

4. Охолодити корпуси адсорбційних насосів протягом 10–15 хв до робочої температури. У перші хвилини охолодження рідкий азот бурхливо википає, тому необхідно обережно доливати його в ємності. Охолодження насоса закінчується, коли рідкий азот в охолоджувальній ємності перестає бурхливо кипіти.
5. Увімкнути вакуумметр, установити необхідний струм розжарення нагрівника манометричного перетворювача і перевести вакуумметр у режим вимірювання вакууму.
6. Плавню відкрити вентиль „чорнового” насоса (насоса першого ступеня). Увімкнути секундомір. Відкачати вакуумну камеру до тиску $P \approx 1 \text{ Тор} \approx 100 \text{ Па}$ (на це потрібно 3–5 хвилин. Закрити вентиль „чорнового” насоса). Результати вимірювань занести в зошит.
7. Відкрити вентиль насоса другого ступеня, увімкнути секундомір, провести вимірювання розрідження у вакуумній камері. Результати вимірювань занести в табл. 4.4. Побудувати криву відкачування (аналогічну зображеній на рис. 4.9).

Користуючись формулою

$$S_{\text{еф}} = \frac{V}{t_2 - t_1} \ln \frac{P_1}{P_2}$$

(див. розділ „Швидкість відкачування” лабораторної роботи № 3), обчислити значення ефективної швидкості відкачування $S_{\text{еф}}$ кожного з насосів. (установивши попередньо об’єм V вакуумної камери). Результати обчислень занести в табл. 4.4. Побудувати графік залежності $S_{\text{еф}} = S_{\text{еф}}(P)$ для насоса другого ступеня.

Таблиця 4.4. Результати вимірювань $P = P(t)$

$t, \text{с}$	$P, \text{Тор}$	$\lg P$	P_1	P_2	$t_2 - t_1$	$S_{\text{еф}}$

Зміст звіту

1. Будова адсорбційного насоса та принцип його роботи. Схема установки.
2. Основні формули.
3. Результати вимірювань і розрахунки (табл. 4.4).
4. Графіки $P(t)$, $S_{ef} = S_{ef}(P)$.
5. Висновки.

Запитання для самоперевірки

1. У чому полягає явище адсорбції газів за низьких температур?
2. Що таке ізотерми адсорбції? Які ділянки ізотерм адсорбції описуються законом Генрі?
3. Яку конструкцію мають адсорбційні вакуумні насоси для одержання форвакууму?
4. Охарактеризуйте адсорбенти для вакуумних насосів (активоване вугілля, цеоліти). У чому полягають відмінності в їх будові та механізмах сорбції?
5. Назвіть способи підвищення ефективності роботи адсорбційних насосів. Від чого залежить граничний вакуум адсорбційних насосів?

Література: [4–7].

Вивчення конструкції паромасляного дифузійного насоса та одержання високого вакууму

Мета роботи: ознайомитися з конструкцією та принципом роботи дифузійного паромасляного насоса, навчитися одержувати високий вакуум, розраховувати ефективну швидкість відкачування паромасляного насоса.

Обладнання: дифузійний паромасляний насос Н-100 у розібраному стані, технічна документація на насос, вакуумна установка УВЛ-8, секундомір.

Теоретичний матеріал

Пароструменеві вакуумні насоси. Пароструменеві дифузійні вакуумні насоси до середини ХХ століття були практично єдиними вакуумними насосами, що дозволяли отримувати розрідження, кращі за 10^{-3} Па (10^{-5} Тор). Поява в другій половині ХХ ст. нових типів насосів високого і надвисокого вакууму (турбомолекулярних, електрофізичних, кріогенних) значно звузила діапазон застосування пароструменевих насосів, але й до цього часу вони (завдяки винятковій простоті конструкції, малим трудозатратам при виготовленні, низькій вартості, надзвичайно високій надійності в роботі й практично необмеженого строку служби) широко використовуються в промисловості, техніці і наукових дослідженнях. Пароструменеві насоси виготовляють практично всі провідні світові виробники вакуумної техніки.

За принципом дії пароструменеві вакуумні насоси можна вважати молекулярними, бо в них молекули відкачуваного газу механічно взаємодіють зі струменем пари робочої рідини (масла або ртуті), який рухається з високою швидкістю. На відміну від рухомих елементів (ди-

сків, лопаток) механічних молекулярних насосів, примусити рухатися зі швидкістю 300–400 м/с струмінь пари робочої рідини набагато простіше. Тому пароструменеві насоси мають надзвичайно просту конструкцію і їх масове виготовлення стало можливим вже на початку ХХ століття.

Пароструменеві вакуумні насоси призначені для створення і підтримання розріджень до 10^{-12} Тор (10^{-10} Па). Залежно від області робочих тисків та особливостей взаємодії молекул відкачуваного газу й парового струменя розрізняють три види таких насосів:

- *ежекторні*: $760-10^{-2}$ Тор (10^3-1 Па);
- *бустерні*: $10^{-1}-10^{-4}$ Тор ($10-10^{-2}$ Па);
- *дифузійні*: нижче ніж 10^{-4} Тор (10^{-2} Па).

Незважаючи на різні діапазони робочих розріджень та відмінності в конструктивному оформленні, принципова схема роботи цих насосів однакова. На рис. 5.1 подана спрощена схема першого пароструменевого дифузійного насоса Ленгмюра, яка ілюструє роботу насосів з власним кип'ятильником робочої рідини.

У кип'ятильнику (7) знаходиться робоча рідина (ртуть або вакуумне масло). За допомогою нагрівника (8) рідина в кип'ятильнику нагрівається до температури, за якої вона інтенсивно кипить. Утворена пара по паропроводу (1), стінки якого добре теплоізолювані, рухається до сопла (2), з якого вилітає з великою швидкістю у вигляді розбіжного конічного струменя в робочу камеру насоса (4). У робочій камері струмінь пари захоплює газові молекули, що надходять через вхідний отвір (3), і разом з ними потрапляє на стінку робочої камери, яка охолоджується проточною

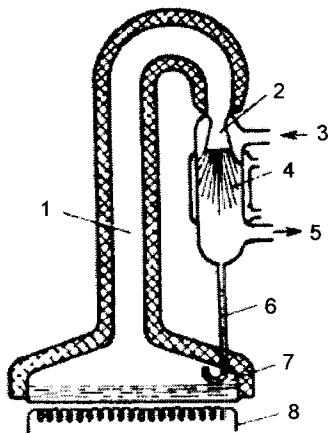


Рис. 5.1. Принципова схема роботи пароструменевого насоса: 1 – паропровід; 2 – сопло; 3 – вхідний отвір; 4 – робоча камера; 5 – вихідний отвір; 6 – трубка повернення конденсату; 7 – кип'ятильник; 8 – нагрівник

водою. На стінці камери пара конденсується, й утворена рідина (конденсат) стікає по трубці (6) знову в кип'ятильник. Звільнені молекули газу накопичуються в нижній частині робочої камери й відкачуються через вихідний отвір (5) механічним насосом попереднього розрідження (форнасосом).

У перших дифузійних насосах як робочу рідину використовували ртуть, метал, який за кімнатної температури, на відміну від усіх інших металів, перебуває в рідкому стані. За температур, нижчих ніж $-38,9\text{ }^\circ\text{C}$, ртуть стає твердим тілом. Кипить ртуть за досить низької (як для металів) температури – $356,7\text{ }^\circ\text{C}$. З огляду на порівняно прості методи її очищення й високу однорідність складу, то вона є майже ідеальною робочою рідиною (з термодинамічних міркувань) для пароструменевих дифузійних насосів. Крім цього, ртуть мало розчиняє газу, не взаємодіє з ними, є термічно стабільною.

У переважній більшості сучасних пароструменевих насосів як робочі рідини використовують спеціальні вакуумні масла (як продукти переробки нафти, так і синтетичні).

Для ефективного захоплення газових молекул струменем пари в робочій камері (4) (рис. 5.1) необхідно, щоб струмінь пари під час взаємодії з молекулами газу мав швидкість, сумірну із середньою швидкістю хаотичного руху молекул газу $\tilde{v} = \sqrt{8kT/\pi m}$. З огляду на принципову схему пароструменевого насоса (рис. 5.1), неважко зрозуміти, що таку швидкість струмінь пари одержує в результаті проходження через спеціальний елемент конструкції насоса – сопло (2), яке являє собою відрізок труби змінного перерізу, як показано на рис. 5.2.

З газодинаміки відомо, що в соплі, яке звужується (рис. 5.2, а), тиск пари, що рухається по ньому в напрямку, зазначеному стрілкою, зменшується, а швидкість руху парового потоку збільшується. Мак-

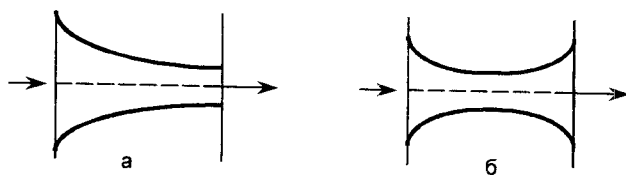


Рис. 5.2. Схеми сопел: а – сопло зі звуженням; б – сопло Лаваля

симальна швидкість руху парового потоку v_n , яка може бути досягнута в такому соплі, є швидкість звуку $v_{3\theta}$.

У соплі Лаваля (із розширенням) (рис. 5.2, б) у найменшому його перерізі максимальна швидкість парового струменя досягає швидкості звуку ($v_n = v_{3\theta}$), а в розширеній його частині швидкість v_n збільшується і стає надзвуковою. Залежно від форми сопла Лаваля таке збільшення може становити $M = 3$, проте, як правило, для більшості сопел, що використовуються в пароструменевих насосах, $M = 1,5-2$ (M – число Маха).

Оскільки швидкість звуку в газі становить

$$v_{3\theta} = \sqrt{\gamma P / \rho},$$

- де γ – адиабатична стала;
 $P = nkT$ – тиск газу;
 $\rho = mn$ – густина газу;
 n – концентрація газових молекул;
 m – маса молекули газу;
 k – стала Больцмана,

то, виразивши $v_{3\theta}$ через \tilde{v} , одержимо

$$v_{3\theta} \approx \sqrt{\frac{\pi\gamma}{8}} \tilde{v} \approx 0,7\tilde{v}. \tag{5.1}$$

Таким чином, за допомогою сопел досить просто досягти швидкостей парового струменя, сумірних і навіть більших, ніж \tilde{v} .

Ежекторні пароструменеві насоси

Як уже зазначалося, ежекторні насоси створюють розрідження 10^5-1 Па ($760-10^{-2}$ Тор), як правило, ці насоси слугують для відкачування великих кількостей газів з вакуумних установок з таким робочим тиском. У ежекторних насосах відкачуваний газ захоплюється надзвуковим струменем пари робочої рідини, причому одна частина газових молекул одержує імпульс у напрямку руху струменю пари внаслідок зіткнення з молекулами пари, а друга частина газових молекул поглинається струменем пари, тобто всередині струменю пари парціальний тиск газу нижчий, ніж у просторі навколо струменя. Як робочу рідину для створення парового струменя використовують воду, ртуть

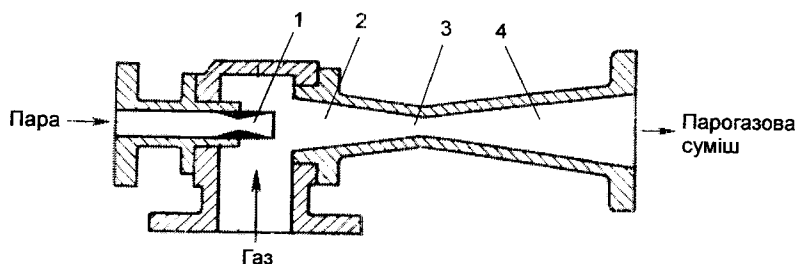


Рис. 5.3. Схематичне зображення ежекторного парового насоса: 1 – сопло; 2 – камера змішування; 3 – горловина; 4 – дифузор

та вакуумні масла. Схематично будова ежекторного парового насоса зображена на рис. 5.3.

Пара під високим тиском витікає через сопло (1) з надзвуковою швидкістю у вигляді турбулентного або ламінарного струменя (за таких робочих тисків мають місце саме такі струмені). Унаслідок турбулентного перемішування (при турбулентному струмені) у камері змішування (2) вихрові маси парового струменя захоплюють молекули газу й спрямовують їх у її звужену частину (конфузор). Саме тут відбувається перемішування газу й пари. У разі ламінарного струменя пари захоплення молекул газу відбувається в результаті в'язкого тертя між граничним шаром струменя пари й молекулами газу, що контактують з ним.

У результаті обміну енергіями при змішуванні тиск відкачуваного газу зростає, а швидкість його потоку зменшується. Для одержання більш високого вихідного тиску слугує дифузор (4) – частина труби з розширенням. У цій частині насоса потік газопарової суміші гальмується, що супроводжується зростанням тиску.

Як правило, одиний такий ежекторний ступінь стискує газ у 5–10 разів. Ежекторні паромасляні й парортутні ступені у вакуумній техніці здебільшого використовуються як вихідні ступені дифузійних насосів з метою підвищення випускного тиску цих насосів. Як самостійні насоси використовуються лише пароводяні ежекторні насоси.

Дифузійні пароструменеві насоси. Дифузійні пароструменеві насоси використовуються для створення розрідження 10^{-4} – 10^{-7} Тор (10^{-2} – 10^{-5} Па) і краще. За таких тисків середня довжина вільного пробігу

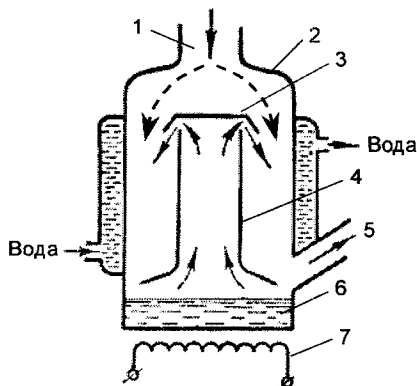


Рис. 5.4. Схематична будова дифузійного насоса: 1 – вхідний отвір; 2 – корпус насоса; 3 – тарілка-відбивач; 4 – паропровід; 5 – вихідний отвір; 6 – кип'ятильник; 7 – електронагрівник

молекул відкачуваних газів більша за діаметр вхідного отвору насоса, а тому на вході в насос має місце молекулярний режим протікання газу. Схематично будова найпростішого сучасного дифузійного насоса наведена на рис. 5.4.

У металевому циліндричному корпусі насоса (2), який охолоджується проточною водою, розташований паропровід (4) та відбивач пари (3) у формі тарілки. Паропровід разом з відбивачем утворюють сопло Лавалю. Це сопло еквівалентне зображеному на рис. 5.2, б, але паровий струмінь у ньому повертається на 180° щодо свого початкового напрямку руху. Таким чином, порівняно з першим насосом Ленгмюра (рис. 5.1) сопло Лавалю сучасних насосів не тільки створює надзвукову швидкість руху парового струменя, а й повертає його, спрямовуючи до стінок насоса. У нижній частині насоса (рис. 4) у кип'ятильнику (6) знаходиться робоча рідина, яка нагрівається до кипіння за допомогою електричного нагрівника (7).

Під час кипіння робочої рідини молекули пари рухаються паропроводом (4) угору (як показано стрілками) і після відбивання тарілкою (3) спрямовуються на охолоджувану проточною водою стінку корпусу насоса. На стінці пара конденсується в рідину, що стікає в нижню частину насоса, де знову нагрівається, закипає, випаровується й спрямовується в паропровід.

Як уже зазначалося, за робочих розріджень даного насоса у верхній його частині молекули газу рухаються хаотично в молекулярному режимі (практично не стикаючись одна з одною). Певна їх частина

при цьому рухається вниз і потрапляє в паровий струмінь, який має форму конуса. Зіткнувшись з важкими молекулами пари, які мають надзвукові швидкості, частина газових молекул одержує імпульс у напрямку до стінки насоса, тобто „захоплюється” струменем пари й вноситься паром до стінки насоса. Таким чином, на відміну від насоса Ленгмюра (рис. 5.1), де робоча камера (місце взаємодії молекул газу і пари) була окремим елементом конструкції насоса, у сучасних насосах практично вся порожнина насоса є робочою камерою.

Назва насоса „дифузійний” підкреслює механізм захоплення газових молекул струменем пари – дифузію газу у струмінь, яка відбувається внаслідок різниці концентрацій газових молекул над струменем і в самому струмені (поблизу сопла, біля тарілки, концентрація газових молекул у струмені пари практично дорівнює нулю). Швидкість дифузії газових молекул є найбільшою біля тарілки (тут найбільший градієнт концентрації газових молекул). У міру віддалення від тарілки (до стінки насоса) струмінь пари насичується газом, градієнт концентрації газових молекул зменшується, відповідно зменшується й швидкість дифузії газу в паровий струмінь.

Рухаючись разом із захопленими молекулами газу до стінки насоса, струмінь пари стискує газ до певного тиску. Пара конденсується на стінці насоса й стікає назад у кип'ятильник, а стиснений газ у тонкому пристіночному шарі продовжує рухатися вздовж стінки насоса в його нижню частину, де відкачується допоміжним механічним (форвакуумним) насосом через вихідний отвір (5) (рис. 5.4).

Паралельно з прямою дифузією молекул газу у паровий струмінь (зверху вниз (рис. 5.4) завжди існує й зворотна дифузія молекул газу в струмінь з боку більш високого тиску знизу вгору. Кількість таких молекул газу порівняно з кількістю молекул, що дифундують зверху вниз, є надзвичайно малою, бо такі молекули рухаються як проти молекул пари, так і проти основної маси газових молекул. Проте в разі значного зростання тиску газу в нижній частині насоса (прорив атмосферного повітря через зупинку форвакуумного насоса, або ж у разі, коли дифузійний насос тільки починає свою роботу й струмінь пари ще не сформувався повністю) кількість молекул газу, які дифундують у зворотньому напрямку, може бути значною, що призводить до зриву струменя пари й, відповідно, до зриву роботи насоса в цілому.

Швидкість дії дифузійного насоса. Згідно із механізмом відкачування дифузійного насоса його швидкість дії буде визначатися площею поверхні тієї частини струменя пари, яка контактує з газом, а питома швидкість дії (швидкість відкачування одиницею площі поверхні струменя) визначатиметься в першу чергу швидкістю напрямленого руху парових молекул. Унаслідок цього значну роль у роботі дифузійного насоса відіграє кут, утворений струменем пари зі стінкою насоса. Його величина задається кутом нахилу сопла (скошеної стінки тарілки) зі стінкою корпусу насоса. Чим меншим є цей кут, тим більша швидкість дії насоса, і, навпаки, зі збільшенням кута нахилу швидкість дії насоса зменшується, якщо ж кут становить 90° (струмінь пари перпендикулярний стінці насоса), вона дорівнює нулю, оскільки молекули пари не спрямовують рух молекул газу в нижню частину насоса, у бік відкачування. У сучасних конструкціях дифузійних насосів цей кут становить $10\text{--}20^\circ$.

Типова залежність швидкості дії дифузійного насоса S_n від впускного тиску (тиску на вході в насос) зображена на рис. 5.5.

Як бачимо з рис. 5.5, швидкість дії насоса залишається сталою (ділянка II) у досить широкому інтервалі тисків (робочі тиски). В області дуже низьких S_n тисків (ділянка I), як і в області високих тисків (ділянка III), швидкість дії зменшується. Зменшення швидкості дії в області дуже низьких тисків (області граничного вакууму) зумовлене низкою факторів. По-перше, за таких низьких тисків відчутною стає зворотна дифузія молекул газу через паровий струмінь. По-друге, суттєвими стають газовиділення стінок насоса. По-третє, набуває вагомості винесення газових молекул паровим струменем з кип'ятильника. Справа в тому, що деяка кількість газу, притисненого паровим струменем до стінки насоса, фізично розчиняється в конденсаті і разом з ним потрапляє в кип'ятильник, з якого виноситься паром у паропровід насоса. Сукупна дія цих чинників й зумовлює значною мірою граничний вакуум насоса та знижує швидкість його дії в області граничного розрідження.

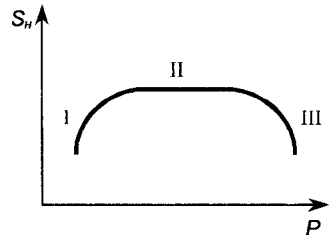


Рис. 5.5. Залежність швидкості дії дифузійного насоса від впускного тиску

Зі збільшенням впускного тиску кількість газу, що усувається з відкачуваного об'єкта, зростає й починає перевищувати сумарні газові потоки, обумовлені зворотною дифузією, газовиділенням зі стінок насоса та парового струменя. Коли ці потоки стають несумірними, швидкість відкачування перестає залежати від впускного тиску (ділянка II).

У разі значного збільшення впускного тиску (права частина ділянки II) зростає й тиск на виході з насоса біля вихідного отвору. Величина цього тиску задається швидкістю відкачування форвакуумним насосом. За певного значення тиску на виході з насоса газ відриває струмінь пари від стінки насоса, суцільність парового ковпака (струменя) порушується, швидкість дії насоса різко падає й дорівнює швидкості дії форвакуумного насоса (ділянка III).

Максимально можливу швидкість дії дифузійного насоса S_T можна розрахувати, вважаючи його „ідеальним” насосом. Максимально можлива швидкість дії такого насоса становить

$$S_T = \frac{1}{4} \tilde{v} A = \sqrt{\frac{R}{2\pi}} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}} \cdot A, \quad (5.2)$$

- де \tilde{v} – середня швидкість руху газових молекул;
 R – універсальна газова стала;
 T – абсолютна температура газу;
 μ – молярна маса газу;
 A – площа отвору, через який відбувається відкачування газу.

Насправді, швидкість дії реальних дифузійних насосів є значно меншою через вплив тих трьох чинників, про які йшлося вище, а також через те, що не всі молекули газу, які впали на поверхню парового струменя, будуть захоплені ним.

Урахування особливостей відбивання газових молекул від парового струменя, експериментально досліджене X_0 дозволило встановити, що швидкість дії такого „не зовсім ідеального” насоса наближається до верхньої межі S'_T , яка дорівнює

$$S'_T = \frac{1}{4} \tilde{v} A \cdot \left(1 + \frac{1}{4} \frac{\tilde{v}}{v_n}\right)^{-1} = \frac{1}{4} \tilde{v} A \cdot X_0, \quad (5.3)$$

де v_n – швидкість струменя пари;

$$X_0 = \left(1 + \frac{1}{4} \frac{\tilde{v}}{v_n}\right)^{-1} - \text{коефіцієнт } X_0.$$

Аналіз цієї формули свідчить, що лише за умови $v_n \gg \tilde{v}$ $X_0 = 1$ і формула (3) переходить у формулу (5.2), тобто насос відкачує всі молекули газу, які впали на поверхню парового струменя. Таким чином, збільшити швидкість дії дифузійного насоса можна, збільшуючи швидкість струменя пари v_n . Це досягається як збільшенням температури пари (температури кипіння робочої рідини), так і вибором відповідної конфігурації сопла Лавалля. Проте на практиці рідко конструюють насоси з дуже великими значеннями v_n . Дійсно, якщо $v_n = \tilde{v}$, $X_0 = 0,8$, а якщо $v_n = 2\tilde{v}$, $X_0 = 0,89$. Тому для більшості насосів $v_n = 1,5\tilde{v}$ і $X_0 \approx 0,86$.

Наявність зворотної дифузії, газовиділення стінок та парового струменя зумовлює ще більш значне зменшення швидкості дії реальних насосів порівняно з ідеальним вакуумним насосом (5.2), і тому вона становить

$$S_n = H \cdot S'_T, \tag{5.4}$$

де H – вакуум-фактор, величина якого для кращих дифузійних насосів становить (0,3–0,5).

Зважаючи на це, можна розрахувати питому швидкість дії дифузійного насоса S_0 , вважаючи такою величину об'єму газу, який проходить за 1 с через 1 см² площі вхідного отвору насоса. Для повітря за кімнатної температури ця величина знаходиться в межах $3,5 \leq S_0 \leq 5,8$ л/с з 1 см².

Повернемося до виразу (5.2) для швидкості дії ідеального насоса. Оскільки для даного насоса $A = \text{const}$, то швидкість його дії повинна залежати від температури газу (зростати зі збільшенням температури газу) і роду газу. Більш легкі гази (μ – малі) повинні відкачуватися швидше, а більш важкі (μ – великі) – з меншою швидкістю. Однак практично для дифузійних насосів швидкість їх дії мало залежить від роду газу. Причиною цього є те, що для легких газів зворотна дифузія є більшою порівняно з важкими. Таким чином, зворотна дифузія легких газів компенсує збільшення швидкості їх відкачування.

Більш вираженою є залежність швидкості дії насоса для різних газів від потужності нагрівника. На рис. 5.6 наведені експериментальні

залежності швидкості дії дифузійного насоса від потужності нагрівника насоса.

Збільшення потужності нагрівника зумовлює більш інтенсивне кипіння робочої рідини в насосі і внаслідок цього збільшення густини пари в струмені. З рис. 5.6 видно, що за потужностей нагрівника, оптимальних для повітря (400–500 Вт), швидкість відкачування легких газів (He, H₂) є значно меншою, ніж повітря. Проте зі збільшенням потужності нагрівника швидкості відкачування цих газів різко зростають до деякого значення, величина якого, очевидно, визначається сукупною дією двох протилежних процесів – зменшення зворотної дифузії газу внаслідок збільшення густини пари в струмені (зростання швидкості відкачування), з одного боку, і зменшення дифузії газу у струмінь з області над струменем внаслідок збільшення густини пари у струмені (зменшення швидкості відкачування) – з іншого.

Отже, для одержання найбільших значень швидкості дії насоса для газів з різною молекулярною масою необхідний підбір оптимального режиму нагрівання насоса для кожного газу.

Виробники дифузійних насосів, як правило, указують значення потужності нагрівника насоса, за яких забезпечуються оптимальні значення швидкості дії насоса для повітря (якщо йдеться про насос загального призначення).

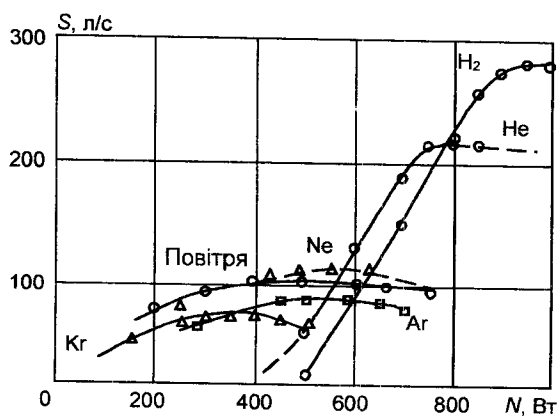


Рис. 5.6. Залежність швидкості дії дифузійного насоса за умови $P \approx 10^{-3}$ Па для різних газів від потужності нагрівника

Стосовно залежності швидкості дії дифузійного насоса від температури газу (формула (5.2)) слід зазначити, що ті зміни температури газу, які мають місце у звичайній практиці, мало впливають на неї.

Конструкції сучасних дифузійних насосів.

Багатоступеневі насоси. Перш ніж обговорити конструктивні особливості сучасних пароструменевих дифузійних насосів, слід зазначити, що дифузійні насоси, як і ротаційні, можуть працювати послідовно, тобто вихід одного насоса з'єднується з входом другого і т.д. Як і у випадку ротаційних насосів, це дозволяє покращити граничний вакуум насоса завдяки зменшенню зворотного газового потоку через струмінь.

Сучасні дифузійні насоси реалізують послідовне поєднання декількох дифузійних насосів в одному корпусі. Такий насос, схематично зображений на рис. 5.7, називається багатоступеневим. Такі насоси мають спільні кип'ятильник і паропровід для живлення сопел окремих ступенів. Швидкість його дії визначається швидкістю відкачування вхідного (першого) ступеня. Оскільки ступені включені послідовно, то умовою нерозривності газового потоку через насос є:

$$S_1 P_1 \text{ (вхід)} = S_2 P_2 = \dots = S_i P_i \text{ (вихід)}, \quad (5.5)$$

де S_i і P_i – швидкість відкачування і тиск для i -го ступеня насоса відповідно.

Оскільки $P_1 < P_2 < \dots < P_i$, то площа поверхні наступного ступеня (парового ковпака) зменшується (рис. 5.7 (1, 2)). Ефективна і синхронна робота кожного ступеня насоса залежить від правильного розподілу пари між соплами, що досягається експериментальним підбором діаметрів паропроводів й вихідних щілин сопел.

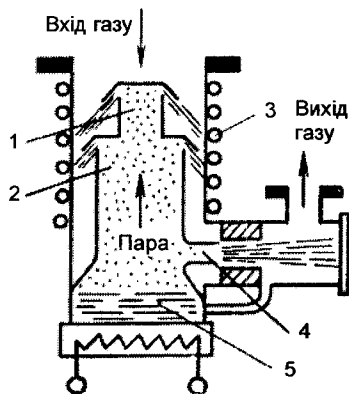


Рис. 5.7. Схематичне зображення багатоступеневого дифузійного насоса: 1, 2 – дифузійні ступені; 3 – водяне охолодження; 4 – ежекторний ступінь; 5 – кип'ятильник

Як правило, сучасні насоси мають від 3 до 5 відкачних ступенів. Останній (вихідний) ступінь, як правило, є ежектором, тобто замість тарілчастого сопла (1, 2 на рис. 5.7), яке формує конічну поверхню струменя з великою площею, використовується трубчасте сопло (4) малого діаметра (ежекторне сопло), яке дає короткий, але густий струмінь пари. У результаті використання ежекторного ступеня вдається збільшити тиск на виході з дифузійного насоса до 10^{-1} Тор (1 Па) і використовувати для відкачування дифузійних насосів ротаційні насоси як форвакуумні. Саме таким і є останній ступінь (4) насоса, зображеного на рис. 5.7.

Сучасні дифузійні насоси виготовляють повністю металевими – корпуси з чорних сталей або алюмінію, а паропроводи з нержавіючої сталі або алюмінію. Пружність пари сучасних масел для дифузійних насосів лежить в області 10^{-4} – 10^{-10} Па за кімнатних температур, а тому навіть без низькотемпературних уловлювачів граничний вакуум таких насосів становить 10^{-7} – 10^{-8} Тор (10^{-5} – 10^{-6} Па), а з використанням азотних уловлювачів – 10^{-10} Тор (10^{-8} Па).

Загальний вигляд, схематичне зображення та паропровід сучасного паромасляного насоса Н-100, який використовується у лабораторній роботі, подані на рис. 5.8.

Паропровід (5) має два ступені дифузійного відкачування з тарілчастими відбивачами пари (6, 7) та ежекторний ступінь (8). Охолодження стінки корпусу насоса та ежектора здійснюється проточною водою, що протікає через трубчастий зміювик (4), приварений до корпусу насоса (3). Масловідбивач (2) являє собою металевий ковпачок, бічні крильця якого мають добрий тепловий контакт з охолоджуваною водою стінкою насоса, тому й температура ковпачка близька до температури води. Масловідбивач виготовляють з міді з покриттям нікелем або сріблом.

Потреба у відбивачі пари (масловідбивачі) (2) зумовлена тим, що в масляному дифузійному насосі, навіть у найкращих конструкціях вхідного ступеня, завжди існує потік молекул пари робочої рідини до входу в насос (проти потоку відкачуваного газу). Його називають **зворотним потоком парів масла** (основний спрямований до стінки в нижню частину насоса). Причиною його появи є розсіяння молекул пари поблизу країв верхньої тарілки сопла (6). Цей потік парів масел є небажаним, оскільки він проникає у відкачуваний об'єм. Найпростішим

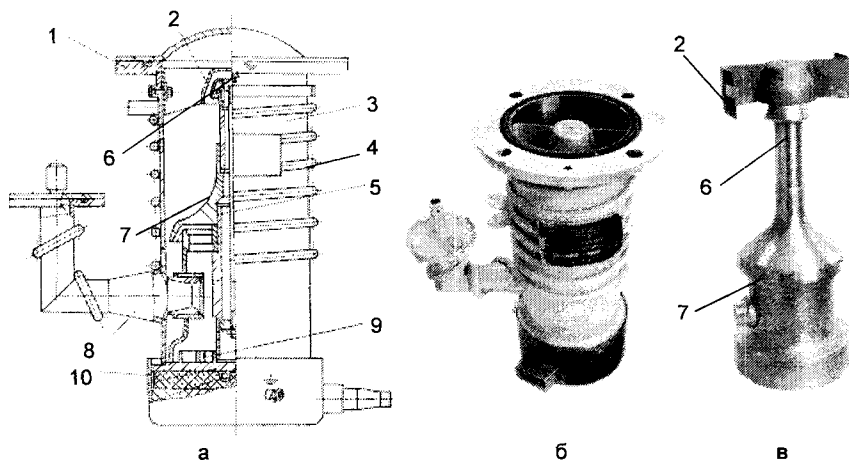


Рис. 5. 8. Схематичне зображення (а), загальний вигляд (б) та паропровід (в) паромасляного насоса Н-100: 1 – вхідний фланець; 2 – масловідбивач; 3 – корпус; 4 – змійовик водяного охолодження; 5 – паропровід; 6, 7 – тарілчасті відбивачі пари; 8 – сопло ежекторне; 9 – фракційне кільце; 10 – електропіч нагрівника

пристроєм для перехоплення цього потоку і є охолоджуваній масло-відбивач у формі ковпачка (2) (рис. 5.8, в).

На жаль, масла для дифузійних насосів не є однорідними рідинами. За робочих температур 150–160 °С під час контакту масла з металевими деталями насоса та відкачуванням газом відбувається деструкція та часткове розвалювання макромолекул масла (крекінг). У результаті цього в насосі утворюються більш легкі фракції масла, яким властиві більш високі тиски парів. Використання цієї суміші різних фракцій як робочої рідини призведе до суттєвого погіршення граничного вакууму.

У сучасних паромасляних насосах використовується автоматичне фракціонування (розділення) масла. Залежно від кількості ступенів відкачування масло поділяється на таку саму кількість фракцій (для триступеневого насоса, зображеного на рис. 5.8, – на три фракції), і кожна фракція спрямовується у свій паропровід. До центрального високовакуумного сопла надходить найважча фракція масла з найвищою

температурою кипіння і найменшою пружністю пари. Це сприяє покращенню граничного вакууму насоса. Легкі ж фракції масла, з трохи меншою температурою кипіння й більш високими значеннями пружності пари, надходять у нижнє сопло, його струмінь стає більш густим і відповідно створює більший тиск газу на виході з насоса.

Експериментальні дослідження виявили, що в насосів, без розділення масла на фракції, граничний вакуум становить $\sim 10^{-5}$ Тор (10^{-3} Па) порівняно з $\sim 10^{-7}$ Тор (10^{-5} Па) у насосів з фракціонуванням масла.

Існує кілька способів розділення фракцій масел у дифузійних насосах. Для металевих насосів найбільш поширеним є фракціонування масла за допомогою лабіринту на дні насоса. На рис. 5.9 зображене дно масляного насоса з фракційним лабіринтом.

Лабіринт утворюється кільцями (9 на рис. 5.8, а) заввишки 2 см, привареними до дна насоса, діаметр яких узгоджений з діаметром відповідних паропроводів. Принцип роботи фракційного лабіринту є таким. Масло, яке сконденсувалося на внутрішній поверхні стінки корпусу насоса, збігає по ній у кип'ятильник. Температура дна кип'ятильника є неоднаковою вздовж його радіуса. У центрі кип'ятильника вона найвища, поблизу країв найменша (периферія кип'ятильника утворена стінкою насоса, що охолоджується водою). Оскільки швидке перемішування масла в кип'ятильнику утруднюється кільцями (рух масла в лабіринті показаний на рис. 5.9 стрілками), то поблизу стінки закипають і випаровуються легкі фракції з найнижчою температурою кипіння, а важкі фракції прямують до центра кип'ятильника й закипають там.

Пари легких фракцій потрапляють у зовнішні паропроводи, тоді як пари важких фракцій – у центральний паропровід і створюють струмінь пари в центральному (самому високому) соплі. Таким чином, у насосі з фракційними кільцями автоматично відбувається розділення фра-

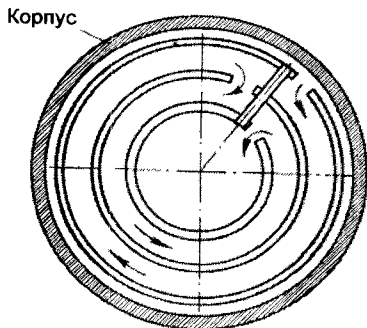


Рис. 5.9. Лабіринтні фракційні кільця на дні насоса (вигляд зверху)

кцій масла, відведення легких фракцій від високовакуумної частини насоса та більш повне використання в процесі відкачування особливостей кипіння кожної фракції.

Ще однією особливістю паромасляних дифузійних насосів є необхідність створення попереднього вакууму ~ 1 Па ($\sim 10^{-2}$ Тор), як у момент запускання насоса, так і в процесі його роботи. Інакше масло втрачає свої якості (згорає, окиснюється). Масло також руйнується в разі аварійного проривання атмосферного повітря в працюючий насос.

Охолодження стінок корпусів дифузійних насосів, як правило, здійснюється проточною водою кімнатної температури. Підвищення температури води до 50 °С призводить до погіршення граничного вакууму насоса в 3–5 разів. Тому системи охолодження конструюють з таким розрахунком, щоб забезпечити зовсім незначний перепад температур води на виході і вході в насос. Як правило, витрати води становлять від $0,5$ л/хв для невеликих насосів зі швидкістю дії $S_H \sim 100$ – 300 л/с до десятків літрів за хвилину для більш потужних насосів.

Малі насоси з $S_H < 100$ л/с можуть мати повітряне охолодження корпусу, як звичайне, так і примусове (з обдуванням вентилятором). В останньому випадку корпус насоса (зовні) має радіатори.

Потужність нагрівників дифузійних насосів змінюється в межах від $P = 200$ – 250 Вт (для малих насосів зі швидкістю дії ~ 100 л/с) до 25 кВт для насосів зі швидкістю дії $40\,000$ – $50\,000$ л/с. Відповідно маса дифузійних насосів змінюється в межах від 3 – 4 кг до 1000 кг залежно від швидкості їх дії.

Робочі рідини для дифузійних насосів. До робочих рідин дифузійних насосів висуваються такі загальні вимоги:

- низька пружність насиченої пари за кімнатних температур і здатність конденсуватися на стінках насосів під час їх охолодження проточною водою кімнатної температури;
- висока пружність пари з робочої температури кип'ятильника;
- однорідність складу або вузький фракційний склад;
- мала теплота випаровування для забезпечення низьких витрат енергії для створення необхідної кількості пари в насосі;
- термічна стабільність за робочих температур;
- стійкість до окиснення киснем повітря за робочих температур;
- хімічна інертність у межах всього інтервалу робочих температур;
- нетоксичність;

- низька здатність до розчинення газів;
- низька в'язкість для забезпечення циркуляції в насосі.

Крім того, можуть висуватися ще деякі специфічні вимоги в разі відкачування агресивних, радіоактивних, отруйних та інших газів.

Слід зазначити, що на жаль, робочих рідин, які б повністю задовольняли всім вимогам, до цього часу не створено. Як робочі рідини в сучасних насосах використовуються ртуть, мінеральні масла і кремній-органічні рідини.

Ртуть є рідким (за кімнатних температур) металом з густиною 13,56 г/см³, температурою плавлення – 38,9 °С та температурою кипіння 356,6 °С (за нормального атмосферного тиску). Пружність пари ртуті за кімнатної температури становить $\sim 10^{-3}$ Тор ($\sim 10^{-1}$ Па), а за температури рідкого азоту $\sim 10^{-29}$ Тор ($\sim 10^{-27}$ Па). Ртуть однорідна за складом, практично не розчиняє гази, стійка до окислення навіть за температури кипіння, практично не змочує цілу низку металів, що дозволяє робити в насосах малий кільцевий зазор між соплом і корпусом насоса та одержувати високі тиски на виході з насоса. На жаль, ртуть має цілу низку недоліків, серед яких:

- а) висока хімічна активність відносно деяких кольорових металів (утворення амальгам), що змушує вибір конструкційних металів для насоса;
- б) висока пружність пари не дозволяє без низькотемпературних уловлювачів одержувати вакуум, кращий за 10^{-3} Тор (10^{-1} Па);
- в) токсичність парів ртуті для обслуговуючого персоналу, через що для експлуатації парортутних насосів потрібні спеціальні приміщення, де працюють насоси (масляне фарбування стін, стелі та підлоги кімнати, додаткова вентиляція та ін.), суворе дотримання правил техніки безпеки, використання уловлювачів парів ртуті як на виході з дифузійного насоса, так і на виході з форвакуумного насоса. З цих причин парортутні насоси використовуються лише при відкачуванні приладів та обладнання, де ртуть є їх наповнювачем (ртутні випрямлячі та перемикачі, ртутні газорозрядні лампи та ін.), а також для відкачування хімічно активних газів, які руйнують інші робочі рідини. Як робоча рідина для насосів використовується високоочищена ртуть вітчизняних марок Р-1 та Р-2.

Високовакуумні масла вільні від усіх цих недоліків ртуті. Вони хімічно інертні, нетоксичні і мають низькі пружності парів за кімнат-

них температур, що дозволяє одержувати граничні розрідження в межах 10^{-4} – 10^{-5} Па (10^{-6} – 10^{-7} Тор) і кращі без використання низькотемпературних уловлювачів.

Мінеральні високовакуумні масла одержують шляхом вакуумної дистиляції продуктів переробки нафти. Масла ВМ-1, ВМ-2 та ВМ-5 – це продукти високовакуумної дистиляції медичного вазелінового масла, а вихідною сировиною масла ВМ-7 є більш дешеве турбінне масло 46. Усі ці масла є неоднорідними за своїм складом сумішами вуглеводнів різних молекулярних мас з різними температурами кипіння (масла не мають певної точки кипіння). Тому вони використовуються в дифузійних насосах з фракційними кільцями. Перегрівання цих масел призводить до їх розкладання і збагачення легкими фракціями, тому для насосів з цими робочими рідинами дуже важливо додержуватися паспортної потужності нагрівника. Під час контакту гарячого масла з атмосферним повітрям відбувається його окиснення (згорання) з утворенням смолистих налетів, що важко видаляються, на внутрішніх деталях насосів. Масло ВМ-7 має дещо більшу окисну стійкість, ніж вазелінові масла. Важливою перевагою мінеральних масел перед іншими робочими рідинами є їхня порівняно низька вартість. Інші характеристики мінеральних масел наведені в табл. 5.1.

Ефіри ОФ і ОС є продуктами синтезу фталевої і себацінової кислот з вищими спиртами. Вони мають дещо більші значення пружностей парів за кімнатних температур порівняно з мінеральними маслами, але є однокомпонентними речовинами, мають також низьку стійкість до окиснення.

Таблиця 5.1. Характеристики мінеральних масел

Характеристика	ВМ-1	ВМ-2	ВМ-5	ВМ-7
Густина за $t 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, г/см ³	0,87	0,87	0,87	–
Молекулярна маса, а.о.м	450	450	450	–
Граничний вакуум насоса, Па (Тор)	$3 \cdot 10^{-4}$ ($2 \cdot 10^{-6}$)	$4 \cdot 10^{-4}$ ($3 \cdot 10^{-6}$)	$1 \cdot 10^{-5}$ ($1 \cdot 10^{-8}$)	$< 1 \cdot 10^{-4}$ ($1 \cdot 10^{-6}$)
Температура, за якої пружність пари дорівнює $1 \cdot 10^{-2}$ Тор (1 Па), $^{\circ}\text{C}$	140–150	140–150	135–155	140–150
Окисна стійкість	низька	низька	низька	задовільна

Надзвичайно цінним є ефір 5Ф4Э (поліфеніловий ефір), суміш ізомерів, що складаються з бензолних радикалів, з'єднаних в ланцюги атомами кисню. Ця рідина має дуже низьку пружність пари (10^{-9} Па) за кімнатної температури і може бути використана для одержання надвисокого вакууму без низькотемпературних уловлювачів. Ефір 5Ф4Э має також високу термоокисну стійкість (не окиснюється навіть у разі аварійного потрапляння невеликих кількостей повітря в працюючий насос). Однак порівняно з мінеральними маслами є більш в'язким, а тому працює за підвищених температур кип'ятильника (потужність нагрівника повинна бути збільшена приблизно в 1,5 рази порівняно з насосами на мінеральних маслах).

Деякі характеристики ефірів наведені в табл. 5.2.

Силіконові масла (кремнійорганічні рідини) є синтетичними полімерами, у яких атоми вуглецю і атоми кремнію зв'язані в силіконовий ланцюг (звідси походить і назва „силіконові”). Замість вуглецевих зв'язків основу молекули становлять ланцюги виду $-Si-O-SiO-$ з міцними зв'язками, завдяки чому силіконові масла мають дуже високу термоокисну стійкість. Вони практично не погіршують свої властивості в разі контакту в нагрітому стані з атмосферним повітрям. У поєднанні з низькою пружністю пари ($\sim 10^{-8}$ Па) силіконові масла найбільше наближаються до ідеальної робочої рідини, яка б задовольняла всім вимогам до робочих рідин для дифузійних насосів. Слід зазначити, що силіконові масла є досить дорогими порівняно з іншими вакуумними маслами.

Таблиця 5.2. Характеристики ефірних робочих рідин

Характеристика	ОФ	ОС	5Ф4Э
Густина за $t\ 20\ ^\circ\text{C}$, г/см^3	0,98	0,91	1,2
Молекулярна маса, а.о.м	390	420	446
Тиск насиченої пари за $t\ 20\ ^\circ\text{C}$, Па	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$
Граничний вакуум насоса, Па (Тор)	$1 \cdot 10^{-4}$ ($1 \cdot 10^{-6}$)	$4 \cdot 10^{-4}$ ($3 \cdot 10^{-6}$)	$1 \cdot 10^{-6}$ ($1 \cdot 10^{-8}$)
Температура, за якої пружність пари дорівнює $1 \cdot 10^{-2}$ Тор (1 Па), $^\circ\text{C}$	120–150	141–143	160–175
Окисна стійкість	низька	низька	задовільна

Таблиця 5.3. Характеристики силіконових вакуумних масел

Характеристика	ПЭС-В-1	ПЭС-В-2	ПФМС-2	ФМ-1
Густина за t 20 °С, г/см ³	0,97	0,97	1,05–1,07	1,096
Молекулярна маса, а.о.м	700	700	571	547
Тиск насиченої пари за t 20 °С, Па	$\leq 6 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-7}$ – $1 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$
Граничний вакуум насоса, Па (Тор)	$3 \cdot 10^{-4}$ ($2 \cdot 10^{-6}$)	$2 \cdot 10^{-4}$ ($1 \cdot 10^{-6}$)	$3 \cdot 10^{-4}$ ($2 \cdot 10^{-6}$)	$1 \cdot 10^{-7}$ ($1 \cdot 10^{-9}$)
Температура, за якої пружність пари дорівнює $1 \cdot 10^{-2}$ Тор (1 Па), °С	120–160	100–165	95–100	–

Деякі характеристики силіконових вакуумних масел наведені в табл. 5.3.

Аналогічні характеристики мають і робочі рідини, що випускаються в інших країнах світу.

Уловлювачі парів робочих рідин. Для високовакуумних дифузійних насосів характерною є наявність зворотного потоку пари робочої рідини в напрямку відкачуваного об'єкта. У насосі є два основні джерела зворотного потоку пари – витікання пари із верхнього (високовакуумного) сопла і міграція пари із конденсату робочої рідини у верхній частині насоса в результаті випаровування зі стінки його корпусу.

Вихід пари робочої рідини з насоса у відкачуваний об'єм є небажаним явищем з кількох причин. По-перше, відкачуваний об'єм забруднюється парами робочої рідини (існує навіть особлива термінологія „масляний” вакуум, на відміну від „безмасляного” вакууму). По-друге, втрачається робоча рідина. Результати експериментів свідчать про те, що й граничне розрідження, створюване дифузійними насосами, визначається саме зворотним потоком парів робочої рідини у відкачуваний об'єм, а в мас-спектрі залишкової атмосфери дифузійних насосів завжди присутні мас-спектрометричні піки, що відповідають складу робочої рідини насоса (ртуті або фрагментів масел).

Величина зворотного потоку парів робочої рідини в середньому становить $(1-5) \cdot 10^{-2}$ мг/год з 1 см² вхідного отвору насоса і змінюється в процесі роботи насоса – найбільший потік має місце в моменти вмикання насоса та його зупинки. На рис. 5.10 поданий графік зміни зворотного потоку масла Q з дифузійного насоса у відкачувану систему протягом циклу „запуск – робота – зупинка”.

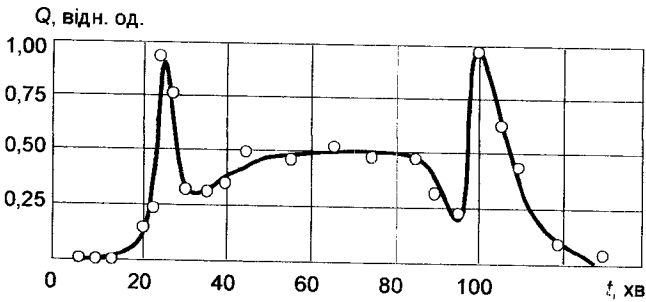


Рис. 5.10. Зміна зворотного потоку масла в процесі роботи дифузійного насоса

Протягом перших 15–20 хв після вмикання електропечі кип'ятильника потік практично дорівнює нулю, бо відбувається нагрівання кип'ятильника і масла. У подальшому температура масла різко зростає до робочого значення, але із сопла витікає ще не сформований дозвуковий струмінь пари, при цьому швидко зростає зворотний потік. Після того, як насос увійшов у нормальний тепловий режим (прогрілися до робочих температур сопла, сформувався надзвуковий струмінь пари, уздовж стінки за висотою насоса встановився робочий градієнт температури), зворотний потік зменшується до деякого оптимального значення і практично не змінюється. Після вимикання нагрівника температура пари починає зменшуватися, через деякий час швидкість струменя пари переходить у дозвукову, тиск пари у цей момент стрибкоподібно зростає, що викликає й різке зростання зворотного потоку масла. У міру подальшого зниження температури масла струмінь пари зникає, зникає й зворотний потік масляних парів у відкачуваний об'єм.

Таким чином, збільшення величини зворотного потоку парів робочої рідини має місце як на початковому (вмикання), так і кінцевому (вимикання) етапах роботи насоса. Це слід враховувати при експлуатації дифузійних насосів, і в разі небажаного потрапляння парів робочої рідини у вакуумну систему при вмиканні і вимиканні дифузійного насоса необхідно відсікати його на цей час за допомогою вентилів від відкачуваної системи.

З метою запобігання проникнення парів робочої рідини з насоса у відкачуваний об'єкт застосовуються відбивачі та уловлювачі пари. На

рис. 5.8, в зображений механічний ковпачок (2) для відбивання пари, яка розташовується над верхнім соплом дифузійного насоса. Такий простий пристрій дозволяє зменшити зворотний потік пари у 20–30 разів. Ковпачок є одночасно і відбивачем пари, і уловлювачем її, оскільки завдяки крильцям, які знаходяться в тепловому контакті з верхньою частиною насоса, яка охолоджується проточною водою, на його поверхні відбувається конденсація пари. У деяких конструкціях дифузійних насосів ковпачок закріплений на окремому фланці, який безпосередньо охолоджується проточною водою.

Ще приблизно у стільки ж разів зменшують зворотний потік пари конічні та жалюзні відбивачі-уловлювачі пари. Один з варіантів такого пристрою зображений на рис. 5.11.

Такі уловлювачі-відбивачі пари можуть використовуватися як безпосередньо (бути поміщені на вихідний фланець насоса) без спеціального охолодження, так і як складовий елемент конструкції уловлювача з охолодженням до низьких температур.

Загальною проблемою уловлювачів є виконання двох протилежних вимог – максимальної захисної дії від парів робочої рідини і найбільшої провідності для молекул відкачуваних газів. Захисна дія пропорційна середній кількості ударів молекули пари із захисними елементами (ребрами, виступами, пластинами тощо) уловлювача. Збільшення захисної дії знижує провідність уловлювача для відкачуваного газу. Ефективний захист полягає в тому, щоб молекули робочої рідини, які вилітають з будь-якої точки насоса, обов'язково зіткнулися з елементом уловлювача.

Уловлювання зворотного потоку робочої рідини можна зробити ще більш ефективним, якщо охолодити робочі поверхні уловлювачів до якомога нижчих температур. Такі уловлювачі знижують пружність пари робочої рідини, що дифундує з насоса, до величини, яка відповідає температурі охолоджених елементів уловлювача, а тому їх часто на-

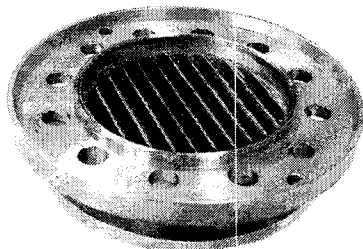


Рис. 5.11. Шевроновий уловлювач парів масла

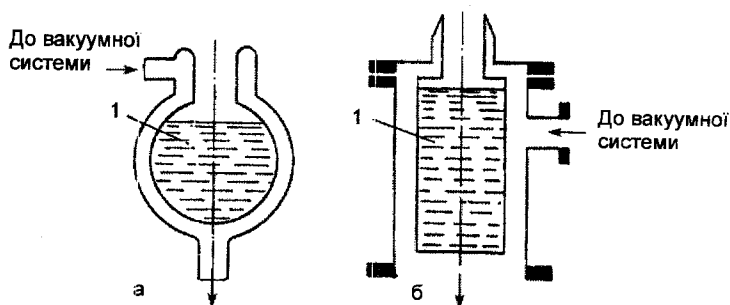


Рис. 5.12. Схематичне зображення скляного (а) та металевого (б) уловлювачів з охолоджувальною рідиною: 1 – охолоджувальна рідина

зивають *конденсуючими* або *виморожувальними* (на їх холодних поверхнях пара робочої рідини конденсується). Існує багато конкретних конструкцій таких уловлювачів. Схематично два основних їх різновиди – сферичний і циліндричний, – зображені на рис. 5.12.

Активним елементом таких уловлювачів є зовнішня поверхня ємності для охолоджувальної рідини (хладоагент). Як хладоагент використовують різні рідини і суміші.

Найбільш часто як хладоагент використовується рідкий азот (він має досить низьку температуру кипіння – $-197\text{ }^{\circ}\text{C}$, нетоксичний, практично інертний газ, у рідкому стані є однією з найбільш дешевих криогенних рідин).

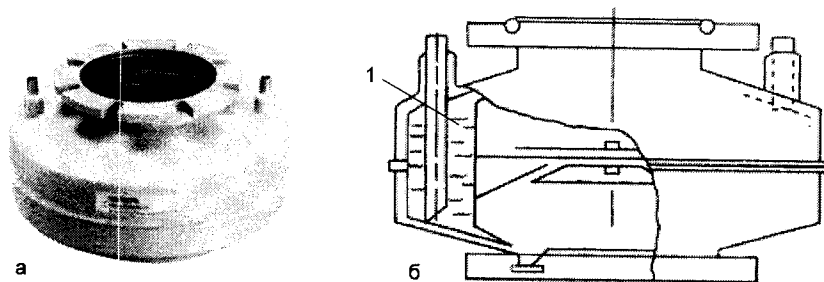


Рис. 5.13. Зовнішній вигляд (а) та схематична будова (б) азотного заливного уловлювача: 1 – рідкий азот

Використання низькотемпературних уловлювачів з рідким азотом дозволяє в добре знегажених вакуумних системах одержувати залишковий тиск 10^{-8} Па ($\sim 10^{-10}$ Тор) для паромасляних насосів і 10^{-10} Па ($\sim 10^{-12}$ Тор) для парортутних насосів.

Як правило, у складі сучасних уловлювачів заливного типу (рис. 5.13) є резервуар для заливання рідкого азоту з перегородками (жалюзі, лабіринт тощо), які мають з ним гарний тепловий контакт. Це дозволяє значно збільшити площу уловлювача, охолоджувану до низької температури. Часто такі елементи уловлювача називаються кріопанелями (у даному випадку – азотна кріопанель).

Як правило, уловлювач своєю нижньою частиною стикується безпосередньо з дифузійним насосом, а до його верхньої частини приєднуються наступні елементи вакуумної системи.

Завдання до роботи

1. Ознайомитися з конструкцією високовакуумного дифузійного паромасляного насоса Н-100 (інструкція, розібраний насос).
2. Ознайомитися з конструкцією вакуумної установки УВЛ-8 (установка вакуумна лабораторна) та правилами її експлуатації.
3. Ознайомитися з методами вимірювання низького та високого вакууму за допомогою вакуумметра ВИТ-3 (вакуумметр у складі вакуумної установки, інструкція до вакуумметра).
4. За допомогою УВЛ-8 одержати і виміряти високий вакуум.
5. Виконати вимірювання ефективної швидкості відкачування S_{ef} дифузійного насоса Н-100 у складі УВЛ-8.
6. Порівняти одержане значення ефективної швидкості відкачування насоса Н-100 з паспортним значенням його швидкості відкачування. Зробити висновок.

Вказівки до виконання роботи

Для одержання високого вакууму за допомогою паромасляного дифузійного насоса в роботі використовується вакуумна установка УВЛ-8. Високий вакуум у ній створюється дифузійним паромасляним насосом Н-100, а форвакуум – пластинчасто-роторним насосом 2НВР-5ДМ.

Загальний вигляд вакуумної установки УВЛ-8 поданий на рис. 5.14, а її вакуумна схема – на рис. 5.15. У вакуумній камері (7)

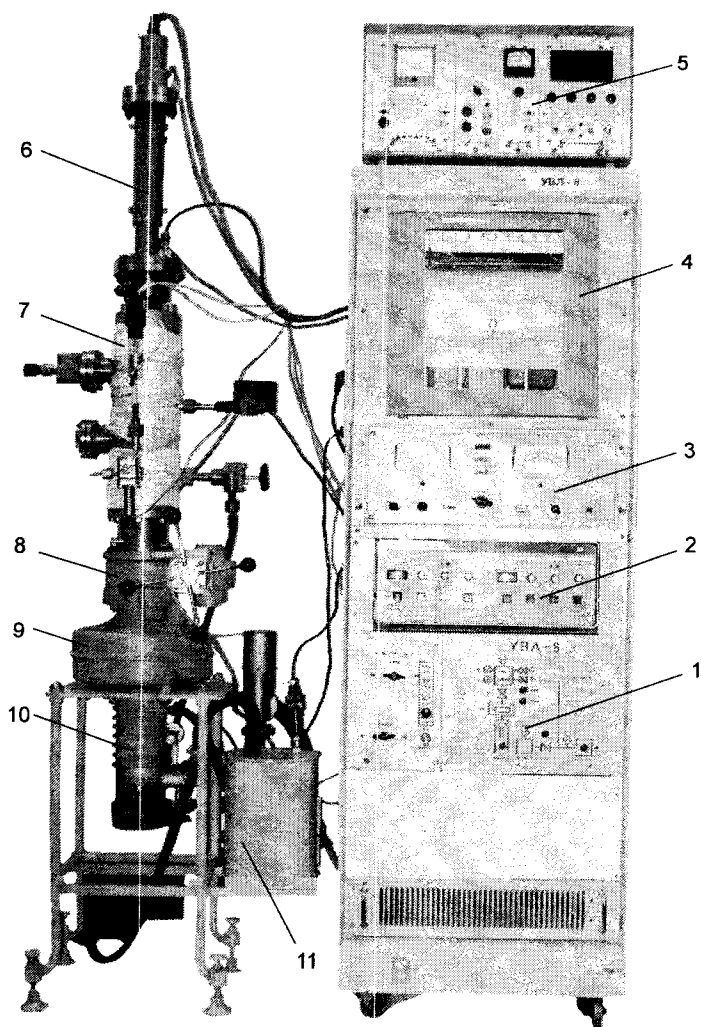


Рис. 5.14. Загальний вигляд універсальної вакуумної установки УВЛ-8 з дифузійним паромасляним насосом: 1 – блок живлення установки; 2 – блок живлення автоматичної системи напуску газів СНА-2; 3 – вакуумметр ВІТ-3; 4 – самописний потенціометр КСП-4; 5 – блок живлення мас-спектрометра МХ-7303; 6 – аналізатор мас-спектрометра МХ-7303; 7 – вакуумна камера; 8 – шибєрний високовакуумний затвор ДУ-100; 9 – азотний вакуумний уловлювач; 10 – дифузійний паромасляний насос Н-300; 11 – форбалон

(рис. 5.14), виготовленій з нержавіючої сталі, створюється високий вакуум 10^{-3} – 10^{-5} Па (10^{-5} – 10^{-7} Тор).

За допомогою форвакуумного насоса через електромагнітний клапан ЕМК при закритому високовакуумному клапані ВВК (8) у дифузійному паромасляному насосі (10), азотному уловлювачі ВВЛ (9) та форбалоні (11) створюється вакуум ~ 1 Па (10^{-2} Тор), необхідний для запуску дифузійного насоса. Величина розрідження контролюється за допомогою манометричних перетворювачів ПМТ-4 (Д1 та Д2 на рис. 5.15). У разі необхідності за закритого високовакуумного клапана ВВК (8) через вентиль В-1 можна провести попереднє відкачування камери до форвакууму через байпасний (обхідний) вакуумпровід. Одержаний форвакуум контролюється манометричним перетворювачем типу ПМТ-4 (Д3). Високий вакуум у вакуумній камері вимірюється манометричним перетворювачем типу ПМІ-2 (Д4). За допомогою дозуючого вентиля В-2 можна напускати невеликі об'єми повітря або інших газів у вакуумну камеру.

У стійці розташовані: вакуумметр ВІТ-3 (3), самописний прилад КСП-4 (4) для записування зміни тиску, система дозованого напуску газів СНА-2 (2) і блок живлення та індикації стану вакуумної установки УВЛ-8 (1). За допомогою дозуючого вентиля В₂ (рис. 5.13) можна плавно напускати повітря або інший газ у вакуумну камеру. Вентиль В₂ може бути як ручним, так і автоматичним із живленням від СНА-2.

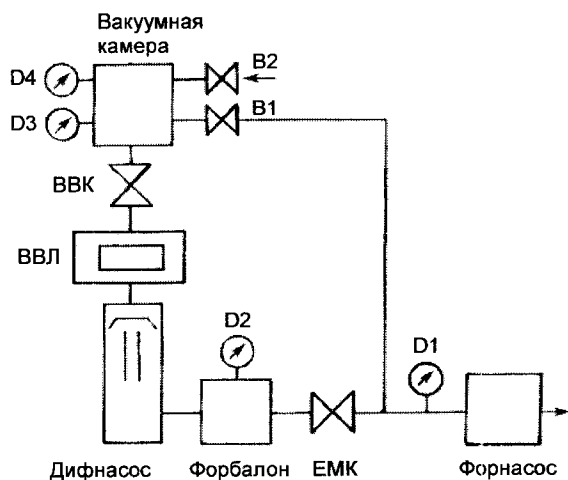


Рис. 5.15. Принципова схема вакуумної установки УВЛ-8

Азотний уловлювач ВВЛ (9) розміщується над горловиною дифузійного насоса і являє собою ємність, у яку заливають рідкий азот. На зовнішній поверхні уловлювача (з боку вакууму) за $T = 197^\circ\text{C}$ (температура кипіння рідкого азоту) конденсуються пари масла, які можуть проникати з дифузійного насоса до вакуумної камери. Таким чином, можна покращити граничний вакуум дифузійного насоса Н-100 з 10^{-5} Па (10^{-7} Тор) до 10^{-7} Па (10^{-9} Тор).

Форвакуумний балон (11) становить герметичну ємність об'ємом близько 10 л, яка є буферною між дифузійним і форвакуумним насосами. Як відомо, для нормальної роботи дифузійного насоса з його нижньої частини необхідно постійно відкачувати газ, стиснутий паровим ковпаком, інакше газ прориває паровий ковпак і дифузійний насос припиняє працювати. Якщо дифузійний насос зв'язаний вакуумпроводом безпосередньо з форнасосом (без форбалону), то в разі аварійного вимикання струму живлення двигуна форнасосу останній припиняє працювати, що унеможливує й роботу дифузійного насоса. Аналогічна ситуація виникає і в разі, якщо форнасос необхідно перемкнути на відкачування камери. Наявність форбалону дозволяє дифузійному насосу протягом деякого часу (залежно від об'єму форбалону) нормально працювати без форнасоса. Форбалон і форнасос комутуються між собою через електромагнітний клапан ЕМК, який відкривається внаслідок пропускання електричного струму через обмотку електромагніта, що утримує клапан у відкритому стані. Після вимикання електричного струму клапан автоматично закривається під дією пружини.

Блок живлення ((1) рис. 5.14) вакуумної установки УВЛ-8 знаходиться в стійці і забезпечує живлення всіх основних вузлів установки. Принципова схема блока живлення наведена на рис. 5.16. Живлення вакуумної установки здійснюється від трифазної мережі змінного струму 220/380 В. За допомогою вимикача „Сеть” здійснюється вмикання всього блоку живлення. Живлення двигуна механічного насоса здійснюється за допомогою вимикача „Форнасос”. Живлення електроречі дифузійного насоса здійснюється за допомогою вимикача „Дифнасос”. Загальне живлення блока управління електромагнітним клапаном ЕМК здійснюється за допомогою тумблера „Сеть Вкл” (змінна напруга 220 В подається на первинну обмотку трансформатора Тр1). Управління клапаном здійснюється тумблером „Закр” та кнопкою „Пуск”.

Блок живлення також здійснює індикацію стану всіх основних елементів вакуумної системи за допомогою відповідних сигнальних лампочок згідно з принциповою схемою, зображеною на рис. 5.15.

На передній панелі блока живлення знаходяться також перемикачі датчиків вимірювання форвакууму Д1 (безпосередньо на вході у форнасос), Д2 (на форбалоні) та Д3 (у вакуумній камері).

Вимірювання форвакууму та високого вакууму здійснюється за допомогою вакуумметра ВІТ-3 ((3) рис.5.14), розташованого в стійці з приладами.

У верхній частині вакуумної камери встановлений монополярний аналізатор мас-спектрометра МХ 7303 ((6) рис. 5.14), за допомогою якого можна проводити аналіз складу залишкової атмосфери УВЛ-8. Живлення аналізатора мас-спектрометра здійснюється від його блока живлення (5).

Порядок вмикання установки

1. Пересвідчитися, що вентиль В-1 знаходиться в закритому стані (вправо до упору).
2. Увімкнути живлення вакуумної установки (вимикач „Сеть” блоку живлення). При цьому над вимикачем засвічуються сигнальні індикаторні лампочки, які сигналізують про наявність усіх трьох фаз (у разі відсутності якоїсь фази необхідно повідомити викладача).
3. Проконтролювати стан вентилів вакуумної установки. Високовакуумний вентиль повинен бути закритим (світиться червона лампочка „Закр”). Електромагнітний клапан повинен бути закритий (сигнальна лампочка не світиться). Не повинні світитися також сигнальні лампочки „Форнасос” і „Дифнасос”.
4. Увімкнути термopарну частину вакуумметра ВІТ-3. Проконтролювати за допомогою перемикачів Д1, Д2, Д3 наявність і величину струму через нагрівники термopарних перетворювачів ПМТ-4.
5. Увімкнути живлення двигуна форнасоса (вимикач „Форнасос”). При цьому чути характерний звук працюючого насоса і світиться лампочка „Форнасос”.
6. Дати можливість форнасосу 10–15 хв попрацювати „самому на себе”, контролюючи за допомогою датчика Д1 величину розрідження, яке він створює. Після того, як вакуумметр показав наявність необхідного розрідження $\sim 10^{-2}$ Тор (5–6 мВ за шкалою термopарного

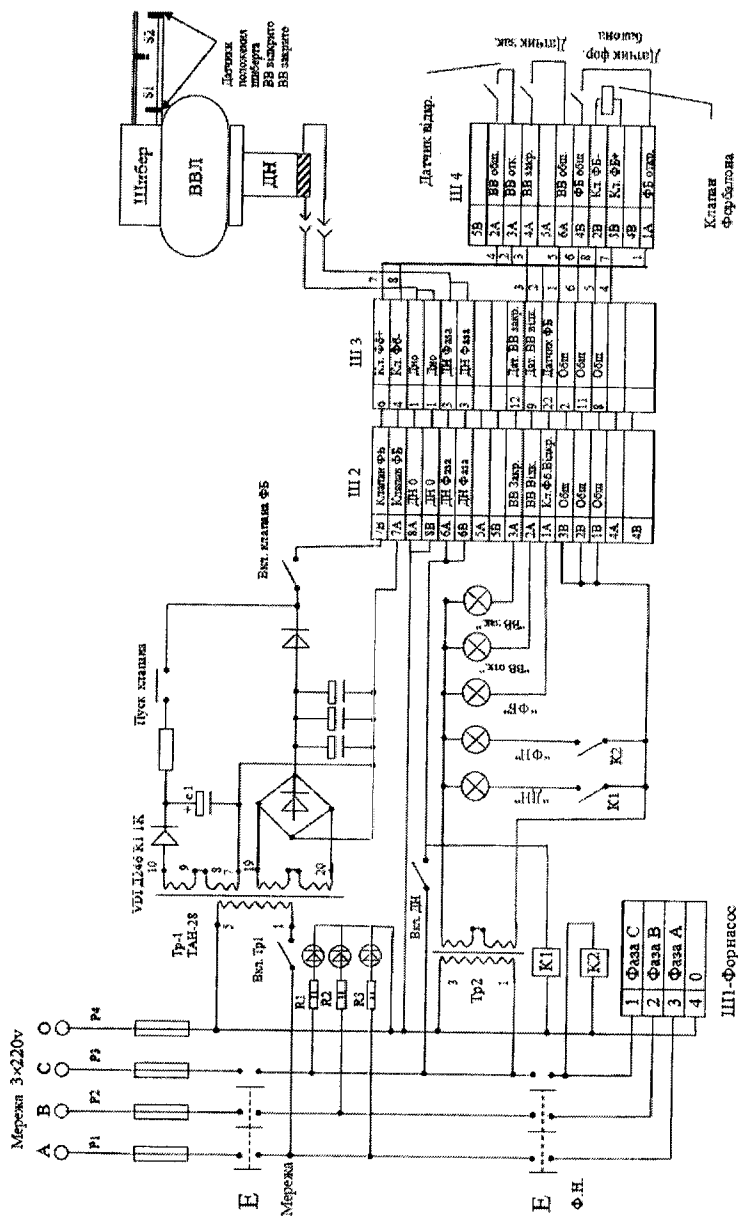


Рис. 5.16. Принципова схема блока живлення вакуумної установки УВЛ-8

вакуумметра) у положенні перемикача Д1, перемкнути вакуумметр на форбалон (датчик Д2, перемикач Д2) і, переконавшись, що розрідження в ньому гірше, ніж у форнасосі, відкрити ЕМК. Для відкривання ЕМК необхідно на передній панелі блоку живлення установки перевести у верхнє положення обидва тумблери управління клапаном, після чого натиснути кнопку „Откр” (при цьому чути характерний стук механізму клапана, що відкривається).

7. Відкачати форбалон (разом з дифнасосом) до розрідження $(1-2) \cdot 10^{-2}$ Тор (5–6 мВ). Контролювати розрідження, слідкуючи за показаннями датчика Д2.
8. Подати воду для охолодження дифузійного насоса.
9. Після досягнення попереднього вакууму у форбалоні $(1-2) \cdot 10^{-2}$ Тор (5–6 мВ) вимикачем „Дифнасос” увімкнути живлення електропечі дифузійного насосу (при цьому засвічується сигнальна лампочка „Дифнасос”). Через 30–40 хв дифузійний насос має працювати в робочому режимі.
10. Пересвідчитися, що у вакуумній камері існує попереднє розрідження $(2-4) \cdot 10^{-2}$ Тор (3–5 мВ), провівши вимірювання вакууму манометричним перетворювачем Д3. Якщо у вакуумній камері відсутній попередній вакуум, закрити електромагнітний клапан ЕМК і через байпасну магістраль, відкривши вручну вентиль В1, відкачати вакуумну камеру до попереднього вакууму $(2-4) \cdot 10^{-2}$ Тор. Після цього закрити вентиль В1 і, відкривши електромагнітний клапан ЕМК, продовжити відкачування форбалону.
11. Штурвалом відкрити високовакуумний клапан ВВК (при цьому засвітиться зелена сигнальна лампочка, яка сигналізує, що ВВК відкритий).
12. За показаннями манометричного перетворювача Д3 переконалися в тому, що почалося відкачування вакуумної камери до високого вакууму. У разі досягнення розрідження у вакуумній камері, кращого ніж $1 \cdot 10^{-3}$ Тор (9 мВ), можна виміряти високий вакуум, увімкнувши живлення манометричного перетворювача ПМІ-2 (іонізаційна частина вакуумметра ВІТ-3). Записати в робочий зошит значення розрідження, створеного дифузійним насосом.
13. Залити в уловлювач ((9) рис. 5.14) рідкий азот і переконалися в тому, що вакуум значно покращився. Записати в робочий зошит значення граничного розрідження, створеного у вакуумній камері з рідким азотом в уловлювачі.

14. Провести вимірювання ефективної швидкості відкачування дифузійного насоса.

Порядок вимикання установки

1. Вимкнути високовакуумну частину вакуумметра ВІТ-3.
2. Закрити високовакуумний клапан ВВК.
3. Вимкнути живлення електропечі дифузійного насоса, продовжуючи відкачувати його механічним насосом через форбалон протягом 20–30 хв.
4. Через 30 хв після вимикання живлення електропечі дифузійного насоса перекрити подачу води для охолодження корпусу дифузійного насоса.
5. Перевести електромагнітний клапан ЕМК у закритий стан, вимкнувши обидва тумблери у блоці його живлення.
6. Вимкнути вакуумметр ВІТ-3.
7. Вимкнути живлення форвакуумного насоса (перемикач „Форнасос“).
8. Вимкнути загальне живлення вакуумної установки УВЛ-8 (вимикач „Сеть“).

Методика вимірювання ефективної швидкості відкачування дифузійного насоса

У роботі використовується стаціонарний метод вимірювання швидкості відкачування дифузійного насоса. При застосуванні цього методу газовий потік, який відкачується насосом, залишається незмінним і тиск на вході насоса є сталим. Даний метод одержав назву метода сталого тиску. Він має кілька різновидів, які відрізняються способом вимірювання газового потоку, що надходить у насос.

У цій роботі вимірювання газового потоку повітря здійснюється за допомогою масляної бюретки – тонкої скляної трубки з поділками для вимірювання малих кількостей рідини. Принципова вакуумна схема обладнання, яке використовується для вимірювання, зображена на рис. 5.17.

За умови відкритого вентиля В3 (рис. 5.17) і закритого дозуючого вентиля В2 повітря заповнює бюретку і рівень масла в ній збігається з рівнем масла в посудині, куди вона поміщена своїм відкритим кін-

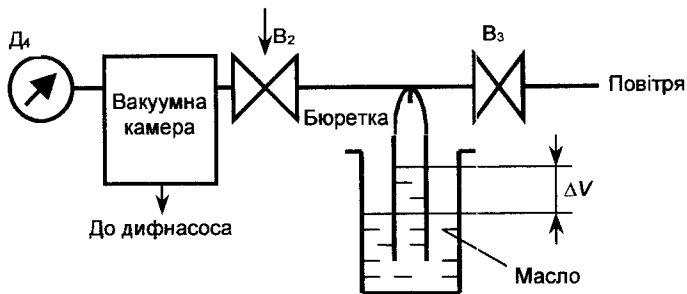


Рис. 5.17. Принципова вакуумна схема для вимірювання ефективної швидкості відкачування вакуумної камери за допомогою масляної бюретки:
 Д-4 – манометричний перетворювач ПМІ-2; B2 – дозуючий вентиль;
 B3 – запірний вентиль

цем. Якщо тепер закрити вентиль B3 і відкрити дозуючий вентиль B2, то повітря буде надходити у вакуумну камеру і рівень масла в бюретці підвищуватиметься. Оскільки об'єм повітря, яке надходить у вакуумну камеру є дуже малим, то можна вважати, що його тиск у бюретці P_6 дорівнює зовнішньому атмосферному тиску P_a і рівень масла в посудині за межами бюретки не змінюється. Тоді газовий потік Q , що проходить через дозуючий вентиль B2 у камеру, визначається швидкістю піднімання об'єму масла $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ у бюретці і величиною атмосферного тиску

$$Q = \frac{P_6 \Delta V}{\Delta t} = \frac{P_a \Delta V}{\Delta t}, \tag{5.6}$$

де $P_6 = P_a$ – тиск повітря в бюретці;
 ΔV – об'єм повітря, що потрапляє з бюретки у вакуумну камеру протягом часу Δt (ΔV дорівнює об'єму масла в бюретці, яке піднялося в ній за час Δt).

За умови, що тиск P_6 у вакуумній камері (показання датчика Д4) не змінюється (усе повітря, що потрапило у вакуумну камеру, відкачується дифузійним насосом), ефективна швидкість відкачування насоса S_{ef} визначається за формулою

$$S_{\text{еф}} = \frac{Q}{P_{\text{с}}} = \frac{P_{\text{а}} \Delta V}{P_{\text{с}} \Delta t}. \quad (5.7)$$

За цією формулою й розраховується ефективна швидкість відкачування вакуумної камери дифузійним насосом.

Регулюючи дозуючим вентилям В2 величину газового потоку Q , можна одержувати у вакуумній камері різні значення тиску $P_{\text{с}}$ і побудувати залежність ефективної швидкості відкачування $S_{\text{еф}}$ від тиску $P_{\text{с}}$ на вході в насос

$$S_{\text{еф}} = S_{\text{еф}}(P_{\text{с}}). \quad (5.8)$$

Примітка. Для визначення швидкості піднімання об'єму масла в бюретці необхідно знати її діаметр d

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\pi d^2 \Delta h}{4 \Delta t}, \quad (5.9)$$

де Δh – висота, на яку підніметься масло в бюретці за час Δt . Діаметр бюретки d та ціна поділки її шкали вказані в паспорті бюретки.

Хід роботи

1. Увімкнути вакуумну установку (згідно з розділом про порядок вмикання установки) і одержати та виміряти в робочій камері установки високий вакуум.
2. Виконати вимірювання ефективної швидкості відкачування дифузійного насоса (згідно з методикою вимірювання ефективної швидкості відкачування дифузійного насоса).
3. Результати вимірювань занести до табл. 5.4.

Таблиця 5.4. Результати вимірювань ефективної швидкості відкачування $S_{\text{еф}}$ дифузійного насоса

№ пор.	$P_{\text{а}}$, Па	Δt , с	Δh , мм	ΔV , м ³	$P_{\text{с}} = P_{\text{а}}$, Па	$S_{\text{еф}}$, м ³ /с
--------	---------------------	----------------	-----------------	-----------------------------	------------------------------------	-------------------------------------

4. Вимірювання повторити 3–5 разів.

5. Побудувати графік залежності $S_{\text{еф}} = S_{\text{еф}}(P_{\text{с}})$ за даними табл. 5.4.

6. Порівняти одержані значення S_{ef} та P_e з паспортними даними на насос Н-100. Зробити висновки.
7. Вимкнути установку (згідно з розділом про порядок вимикання установки).

Зміст звіту

1. Принципова схема будови і короткий опис принципу роботи дифузійного насоса.
2. Принципова схема будови вакуумної установи УВЛ-8 та результати вимірювань S_{ef} .

Запитання для самоконтролю

1. Будова та принцип роботи дифузійного насоса.
2. Від чого залежить граничний вакуум та швидкість дії дифузійного насоса?
3. Яким чином можна покращити граничний вакуум дифузійного насоса?
4. Чому для нормальної роботи дифузійного насоса в ньому потрібно створити попередній вакуум та підтримувати розрідження 10^{-2} Тор на виході з нього?

Література: [2, 4–7].

Вивчення конструкції магніторозрядного насоса та одержання безмасляного високого вакууму

Мета роботи: ознайомитися з конструкцією та принципом роботи магніторозрядного насоса, типовою конструктивною схемою безмасляної надвисоковакуумної установки, навчитися одержувати високий безмасляний вакуум.

Обладнання: насос НМДО-0,25 у розібраному стані, насос НМД-0,16 у розібраному стані, технічна документація на насоси, вакуумна установка УВБЛ-4 для одержання високого і надвисокого безмасляного вакууму.

Теоретичний матеріал

Загальні характеристики електрофізичних насосів. Магнітні електророзрядні, або, як їх часто називають, магніторозрядні, насоси належать до електрофізичних насосів, відкачувальна дія яких базується на фізико-хімічному зв'язуванні активних газів (H_2 , O_2 , N_2 та ін.) плівкою або масивним шаром гетера. Інертні гази (He , Ne , Ar та ін.) відкачуються в результаті іонізації їх атомів з подальшою імплантацією утворених іонів у гетерний матеріал (плівку чи масивний шар) та наступним замуруванням розпиленим гетером.

З метою підвищення ефективності відкачування активних та інертних газів у електрофізичних насосах використовуються фізичні ефекти, що виникають під час протікання електричного струму в газовому середовищі за малих тисків газу. Найважливішими з них є такі ефекти:

- пряме і непряме резистивне нагрівання гетерного матеріалу (робочого тіла насоса) для його активізації або сублімації (насоси з нерозпилюваними гетерами, випарні гетерні насоси і т.п.);

- нагрівання, випаровування та розпилення робочого тіла шляхом його бомбардування електронними та (або) іонними пучками (випарні гетерні насоси, магніторозрядні насоси і т.д.);
- збудження, дисоціація, іонізація, прискорення та спрямоване перенесення та імплантація газових молекул у плівку чи шар гетера під час створення й підтримування певної форми електричного розряду у відкачуваному газі (гетеро-іонні насоси, магніторозрядні насоси і т.п.).

Для роботи всіх електрофізичних насосів принципове значення мають три фактори:

- 1) фізико-хімічні перетворення, що відбуваються з робочим тілом (активація, випаровування, розпилення);
- 2) фізико-хімічні перетворення, що відбуваються з молекулами відкачуваного газу (адсорбція, хемосорбція, іонізація, імплантація);
- 3) наявність і характеристики зовнішніх електричних і магнітних полів, які управляють цими процесами.

Урахування цих факторів і їх практичне використання дозволили розробити широку гаму різних видів електрофізичних насосів, серед яких є й магніторозрядний насос. Він належить до класу іонно-гетерних насосів з іонним розпиленням гетерної речовини при збудженні електричного газового розряду у схрещених електричному і магнітному полях. Такі насоси можуть мати діодну або тріодну електродні схеми.

Виняткова простота конструкції, висока надійність, широкий діапазон робочих тисків $10^{-2} - 10^{-9}$ Па ($10^{-4} - 10^{-11}$ Тор), малі витрати електроенергії та повна відсутність органічних забруднень відкачуваних систем зумовлюють широке використання таких насосів у різних вакуумних установках (від наукових установок дослідження поверхонь і плазми до імітаторів космічного простору і велетенських прискорювачів елементарних частинок).

Сьогодні магніторозрядні насоси виготовляються практично всіма провідними світовими виробниками вакуумного обладнання, у т. ч. і вітчизняними.

Механізм відкачування магніторозрядного насоса. Початок історії розвитку магніторозрядних насосів поклали роботи Пеннінга з дослідження фізики високовольтного газового розряду в магнітному полі (1937). Електродна система «кільцевий анод – два дискові катоди» була

ним запатентована як вакуумний насос («відкачувальна комірка Пеннінга») і стала прототипом сучасних магніторозрядних насосів.

Промислові зразки магніторозрядних насосів з'явилися після створення в 1958 році Холлом насоса з граничним вакуумом 10^{-8} Па (10^{-10} Тор) і швидкістю дії близько 5 л/с. Він же запропонував і конструкцію сучасних магніторозрядних насосів зі швидкістю дії до 10^4 л/с.

Відкачувальна комірка Пеннінга, схематично зображена на рис. 6.1, а, складається з трьох елементів – циліндричного пустотілого анода (1) і двох катодних пластин (2), розташованих у торцях анода. Між анодом та катодами прикладається різниця потенціалів близько 10 кВ, а вся комірка розміщується в постійному магнітному полі індукцією близько 0,1 Тл, спрямованому вздовж вісі анода, як показано на рис. 6.1, а.

Окремі аноди (анодні комірки) сучасних діодних магніторозрядних насосів (НМД) без охолодження виготовляються з тонкої листової нержавіючої сталі. Вони можуть мати в перерізі круглу (рис. 6.1, б), квадратну або іншу форму правильного багатогранника. У насосах з охолодженням анода проточною водою (насоси типу НМДО) аноди виготовлені з товстих мідних пластин з висвердленими круглими отворами (комірками). На рис. 6.2. подані фотографії анодів насосів НМД-0,16 (а) та НМДО-0,25 (б). Насос НМД-0,16 має анодні комірки з тонкої листової нержавіючої сталі, а насос НМДО-0,25 – анодні комірки висвердлені в мідній пластині, охолоджуваній водою, що протікає через припаяну до пластини трубку.

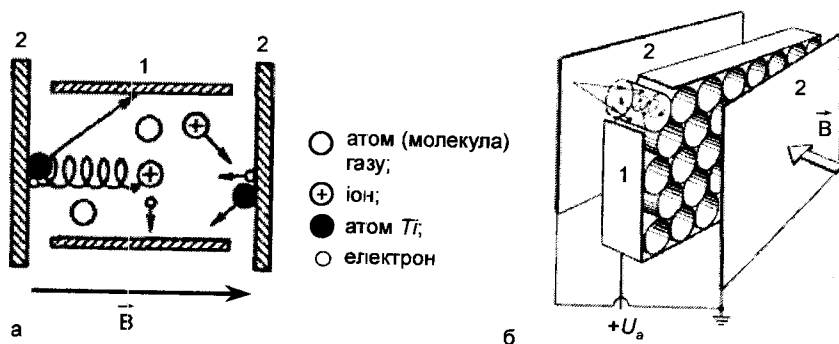


Рис. 6.1. Схематичне зображення робочих елементів діодного магніторозрядного насоса: а – комірка Пеннінга; б – відкачна секція; 1 – циліндричний анод; 2 – пластинчастий катод

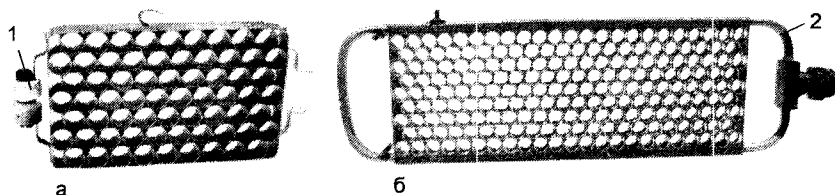


Рис. 6.2. Аноди насосів НМД-0,16 (а) та НМД0-0,25 (б): 1 – ізолятор; 2 – трубка водяного охолодження

Анодні комірки мають діаметр $d = 10\text{--}30$ мм і довжину $l = 10\text{--}20$ мм, ширина зазору між торцем анода і катодною пластиною становить $3\text{--}7$ мм.

Кількість анодних комірок визначає величину швидкості дії насоса в цілому і в потужних насосах досягає кількох тисяч. Катодні пластини мають товщину $1\text{--}2$ мм і виготовляються з титану марок ВТ-1. Існують також диференціальні катоди, коли один катод виготовлений з Ti , а другий з Ta .

Якщо комірку Пеннінга (рис. 6.1, а) помістити у вакуум $1\text{--}10^{-1}$ Па ($10^{-2}\text{--}10^{-3}$ Тор) і прикласти між анодом і катодами постійну напругу в кілька кіловольт, то в ній запалюється електричний розряд і між анодом та катодами проходить електричний струм. Розряд супроводжується світінням газового проміжку. Причиною появи розряду є іонізація нейтральних атомів і молекул газу вільними електронами, які з'явилися там внаслідок холодної емісії з катодів, дії космічного випромінювання та руйнування деформованих сильним електричним полем газових молекул у результаті зіткнення одна з одною.

Вільні електрони у схрещених електричному й магнітних полях починають здійснювати складні коливальні рухи між катодами, при цьому вони прискорюються і, зустрічаючись з нейтральними атомами і молекулами газу, збуджують та іонізують їх. Таким чином, у комірці Пеннінга з'являються додатні газові іони та вторинні електрони, у результаті чого в порожнині анодної комірки формується самостійний газовий розряд (розряд Пеннінга), який існує до розріджень $10^{-9}\text{--}10^{-11}$ Па ($10^{-11}\text{--}10^{-13}$ Тор). Розряд Пеннінга має надзвичайно високу ефективність іонізації залишкових газів (його часто використовують як джерело іонів у іонних гарматах). Так, для іонізації одного

атома азоту необхідно лише один електрон, що протікає у зовнішньому колі, для іонізації одного атома кисню – два таких електрони.

Додатні газові іони, що утворилися в порожнині анода, рухаються прискорено до поверхні титанового катода і, бомбардуючи її, вибивають з її поверхні один або кілька атомів Ti (розпиляють катод), як показано на рис. 6.1, а. Значна частина розпилених атомів Ti осідає на поверхні аноду, утворюючи плівку Ti , що неперервно відновлюється (наростає). Активні гази хемосорбуються нею і «замуровуються» в її товщі атомами Ti , що осідають. З другого боку, газові іони, що бомбардують поверхню катода, можуть також і розчинятися в його об'ємі. Усе це разом зумовлює зменшення кількості газових молекул у порожнині такої комірки, тобто вона стає поглинальним (гетерним) насосом.

Таким у загальних рисах є механізм відкачування газів комірною Пеннінга. Зрозуміло, що швидкість відкачування і кількість поглинутого однією комірною Пеннінга газу є досить малими. Проте, об'єднавши в анодні відкачувальні секції десятки, сотні і навіть тисячі таких комірок (рис. 6.1, б; рис. 6.2) зі спільними катодами, можна одержати практично будь-які швидкості відкачування (у першому магніторозрядному насосі Холла, що мав швидкість дії близько 5 л/с, анодна секція складалася із 36 квадратних комірок Пеннінга).

Більшість газів, які утворюють атмосферне повітря (N_2 , O_2 , CO , CO_2 , H_2), є хімічно активними і відкачуються плівкою титану внаслідок хемосорбції з утворенням термічно стійких сполук – нітридів, оксидів, карбідів та гідридів титану з температурами розкладання 1500–3000 °С. Тому поглинання цих газів у насосі має необоротний характер. Складні гази (вуглеводні, водяна пара та ін.) в електричному розряді дисоціюють на більш прості складові, які, у свою чергу, іонізуються й відкачуються. Відкачування водню має свої особливості: титан і водень добре реагують один з одним з утворенням гідридів TiH_2 та псевдогідридів TiH_x . Сорбційна ємність титану для водню є найбільшою з усіх газів. Отже, молекули водню безпосередньо хемосорбуються поверхнею титанових катодів, аналогічно легко сорбуються поверхнею титанових катодів і додатні іони H^+ . Унаслідок малої маси вони не розпилюють катод під час його бомбардування.

Інертні гази не хемосорбуються гетерним матеріалом. На поверхні гетера вони утримуються у фізично сорбованому стані слабкими силами Ван-дер-Вальса. Певна частина іонів інертних газів під час удару об катод нейтралізується і, відбившись від його поверхні, потрап-

ляє на анод. Протягом нетривалого перебування на поверхні аноду вони можуть бути «замуровані» в плівці Ti атомами Ti , що падають. Частина іонів атомів інертних газів залишається на поверхні катода і може як випаруватися з неї, так і дифундувати в його товщу. Ti атоми, що дифундували в товщу катода, можуть бути звільнені внаслідок постійного розпилення його поверхні, але оскільки інтенсивно розпилюється лише невеличка ділянка катодної пластини напроти центра анодної комірки (близько 20% площі поверхні катода взагалі не розпилюється), то певна кількість атомів інертних газів все ж таки поглинається й катодними пластинами.

Обидва ці механізми забезпечують порівняно невелику швидкість відкачування інертних газів магніторозрядними насосами, проте й мала їх концентрація в повітрі ($Ar - 0,93\%$, $Ne - 5 \cdot 10^{-4}\%$) дозволяє за допомогою цих насосів у більшості вакуумних систем одержувати як високий, так і надвисокий вакуум.

Усе викладене свідчить про те, що магніторозрядні насоси повинні мати значну селективність (вибірковість) відкачування. У табл. 6.1 наведені відносні значення швидкості дії магніторозрядних насосів для різних газів (відносно азоту).

Як бачимо з табл. 6.1, швидкості відкачування важких інертних газів у сотні разів менші за швидкості відкачування азоту, тому залишкова атмосфера магніторозрядних насосів завжди збагачена інертними газами.

Незважаючи на значний прогрес, досягнутий у побудові фізичних і математичних моделей роботи магніторозрядних насосів, повної закінченої теорії роботи таких насосів ще не існує, як і методик теоре-

Таблиця 6.1. Відносні значення швидкості дії діодних магніторозрядних насосів з титановими катодами для різних газів

Газ	Швидкість дії, %	Газ	Швидкість дії, %
Азот	100	Оксид вуглецю	85–100
Метан	270	Діоксид вуглецю	82–100
Дейтерій	190–210	Кисень	55–57
Етиловий ефір	135	Гелій	10–11
Пари води	100–130	Неон	4
Водень	270–300	Аргон, криптон, ксенон	1

тичних розрахунків насосів. Це пояснюється складністю численних процесів у розряді, існуванням різних форм розряду, що відрізняються за величиною та розподілом об'ємних зарядів у комірці Пеннінга. Маловивченими є й процеси іонізації залишкових газів залежно від зміни їх тиску. Існуючі методи розрахунку конструктивних параметрів насосів в основному є емпіричними.

Основним фактором, що визначає вакуумні параметри насоса, є швидкість розпилення катодного матеріалу, яка залежить від енергії й кількості іонів, що бомбардують катод. Енергія іонів визначається різницею потенціалів між анодом і катодом, а кількість іонів – концентрацією молекул залишкового газу та величиною розрядного струму. Цікавим є те, що відношення величини розрядного струму I_p до тиску P у насосі (інтенсивність розряду I_p/P) є сталою величиною у широкому діапазоні тисків. Отже, у разі зменшення тиску в насосі пропорційно зменшується й струм розряду, це може бути використане для вимірювання тиску в насосі за величиною розрядного струму.

Величина розрядного струму I_p через окрему комірку Пеннінга є складною функцією значної кількості геометричних і фізичних параметрів

$$I_p = f(d_a, l_a, Z_{ак}, B, U_a, P, \text{рід газу}), \quad (6.1)$$

де d_a і l_a – діаметр і довжина анодної комірки відповідно;
 $Z_{ак}$ – віддаль між анодом і катодом;
 B – індукція магнітного поля;
 U_a – різниця потенціалів між анодом і катодом;
 P – тиск залишкових газів.

Експериментально було встановлено, що швидкість дії насоса S пропорційна інтенсивності розряду

$$S \sim I_p/P, \quad (6.2)$$

Отже, геометричні розміри комірки та значення напруженості електричного і магнітного полів повинні бути вибрані такими, щоб забезпечити максимальну інтенсивність розряду (максимальне значення I_p за даного тиску P). Для комірки кругового перерізу діаметром d_a експериментально встановлено, що максимальна інтенсивність розряду має місце за умови

$$B \cdot d_a \approx 3,06 \cdot 10^{-5} U_a^{0,5}, \quad (6.3)$$

де B – магнітна індукція, Тл;
 U_a – анодна напруга, В;
 d_a – діаметр анодної комірки, м.

Для розрахунку швидкості відкачування S_1 азоту (N_2) однією коміркою можна скористатися найпростішою наближеною емпіричною формулою (існує кілька емпіричних формул різної складності)

$$S_{1N_2} \approx 1,5 \cdot 10^7 B^2 d_a^2 I_a, \text{ л/с}, \quad (6.4)$$

де S_{1N} – швидкість відкачування однією коміркою для N_2 ;
 $B = 0,1 - 0,2$ Тл;
 $d_a = 1 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-2}$ м;
 $I_a = 0,5 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-2}$ м.

Формула (6.4) може бути використана при співвідношенні $I_a / Z_{a,k} = 0,2 - 0,9$. Швидкості відкачування інших газів однією коміркою S_1 можна розрахувати, користуючись даними табл. 6.1.

У реальних магніторозрядних насосах електродний відкачувальний блок (рис. 6.1, б) складається з n комірок, з'єднаних паралельно під одним і тим самим потенціалом. Тоді за умови однакового доступу до них молекул газу швидкість відкачування n комірок становить

$$S_n = nS_1. \quad (6.5)$$

Оскільки для доступу в комірку газові молекули повинні пройти вузький зазор між анодом і катодом, то величина S_n зменшується до

$$S_{ef} = kS_n, \quad (6.6)$$

де $k < 1$ – деякий коефіцієнт, що враховує провідність зазору.

Як правило, магніторозрядний насос має N електродних відкачальних блоків (від 1 до 10), розташованих у спеціальних «карманах» симетрично відносно вхідного отвору в насос. У цьому випадку швидкість дії всього насоса S_n розраховується за співвідношенням

$$\frac{1}{S_n} = \frac{1}{NS_{ef}} + \frac{1}{U_k}, \quad (6.7)$$

де U_k – провідність зазору між карманом з електродним блоком та вхідним отвором у насос.

Серійні магніторозрядні насоси мають швидкості дії від кількох десятих л/с до 1000 л/с. Насоси зі швидкістю дії 10^4 л/с і більше виготовляються на індивідуальне замовлення.

Типова залежність швидкості дії магніторозрядного насоса від тиску при відкачуванні повітря наведена на рис. 6.3.

У діапазоні тисків 10^{-8} – 10^{-5} Тор (10^{-6} – 10^{-3} Па) швидкість дії є максимальною й майже не змінюється. Зменшення швидкості дії за тисків, менших ніж 10^{-8} Тор (10^{-6} –Па), зумовлюється затуханням розряду за даної індукції магнітного поля в комірках Пеннінга. Практично повне падіння швидкості дії насоса за тисків, більших ніж 10^{-3} Тор (10^{-1} Па), зумовлюється неповноцінним розрядом за таких тисків, пов'язаним з електричним пробоем зазору між анодом і катодом.

Питома швидкість дії магніторозрядних насосів (розрахована на підставі швидкості дії насоса та площі перерізу прохідного отвору його приєднувального фланця) становить для кращих насосів $S_0 \approx 2,1$ л/с з 1 см^2 , що у 1,5–2,5 разів менше, ніж для дифузійних насосів.

Конструктивні особливості магніторозрядних насосів. За майже пів-вікову історію свого розвитку всі виробники магніторозрядних насосів прийшли до їх практично однакових конструкцій (рис. 6.4).

Насоси зі швидкістю дії $S_n = 100$ – 300 л/с мають прямокутний корпус (рис. 6.4), у верхній частині якого знаходиться приєднувальний вхідний фланець (1). У бокових стінках корпуса зроблені кармани, у яких розміщені відкачувальні блоки, аналогічні зображеним на рис. 6.1, б. та рис. 6.2. Магнітне поле створюється в карманах плоскими постійними магнітами, які розташовані зовні корпусу насоса і можуть легко зніматись у разі прогрівання корпусу до 300 – 400 °С.

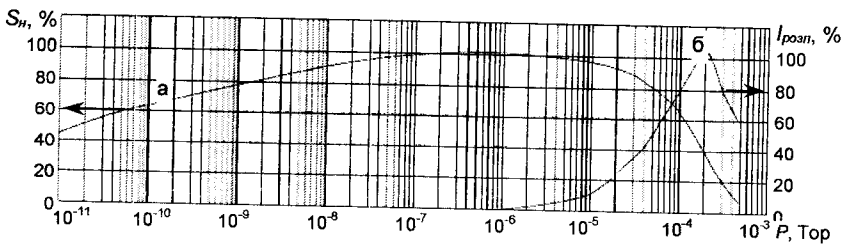


Рис. 6.3. Залежність швидкості дії S_n магніторозрядного насоса для повітря (а) та залежність інтенсивності розпилення $I_{розп}$ катодів насоса (б) від тиску газу

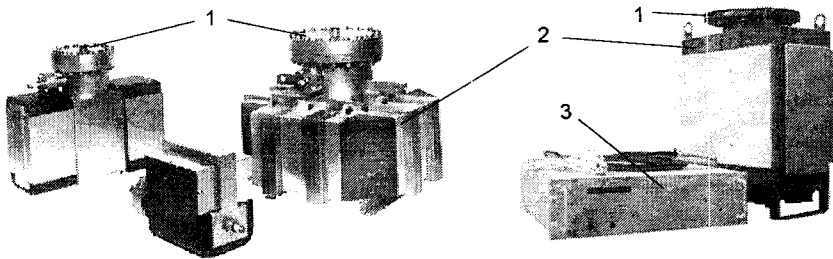


Рис. 6.4. Зовнішній вигляд типових магніторозрядних насосів з різною швидкістю відкачування: 1 – вхідний фланець; 2 – корпус насоса; 3 – блок живлення насоса

Корпуси насосів виготовляють з листової немагнітної сталі Х18Н10Т завтовшки 2–4 мм залежно від розмірів насоса. Живлення відкачних блоків здійснюється від спеціальних електронних блоків. Висока напруга передається в насос через високовольтний метало-керамічний струмоввід. Ізолювання анода від катодів забезпечується керамічними ізоляторами, які одночасно виконують і функції механічних з'єднувальних елементів (рис. 6.2, а). Залежно від величини швидкості дії насоса в його корпусі розташовують кілька відкачувальних блоків. У великих насосах з $S_n = 400\text{--}1000$ л/с кармани з відкачувальними блоками розміщуються радіально відносно вхідного патрубку (рис. 6.4).

На рис. 6.5. схематично зображена конструкція насоса НМД-0,16.

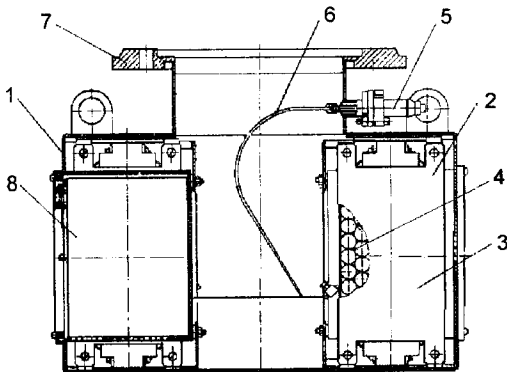


Рис. 6.5. Схема насоса НМД-0,16: 1 – корпус; 2 – відкачувальний блок; 3 – катодна пластина; 4 – анод; 5 – високовольтний струмоввід; 6 – дротина-струмопровід; 7 – вхідний фланець; 8 – магнітна плітка

Паспортна швидкість дії НМД-0,16 становить близько 160 л/с і забезпечується чотирма відкачувальними електродними блоками (2). Кожен блок складається з двох титанових пластинчастих катодів (3) і розташованого між ними аноду (4) з нержавіючої сталі Х18Н10Т з круглими циліндричними розрядними комірками (рис. 6.2, а).

Анод ізольований від катода і корпусу насоса (1) керамічними ізоляторами закритими від запилення титаном. Висока напруга (близько +7 кВ) подається на анодні блоки через вакуумний керамічний струмовід (5). Усі чотири анодні блоки електрично з'єднані між собою паралельно за допомогою жорсткої дротини-струмопроводу (6). Через вхідний фланець (7) з ДУ-100 насос приєднується до вакуумної системи. Високовакуумне розбірне з'єднання фланця має канавочно-клиновий профіль з ущільненням за допомогою мідної прокладки. Робоче положення насоса може бути будь-яким.

Магнітна система насоса зображена на рис. 6.6.

Магнітна система насоса складається з восьми магнітних оксидно-бар'єрних плиток (1) і двох магнітопроводів (2), виготовлених зі сталі марки 10, які замикають магнітне поле за межами насоса (одна з магнітних силових ліній показана стрілкою на рис. 6.6). У середині насоса замикання магнітного поля відбувається через чотири зазори (кармани) (3), у яких розташовані відкачні електродні блоки насоса. Маса насоса становить близько 42 кг.

Живлення насоса здійснюється спеціальним високовольтним кабелем від блока живлення БП-138.

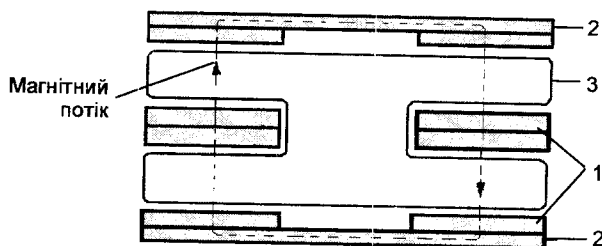


Рис. 6.6. Схема магнітної системи НМД-0,16: 1 – магнітна плітка; 2 – магнітопровід; 3 – магнітний зазор (карман)

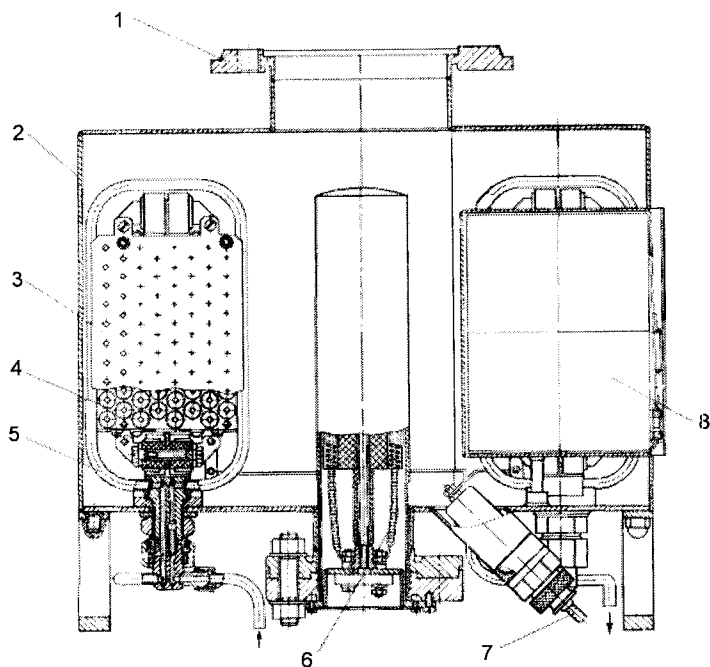


Рис. 6.7. Схема насоса НМДО-0,25 з водяним охолодженням анодних блоків: 1 – вхідний фланець; 2 – корпус; 3 – катод; 4 – анод; 5 – трубка водяного охолодження; 6 – внутрішній нагрівник; 7 – струмоввід; 8 – магнітна плітка

Деяку іншу конструкцію має насос НМДО-0,25. Для полегшення його запуску в цьому насосі охолодження анодів здійснюється протоочною водою. Схематично насос зображений на рис. 6.7.

Паспортна швидкість дії НМДО-0,25 становить близько 250 л/с і забезпечується шістьма відкачними електродними блоками, кожен з яких складається з двох титанових катодів (ВТ-1-0) (3) і розташованого між ними анода (4), виготовленого з товстої мідної пластини. Анодні комірки діаметром 12 мм висвердлені в мідній пластині (рис. 6.2, б). По периметру анода припаяна трубка (5) з нержавіючої сталі, по якій проходить охолоджувальна вода. Примусове охолодження анода дозволяє зменшити газовиділення з нього під час вмикання насоса, що

зменшує тривалість його запуску. За тисків, менших ніж 10^{-3} Па (10^{-5} Тор) водяне охолодження не впливає на роботу насоса (на його граничний вакуум і швидкість дії).

Для знегажування корпусу насоса і його електродної системи може бути використаний внутрішній нагрівник (6). Це пустотілий тонкостінний герметичний циліндр з нержавіючої сталі, усередині якого розміщено ніхромовий нагрівник. При вмиканні нагрівника циліндр, розігрівається і внаслідок випромінювання з його поверхні розгріваються внутрішні елементи та корпус насоса.

Живлення відкачувальних блоків здійснюється через вакуумний керамічний струмоввід (7). Висока напруга (-7 кВ) прикладається до катодів відкачувальних блоків. Існують різні варіанти розташування струмовводу (7): або як показано на рис. 6.7 (знизу) або аналогічно рис. 6.6 (на горловині насоса).

Через вхідний фланець (1) з ДУ-160 насос приєднується до вакуумної системи за допомогою канавочно-клинового ущільнення з мідною прокладкою. Робоче положення насоса може бути будь-яким, бажано щоб площини катодів були розташовані вертикально.

Магнітна система насоса (рис. 6.8) складається з 24-х оксидно-барієвих магнітних плиток, зібраних у магнітні блоки, і двох магнітопроводів зі сталі 10.

Магнітопроводи (2) замикають магнітне поле за межами насоса (одна з магнітних силових ліній показана на рисунку). Усередині насоса замикання магнітного поля відбувається через шість магнітних зазо-

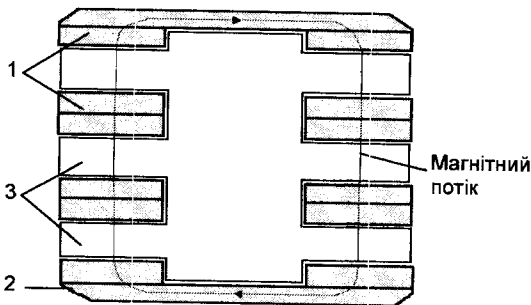


Рис. 6.8. Схема магнітної системи НМДО-0,25: 1 – магнітна плитка; 2 – магнітопровід; 3 – магнітний зазор (карман)

рів (карманів), у яких розміщені відкачні електродні блоки насоса. Маса насоса становить близько 117 кг. Живлення насоса здійснюється спеціальним високовольтним кабелем від блока живлення БП-100.

Строк служби насосів в основному визначається ресурсом катодів, оскільки ерозія анодів при бомбардуванні їх електронами незначна. У разі якщо товщина титанових пластин-катодів 1,5–2 мм і робочі тиски, менші ніж $1 \cdot 10^{-4}$ Па ($1 \cdot 10^{-6}$ Тор), ресурс катодів становить близько 50 000 год. За більших тисків (особливо в стартовому режимі при $P \approx 1$ Па (10^{-2} Тор) (рис. 6.3)) катодні пластини значною мірою руйнуються. Заміна катодних пластин на нові та очищення анодних комірок від напиленого титану дозволяє експлуатувати насос багато років. Тому у більшості магніторозрядних насосів відкачувальні блоки (анод-катоди) виконуються розбірними і зйомними без механічного розбирання корпусу насоса.

Електричне живлення магніторозрядних насосів. Для живлення магніторозрядних насосів використовуються випрямлячі з напругою до 7 кВ із заземленим «мінусом» (БП-138) або заземленим «плюсом» (БП-100). Особливість їх роботи полягає в тому, що потужність, яка підводиться до насоса, змінюється в сотні разів у процесі його роботи. На залежності швидкості дії насоса від тиску (рис. 6.3, крива (а)) має місце значний спад швидкості дії за високих тисків $P > 10^{-2}$ Па ($P > 10^{-4}$ Тор). Режим роботи насоса в цій області тисків характеризується великим струмом розряду і малою різницею потенціалів між анодом і катодом. Через значне розігрівання електродів відкачувальних блоків й обумовленого ним значного газовиділення з поверхонь електродів напруга розряду за таких режимів (запуск насоса) становить усього 200–600 В. При цьому електричний опір газового розрядного проміжку становить менше ніж 100 Ом. Струм через насос за такого опору різко зростає, і виникає загроза перетворення тліючого розряду між анодом і катодом у неконтрольований дуговий розряд. Оскільки за такої напруги енергія іонів у розряді є дуже малою, то й швидкість дії насоса в цілому різко зменшується (права частина кривої (а) $S_n(P)$ на рис. 6.3). У цьому режимі має місце і велика швидкість розпилення катодів (крива (б) $I_{розн}(P)$ на рис. 6.3). Якщо вакуум у насосі покращується, розрядний струм зменшується до кількох мікроампер, а напруга зростає до максимального значення (7 кВ). Таким чином, з погляду електрики насос являє собою навантаження, опір якого змінюється в межах від

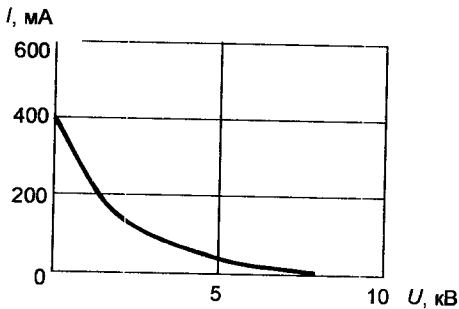


Рис. 6.9. Спадна вольт-амперна характеристика блоку живлення

кількох десятків Ом до десятків МОм, а тому блок живлення повинен мати не просту лінійну вольт-амперну характеристику, а складну нелінійну, як зображено на рис. 6.9. Тому блоки живлення магніторозрядних насосів є досить складними (використовуються кілька випрямлячів, магнітне шунтування тощо). Оскільки блок живлення повинен забезпечити і досить великі (близько 0,7 А) струми в момент запуску насоса і досить високі напруги (близько 10 кВ) під час нормальної роботи насоса, то його основний елемент – підвищувальний високовольтний трансформатор розраховується на потужність до 4,5 кВА (НМДО-0,25), має велику масу й розміри. Так, блок живлення БП-138 (НМД-0,16) має масу близько 50 кг, а блок живлення БП-100 (НМДО-0,25) – близько 70 кг.

Для роботи насоса тільки в умовах високого вакууму блок живлення потрібен зовсім простий, а його розміри й маса мають бути значно меншими, ніж у серійних, бо за $P = 10^{-6}$ Па (10^{-8} Тор) розрядний струм становить кілька міліампер, а тому потужність, яку повинен забезпечити блок живлення, становить лише кілька ВА. Блоки живлення мають прилади для вимірювання струму розряду й високої напруги між анодом і катодом та електронні системи блокування й захисту від перевантаження.

Особливості експлуатації магніторозрядних насосів. Вакуумна установка з магніторозрядними насосами повинна мати безмасляну систему попереднього відкачування на базі адсорбційних (цеолітових чи вугільних) насосів. При використанні масляних механічних насосів (особливо на межі їх граничного вакууму) потрібно застосувати ефективні уловлювачі масляних парів. Для одержання розріджень, кращих ніж 10^{-

$5 \cdot 10^{-6}$ Па (10^{-7} – 10^{-8} Тор), установка повинна допускати високотемпературне знегажування основних її вузлів за температур 250–450 °С.

Важливим і відповідальним є процес запуску насоса. Для НМД-0,16 запуск здійснюється за тиску в насосі не гірше 1 Па ($1 \cdot 10^{-2}$ Тор), а для НМДО-0,25–6,5 Па ($5 \cdot 10^{-2}$ Тор) і триває, поки в насосі не виникає розрідження близько 10^{-3} Па (10^{-5} Тор).

Оскільки при пуску насоса газовий розряд у ньому є нестабільним і насос живиться великим струмом, то не рекомендується його робота за розріджень близько $2 \cdot 10^{-2}$ Па ($2 \cdot 10^{-4}$ Тор) більше 1 год неперервно. Інакше перегріваються і блок живлення і катодні пластини насоса, які при цьому інтенсивно розпиляються (зменшується ресурс їх роботи).

Тривалість пуску залежить від багатьох факторів – величини форвакууму, об'єму і стану вакуумної системи, роду відкачуваного газу, «передісторії» експлуатації насоса тощо.

Насоси типу НМДО (з охолодженням анодом й ізольованим катодом) характеризуються менш тривалим запуском.

Під час пускання насосів типу НМД (з ізольованим анодом) електричний розряд заповнює не тільки простір відкачувальних комірок, а й увесь насос та відкачуваний об'єкт (коли відкритий вентиль насоса). При цьому внутрішні елементи установки додатково очищуються тліючим розрядом і збільшується тривалість запуску насоса. Іноді виникнення тліючого розряду всередині вакуумної установки є небажаним (запилення ізоляторів, ерозія деталей та інше). З метою запобігти вихід розряду за межі насоса на його вхідному патрубку встановлюється заземлена рідка металева сітка.

У знегажених чистих системах з об'ємом близько $0,5 S_{II}$ (л) тривалість пуску не перевищує кількох хвилин і значно зростає за наявності великої кількості пари H_2O у відкачуваному об'єкті. Тому бажано, щоб між вакуумною системою і магніторозрядним насосом розміщувався вентиль, який дозволяв би після вимикання вакуумної установки залишати насос під високим вакуумом в робочому стані.

Відкривати вентиль між вакуумною системою і магніторозрядним насосом необхідно дуже повільно, даючи можливість насосу підтримувати розряд з малим струмом. У разі швидкого відкривання вентиля через різке збільшення тиску в насосі, імовірним є зрив розряду й перехід насоса в малокерований стартовий режим.

Підбиваючи підсумок, зазначимо переваги та недоліки магніторозрядних насосів.

Перевагами є:

- широкий діапазон робочих дисків;
- здатність довго і стабільно відкачувати практично всі гази та підтримувати в самому насосі у вимкненому стані тривалий час високий вакуум;
- відсутність органічних забруднень відкачуваної системи;
- величезний ресурс роботи;
- стійкість до несприятливих зовнішніх впливів – вібрацій, аварій з енергоживленням, аварійного потрапляння атмосферного повітря;
- відсутність постійного форвакуумного відкачування;
- відсутність водяного охолодження;
- мала споживана потужність;
- можливість контролю розрідження за розрядним струмом;
- простота обслуговування;
- сумісність з автоматизованими системами управління.

Ці та інші переваги дозволяють вважати магніторозрядні насоси високоефективними засобами відкачування великої кількості високовакуумних установок, приладів і обладнання.

До **недоліків** магніторозрядних насосів належать значна селективність відкачування щодо різних газів, чутливість до органічних забруднень, необхідність високовольтного живлення, значна маса і висока вартість у перерахунку на одиницю швидкості дії.

Завдання до роботи

1. Ознайомитися з конструкцією, технічними даними та правилами експлуатації магніторозрядних насосів НМДО-0,25 та НМДО-0,16 (заводські інструкції, розібрані насоси). Установити відмінності в конструкціях цих насосів та блоків їх живлення.
2. Ознайомитися з конструкцією, технічними даними та правилами експлуатації адсорбційних вугільних насосів з охолодженням рідким азотом.
3. Ознайомитися з конструкцією, технічними даними та правилами експлуатації приладу для вимірювання високого та надвисокого вакууму (інструкція до вакуумметра ВМБ-14 та манометричного перетворювача ПММ-32, інструкція до вакуумметра ВТМР та манометричного перетворювача МІД).

4. Ознайомитися з конструкцією та правилами експлуатації теплового вакуумметра для вимірювання форвакууму на базі ПМТ-2 (термопарна частина вакуумметра ВТМР).
5. Ознайомитися з принциповою схемою та конструкцією надвисоковакуумної установки УВБЛ-4.
6. Ознайомитися з правилами експлуатації надвисоковакуумної установки УВБЛ-4 (знати призначення кожного її елемента та схему одержання вакууму).
7. Одержати (за необхідності) за допомогою сорбційних насосів безмасляний попередній вакуум у робочій камері установки УВБЛ-4 та виміряти його величину.
8. Одержати за допомогою НМДО-0,25 та виміряти високий вакуум у робочій камері надвисоковакуумної установки УВБЛ-4. Побудувати криву відкачування вакуумної камери на високий вакуум $P = f(t)$ та калібрувальну криву $P = f(I_p)$.

Конструкція вакуумної установки

У даній роботі використовується вакуумна установка УВБЛ-4 (установка вакуумна безмасляна лабораторна), принципова схема якої зображена на рис. 6.10. Загальний вигляд установки УВБЛ-4 зображений на рис. 6.11.

Високий вакуум 10^{-7} – 10^{-9} Тор (10^{-5} – 10^{-7} Па) створюється у вакуумній камері (8) (рис. 6.10) за допомогою магніторозрядного високовакуумного насоса НМДО-0,25 (11), який живиться від високовольного блока живлення БП-100 (1), розташованого у стійці з приладами (рис. 6.11). Вимірювання високого вакууму здійснюється за допомогою манометричного перетворювача типу МІД або ПММ-32 (9) (рис. 6.10) за допомогою блока живлення й індикації вакууму (4) (рис. 6.11), розташованого також у стійці.

Мас-спектрометр МХ7304 (7) (рис. 6.11) умонтований безпосередньо у вакуумну камеру (8) і дозволяє аналізувати склад залишкових газів у ній. У стійці з приладами знаходяться блоки живлення (5) мас-спектрометра і електронний самописний прилад (2) для запису мас-спектра.

Порядок роботи

1. Увімкнути механічний насос (1) (рис. 6.10), відкрити вентилі (2) та (12) й одержати у вакуумній камері розрідження $\sim 0,5$ Па (10^{-1} Тор).

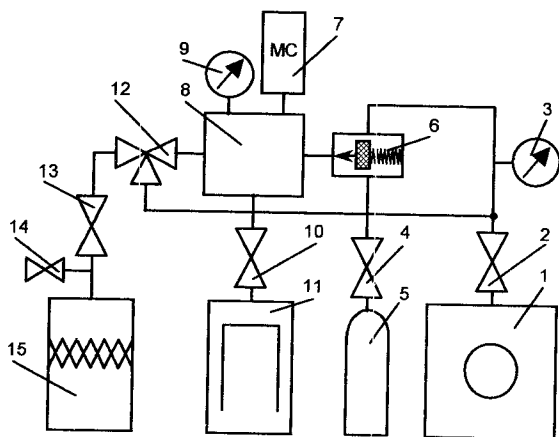


Рис. 6.10. Принципова схема вакуумної установки УВЕЛ-4:

1 – механічний форвакуумний насос; 2, 4 – запірні вентиля; 3 – манометричний перетворювач ПМТ-4М; 5 – балон з невідомим газом; 6 – дозуючий вентиль; 7 – мас-спектрометр МХ7304; 8 – вакуумна камера; 9 – манометричний перетворювач МІД (ПММ-32); 10 – високовакуумний вентиль ДУ-50; 11 – магніторозрядний насос НМДО-0,25; 12, 13 – запірний вентиль ДУ-12; 14 – запобіжний клапан; 15 – адсорбційний вугільний насос

2. Закрити вентиль (2), вимкнути механічний насос. Одержати у вакуумній камері розрідження $\sim 10^{-2}$ Па (10^{-4} Тор) за допомогою попередньо охолодженого до температури рідкого азоту адсорбційного насоса (15), відкривши вентиля (13) та (12). Попереднє відкачування камери проводять за умови закритого високовакуумного вентиля (10).
3. Після того, як у вакуумній камері було одержано вакуум $\sim 10^{-2}$ Па (10^{-4} Тор), закрити вентиля (12) та (13). Увімкнути блок живлення НМДО-0,25. Переконалися, вимірюючи струм розряду, що в насосі створено високий вакуум, після чого плавно, повільно відкрити високовакуумний вентиль (10). Якщо установка не була повністю розгерметизована і магніторозрядний насос перебував у робочому стані, а у вакуумній камері вакуум був не гірше ніж 10^{-2} Па (10^{-4} Тор), п. 1 і п. 2 виконувати не потрібно, роботу слід розпочати з виконання п. 3.

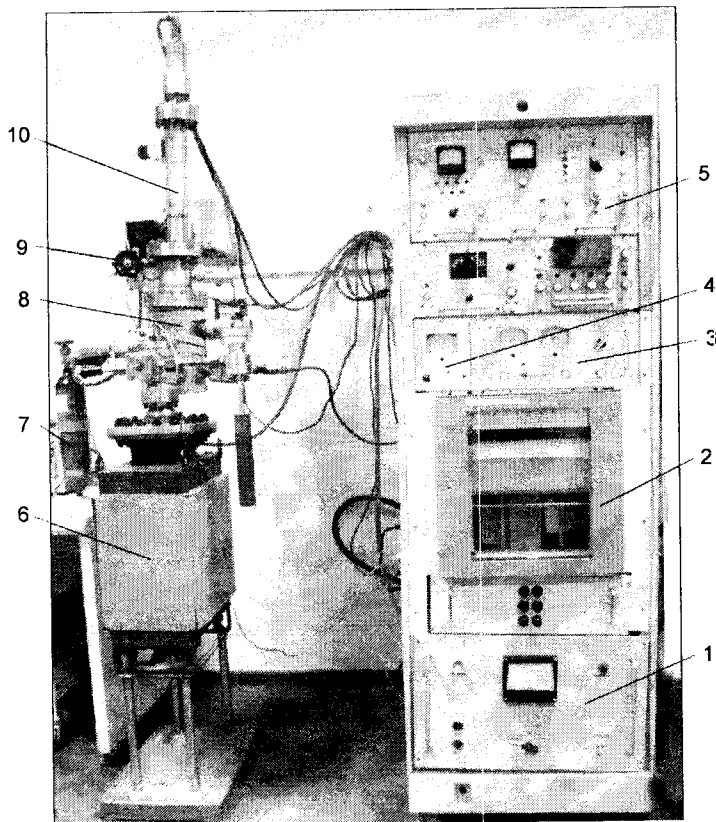


Рис. 6.11. Загальний вигляд вакуумної установки УВБЛ-4:

1 – блок живлення магніторозрядного насоса НМДО-0,25; 2 – електронний самописець КСП-4; 3 – блок живлення СНА-1; 4 – блок індикації вакууму; 5 – електронні блоки живлення мас-спектрометра МХ7304; 6 – магніторозрядний насос НМДО-0,25; 7 – балон з газом; 8 – вакуумна камера; 9 – дозуючий вентиль СНА-1; 10 – мас-спектрометр МХ7304

4. Виміряти високий вакуум за допомогою магнітного іонізаційного перетворювача (9).
5. Заповнити табл. 6.2 експериментальних результатів.
6. Побудувати графік відкачування за даними таблиці та калібрувальну криву $P = f(I_p)$.

Таблиця 6.2. Результати вимірювання тиску

$t, \text{с}$																			
$P, \text{Па}$																			
$I_p, \text{мА}$																			

Порядок вимикання вакуумної установки

1. Після завершення відкачування вакуумної камери механічним насосом закрити вентиль (2) і вимкнути насос.
2. Після закінчення відкачування вакуумної камери за допомогою адсорбційного насоса закрити вентилі (12) і (13), зняти посудину з рідким азотом з адсорбційного насоса.
3. Після закінчення роботи установки у високовакуумному режимі закрити високовакуумний вентиль (10).
4. Вимкнути живлення вакуумметра.
5. Вимкнути живлення магніторозрядного насоса.

Зміст звіту

1. Принципові схеми і короткий опис принципу роботи магніторозрядних насосів.
2. Принципова схема вакуумної установки та результати вимірювання тиску (крива відкачування на високий вакуум).

Запитання для самоконтролю

1. Будова та принцип дії магніторозрядних насосів. Механізм відкачування різних газів.
2. Чому для пуску магніторозрядного насоса в ньому потрібно створити попередній вакуум 10^{-2} Тор? Які особливості стартового режиму роботи насоса?
3. Від чого залежить граничний вакуум магніторозрядного насоса?

Література: [3, 5, 7–10].

Вивчення конструкції орбітронного гетерно-іонного насоса та одержання безмасляного високого вакууму

Мета роботи: ознайомитися з конструкцією та принципом роботи гетерно-іонного насоса типу „Орбітрон”, навчитися одержувати за допомогою нього високий безмасляний вакуум.

Обладнання: гетерно-іонний орбітронний насос у розібраному стані, технічна документація на насос, вакуумна установка УВБЛ-6 для одержання високого та надвисокого безмасляного вакууму, посудина Д'юара з рідким азотом.

Короткі загальні та теоретичні відомості

Випаровувальні (сублімаційні) насоси. Насоси орбітронного типу, як і магніторозрядні, належать до електрофізичних насосів, відкачувальна дія яких базується на фізико-хімічному зв'язуванні активних газів (H_2 , N_2 , O_2 тощо) плівкою гетера. Але, на відміну від магніторозрядних насосів, де гетерна плівка створюється в результаті розпилення масивного титанового катоду прискореними газовими іонами, в орбітронних насосах гетерна плівка з'являється в результаті випаровування невеликого шматочка титану, розігрітого до температури 1100–1300 °С. Однією з особливостей титану є те, що за цих температур він активно випаровується, залишаючись у твердому стані (таке випаровування називається сублімацією).

Вакуумні насоси, відкачувальна дія яких базується на використанні гетерних властивостей плівки, одержаної термічним випаровуванням атомів металу, називаються *випарними гетерними вакуумними насосами*, а в разі, якщо вихідний гетерний метал сублімує – *сублімаційними гетерними вакуумними насосами*. Це досить велика (близько двох

десятків різних модифікацій) група насосів, які відрізняються один від одного вихідним гетерним металом та способом його нагрівання для випаровування.

Як вихідний гетерний метал найчастіше використовуються хімічно активні метали Ва, Ті, Zr, Та, рідше Мо, Mg, Hf, Er, Y. У сучасних випаровувальних насосах як вихідний гетерний метал переважно застосовують титан, який утворює міцні нелеткі сполуки і тверді розчини з атомами майже всіх газів, що є у вакуумних системах, за винятком вуглеводнів та інертних газів. Крім цього, для потреб авіаційної й космічної техніки в другій половині ХХ століття були створені досить дешеві технології одержання як чистого титану, так і його сплавів у великій кількості. Тому більш дешевий, хоча й менш активний, ніж барій, титан у випаровувальних насосах використовується більш широко.

Таким чином, орбітронний насос можна вважати одним з різновидів титанових сублимаційних насосів.

Сьогодні застосовуються три основних способи нагрівання масивного титану до температури його випаровування у вакуумі: резистивний, електронно-променевий та дуговий. Конструкція випаровувача титану, у якій використовується один з цих способів, визначає в основному і конструкцію насоса в цілому.

Резистивний спосіб нагрівання титану полягає у використанні випаровувача прямого розжарення (рис. 7.1, а) або підігрівного випаровувача (рис. 7.1, б).

Як випаровувач прямого розжарювання використовуються біметалеві дроти з молібденовими кернами, на яких йодідною технологією нанесений шар титану. Випаровування титану відбувається вна-

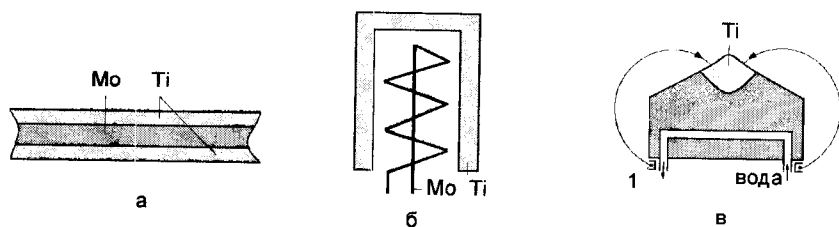


Рис. 7.1. Конструкції випаровувачів титану: а – випаровувач прямого розжарювання; б – підігрівний випаровувач; в – електронно-променевий випаровувач; 1 – катод

слідок його розігрівання після пропускання електричного струму через молібденовий kern. Промисловість виготовляє біметалеві дроти діаметром 2,3 та 6 мм (з шаром титану завтовшки 0,5–2 мм) і робочими струмами 50, 70 та 180 А відповідно.

Підігрівний випаровувач (рис. 7.1, б) являє собою оболонку з активного металу, усередину якої вмонтований дротяний нагрівник з тугоплавкого металу або сплаву, через який протікає електричний струм. Такі випаровувачі, як правило, виготовляються в дослідницьких лабораторіях для експериментальних вакуумних установок.

Резистивні випаровувачі є найпростішими у виготовленні й експлуатації. Вони забезпечують максимальну питому швидкість сублімації титану близько $0,01 \text{ мг/см}^2 \cdot \text{с}$ за максимальної робочої температури субліматора 1150°C . Основним недоліком таких випаровувачів є велика потужність, яку необхідно підводити до нагрівника. Теплові витрати для резистивних субліматорів становлять близько $1,8 \text{ кДж}$ на 1 мг титану, який випарувався, причому безпосередньо для випаровування титану витрачається лише 30–40% підведеної потужності. Тому насоси, у яких вони використовуються, мають водяне охолодження корпусу.

Електронно-променевий випаровувач (рис. 7.1, в) являє собою електронну гармату з вольфрамовим кільцевим катодом (1). Між анодом і катодом прикладається прискорювальна напруга в кілька тисяч вольт. Емітовані розжареним катодом електрони прискорюються цим потенціалом і фокусуються електричним або магнітним полем на поверхню мішені з активного металу, розташованого на аноді. У результаті бомбардування мішені такими електронами активний метал може бути розігрітий як до температури сублімації, так і до температури кипіння. Для мішені з титану максимальна питома швидкість випаровування розплавленого титану може досягати $10 \text{ мг/см}^2 \cdot \text{с}$, причому 80–95% енергії електронного пучка безпосередньо витрачається на випаровування титану. У потужних електронно-променевих випаровувачах анод охолоджується проточною водою.

При **дуговому** методі випаровування активного металу він розташовується в катодній плямі дуги постійного струму, яка запалюється між мішенню з активного металу й допоміжним вольфрамовим електродом. Як і в електронно-променевому випаровувачі мішень охолоджується проточною водою, а випаровування активного металу відбувається з поверхні мішені, повернутої до електроду. Живлення дуги здійснюється джерелом постійного струму з $U = 30\text{--}50 \text{ В}$ та $I = 100\text{--}200 \text{ А}$.

Дугові випаровувачі забезпечують найбільшу швидкість випаровування титану – близько $20 \text{ мг/см}^2 \cdot \text{с}$ з плями дуги, причому безпосередньо на випаровування металу витрачається близько 90% потужності дуги. Як правило, дугові випаровувачі застосовуються в потужних титанових насосах серії НД (насос дуговий) та ЕД (електродуговий), які забезпечують швидкість відкачування повітря близько $100 \cdot 10^3 \text{ л/с}$.

Найпростішим з випарних титанових насосів є титановий сублімаційний насос з біметалевою дротиною, схематично зображений на рис. 7.2. Циліндричний корпус (1) насоса, виконаний з нержавіючої сталі, охолоджується проточною водою і має фланці на обох кінцях. Одним з них насос приєднується до вакуумної системи, а на другий встановлюється заглушка з електричними струмоводами та опорними стійками, на яких монтується біметалевий субліматор титану (2). Субліматор розміщується вздовж осі насоса. Атоми титану, що випарувалися з поверхні субліматора в результаті його розігрівання після проходження електричного струму через молібдєновий kern, осідають на внутрішній поверхні стінки корпусу насоса, утворюючи на ній активну титанову плівку, температура якої є близькою до кімнатної внаслідок охолодження стінки насоса проточною водою.

Як правило, у насосі встановлюють не менше двох титанових субліматорів (для збільшення тривалості роботи насоса без заміни відпрацьованого субліматора), які можуть працювати поодиноці або разом.

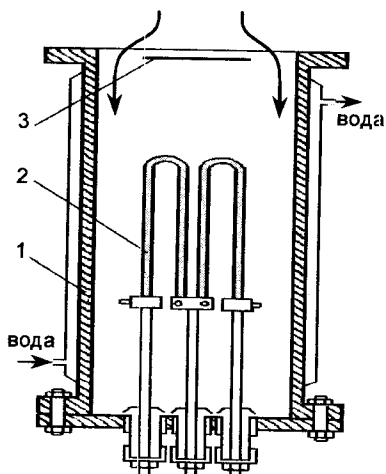


Рис. 7.2. Титановий сублімаційний насос:
1 – корпус; 2 – біметалевий субліматор;
3 – екран

Субліматор, за необхідності, може бути вмонтований і безпосередньо в робочу камеру вакуумної установки (без корпусу насоса). У такому разі атоми титану осідають на стінки вакуумної камери або ж на екран, розташований навколо субліматора.

Оскільки питома швидкість випаровування титану з біметалевих субліматорів невелика, то вони мають значні розміри (велику площу нагрітої поверхні), що забезпечує сумарну швидкість випаровування титану близько 1 мг/с.

Розглянемо більш докладно механізм відкачування газів плівкою активного металу, осадженою на поверхню стінки корпусу насоса. Газова молекула, яка внаслідок хаотичності свого руху потрапила на поверхню стінки насоса, деякий час знаходиться на ній в адсорбованому (зв'язаному) стані. Час адсорбції (утримування) відповідно до формули Френкеля становить

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{Q_a}{RT}}, \quad (7.1)$$

де τ_0 – деяка константа, приблизно однакова для всіх газів, яка дорівнює $\sim 10^{-13}$ с;

Q_a – теплота адсорбції (енергія зв'язку молекули газу з поверхнею);

R – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура поверхні.

Для основних складових повітря теплота фізичної адсорбції становить $Q_a \approx 20$ кДж/моль. За кімнатної температури поверхні час фізичної адсорбції газових молекул становить близько 10^{-10} с, тоді як за температури поверхні, яка дорівнює температурі рідкого азоту $T = 77$ К, близько 1 с.

Для молекул водяної пари і парів вакуумних масел теплота фізичної сорбції $Q_a \approx 80$ кДж/моль, що відповідає часу адсорбції $\tau \approx 100$ с за $T = 293$ К і $\tau = 10^{43}$ с за $T = 77$ К. Для інертного гелію $Q_a = 2$ кДж/моль, тому час адсорбції його атомів навіть за $T = 77$ К близький до мінімального ($\tau = 10^{-13}$ с).

Якщо поверхня, на яку впала молекула газу, виготовлена з хімічно активного металу Me (метали, про які йшлося раніше), між фізично адсорбованими молекулами газу й атомами поверхні може відбутися хімічна реакція з утворенням на поверхні хімічних сполук (гідридів MeH, оксидів MeO, нітридів MeN та ін.), у результаті чого газіві

молекули виявляються надійно зв'язаними поверхневим шаром металу. Це явище отримало назву *хемосорбції*.

Якщо скористатися для описання такої сорбції рівнянням (7.1), то теплота сорбції (енергія зв'язку газової молекули з поверхнею) дорівнюватиме теплоті хемосорбції

$$Q_a = Q_x, \quad (7.2)$$

яка є значно більшою, ніж під час фізичної сорбції. Так, наприклад, значення Q_x для кисню, хемосорбованого на поверхні титану, становить близько 10^3 кДж/моль, тоді як за фізисорбції кисню на металевій поверхні енергії зв'язку дорівнює лише 12–17 кДж/моль. Таким чином, „час утримування” молекули кисню на поверхні титану в разі хемосорбції є практично нескінченним навіть за кімнатної температури поверхні. Іншими словами, імовірність десорбції (випаровування) молекули кисню, хемосорбованої на поверхні титану, становить надзвичайно малу величину, яку можна вважати такою, що дорівнює нулю.

Слід зазначити, що низька температура поверхні (як у випадку фізичної адсорбції) для збільшення „часу утримування” молекули за хемосорбції не є обов'язковим параметром. Навпаки, залежно від пари газ – метал процеси хемосорбції відбуваються більш активно за кімнатних та більш високих температур, тоді як за низьких температур хімічні реакції уповільнюються або й зовсім не відбуваються. Отже, ефективність хемозв'язування („час утримування”) молекул газу поверхнею за низьких температур зменшується.

Конкретні значення енергії зв'язку (теплоти сорбції) Q_x залежать від пари газ – метал і температури поверхні металу. У табл. 7.1 наведені значення теплоти сорбції різних газів на титанових плівках за кімнатної температури.

Згідно з даними таблиці такі гази, як CO , N_2 , O_2 , CO_2 , хемосорбуються на поверхні титанової плівки, а інертні гази і водень знаходять-

Таблиця 7.1. Теплота сорбції газів плівкою титану

Газ	H_2	CO	N_2	O_2	CO_2	Xe	Kr	Ar
Q , кДж/моль	19,3	419	356	813	461	33,5	16,8	8,38

ся на поверхні плівки у фізично адсорбованому стані. Тому активні гази (CO , N_2 , O_2 , CO_2) добре поглинатимуться плівкою титану (десорбція їх практично не відбуватиметься), а інертні гази (через малу енергію зв'язку) практично не утримуються плівкою і легко десорбують з її поверхні.

Важливою характеристикою відкачувальних властивостей насосів з плівкою активного металу є не тільки значення теплоти сорбції, а й так званий „коєфіцієнт прилипання” молекул того чи іншого газу до плівки. Під коєфіцієнтом прилипання розуміють величину

$$\beta = \frac{N_2}{N_1}, \quad (7.3)$$

де N_1 – кількість молекул газу, що впали на одиницю поверхні плівки за одиницю часу;

N_2 – кількість молекул газу, що були зв'язані одиницею поверхні плівки за одиницю часу.

Цілком зрозуміло, що для ідеальної сорбуючої поверхні (якщо всі газові молекули, що впали на поверхню, були зв'язані нею) $\beta = 1$. Для реальних плівок $\beta < 1$. Величина коєфіцієнта прилипання не може бути розрахована теоретично (за винятком ідеальної сорбуючої поверхні) через складність й невивченість до кінця процесів, що відбуваються на поверхні активної плівки при бомбардуванні її молекулами газу. Величина β залежить від багатьох факторів (передісторії плівки та її структури, температури й способу напilenня, складу газів тощо) і визначається експериментально. У табл. 7.2 наведені узагальнені дані стосовно коєфіцієнтів прилипання β різних газів для свіже-сконденсованої титанової плівки та розраховані за цими даними значення питомої швидкості відкачування s такої плівки (плівки одиничної площі). Величина питомої швидкості відкачування розраховується за формулою

$$s = \beta s_0, \quad (7.4)$$

де β – коєфіцієнт прилипання;

s_0 – питома швидкість відкачування ідеальної сорбуючої поверхні:

$$s_0 = \sqrt{\frac{R}{2\pi}} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}} = 3,64 \sqrt{\frac{T}{\mu}}, \quad \frac{\text{л}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}, \quad (7.5)$$

Таблиця 7.2. Середні значення коефіцієнтів прилипання β та питомих швидкостей відкачування s різних газів плівкою титану (температура газу $T = 293$ К)

Газ	μ , а.о.м.	Ідеальна сорбуюча поверхня		Титанова плівка			
				$T = 293$ К		$T = 77$ К	
		β_0	s_0 , л/с · см ²	β	s , л/с · см ²	β	s , л/с · см ²
H ₂	2	1,0	44,2	0,11	4,7	0,22	10,0
N ₂	28	1,0	11,8	0,4	4,8	0,8	9,2
CO	28	1,0	11,8	0,66	7,8	0,85	10,0
O ₂	32	1,0	11,0	0,91	10,0	0,66	7,3
CO ₂	44	1,0	9,4	0,5	4,7	0,92	8,6
H ₂ O	18	1,0	14,7	1,0	14,7	1,0	14,7
CH ₄	16	1,0	15,6	0,001	0,01	0,01	1,0
He	4	1,0	31,1	0	0	0	0
Ne	20	1,0	13,9	0	0	0	0
Ar	40	1,0	9,8	0,001	0,01	0	0
Kr	83	1,0	6,8	0	0	0	0
Xe	130	1,0	5,4	0	0	0	0

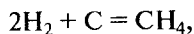
де T – абсолютна температура газу;
 μ – молярна маса газу в а.о.м.

З таблиці бачимо, що для насосів з титановою плівкою характерна значна селективність (вибірковість) відкачування – інертні газы (як і очікувалося) зовсім не відкачуються такими насосами, для водяної пари поверхня титанової плівки є практично ідеальною сорбуючою поверхнею ($\beta = 1$), для інших газів коефіцієнт прилипання β змінюється в межах від $\beta = 0,001$ (метан CH₄) до $\beta = 0,92$ (вуглекислий газ CO₂).

Для більшості газів за азотної температури титанової плівки ($T = 77$ К) характерне збільшення величини b майже удва рази. Виняток становить кисень, для якого за кімнатної температури титанова плівка є майже ідеальною сорбуючою поверхнею ($\beta = 0,91$), а за $T = 77$ К коефіцієнт прилипання зменшується до значення $\beta = 0,66$. Очевидно, це пов'язане з уповільненням реакції окиснення титану за низьких температур.

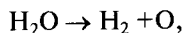
Внаслідок значної селективності відкачування різних газів залишкова атмосфера титанових сублімаційних насосів буде збагачена інертними газами, воднем та метаном.

Вивчення причин появи метану (CH_4) у складі залишкових газів сублимаційних насосів було окремим предметом досліджень протягом кількох років. Це пояснюється тим, що метану у складі атмосферного повітря дуже мало (близько $1 \cdot 10^{-5}\%$), а в залишкових газах сублимаційних титанових насосів метан є основною складовою, яка визначає граничний тиск цих насосів. Було встановлено, що метан синтезується в насосі під час його роботи. У результаті відкачування титановою плівкою H_2 на її поверхні в процесі каталітичної реакції синтезується CH_4



де титан відіграє роль каталізатора цієї реакції.

Джерелом вуглецю для цієї реакції можуть бути раніше адсорбовані плівкою CO та CO_2 , а також вільний вуглець, розчинений у плівці. Джерелом водню може бути як вільний водень у залишковій атмосфері, так і водень, який утворився на поверхні плівки в результаті сорбції нею водяної пари. Сорбція водяної пари титановою плівкою відбувається дуже активно (табл. 7.2) і супроводжується виділенням водню (молекула H_2O під час сорбції розпадається



а утворений атом кисню активно хемосорбується поверхнею плівки).

Коефіцієнт прилипання для метану навіть за температури титанової плівки $T = 77 \text{ K}$ становить дуже малу величину $\beta = 0,01$ (табл. 7.2). Незначна кількість метану, поглинутого плівкою за $T = 77 \text{ K}$, повністю виділяється в разі її нагрівання до $T = 120\text{--}130 \text{ K}$, тобто поглинання метану не є незворотним.

Дані, наведені в табл. 7.2, характеризують свіжесконденсовану титанову плівку. Як і інші сорбційні (поглинальні) насоси, титановий сублимаційний насос має певну поглинальну ємність для того чи іншого газу. Величина поглинальної ємності через складність і невивченість до кінця сорбційних явищ не може бути розрахована теоретично й визначається експериментально. Вона залежить від багатьох факторів: товщини, температури і структури плівки та ступеня покриття поверхні плівки газовими молекулами. Цілком зрозуміло, що якщо всі атоми Ti на поверхні плівки хімічно прореагували з газовими атомами і відсутнє відведення (дифузія) продуктів реакцій у глибину (товщу) плівки, то подальша сорбція газових молекул такою плівкою

відбуватися не буде. Іншими словами, у процесі відкачування (у разі збільшення ступеня покриття поверхні плівки активного металу газовими молекулами) коефіцієнт прилипання газових молекул β буде зменшуватися, відповідно зменшуватиметься і питома швидкість відкачування s . Для відновлення сорбції поверхня плівки повинна покриватися новими шарами атомів титану.

У більшості випадків (середній і високий вакуум) у сублимаційних насосах відновлення титанової плівки відбувається неперервно і (підтримується максимальна робоча температура сублиматора титану, що забезпечує постійне випаровування з подальшим осіданням на стінці насоса атомів титану). В умовах надвисокого вакууму, коли потік газових молекул на стінку насоса з плівкою є незначним, можна або знизити швидкість випаровування титану, або перейти в імпульсний (періодичний) режим роботи сублиматора. Відповідні розрахунки показують, що сублиматор повинен працювати неперервно за тисків газу в насосі $P > 10^{-5}$ Па (10^{-7} Тор).

Особливістю пари H_2 -Ті є те, що сорбційна ємність титану для водню є найбільшою порівняно з іншими газами. Величина сорбційної ємності титану для водню більша приблизно в 500 разів, ніж величина сорбційної ємності для кисню, азоту та оксиду вуглецю.

Необхідно також зазначити, що в разі сорбції суміші різних газів має місце конкуренція і дискримінація (пригнічення) сорбції одних газових молекул іншими. Через складність вивчення цих процесів дані різних дослідників є надзвичайно суперечливим.

Завершуючи розгляд типових випаровувальних насосів зупинимося на деяких їх характеристиках.

Верхня межа робочих тисків (найбільший робочий тиск) визначається утворенням стійких хімічних сполук (оксидів, нітридів і карбідів титану) безпосередньо на поверхні випаровувача (сублиматора) титану, що унеможливує з нього випаровування титану і становить $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па ($1 \cdot 10^{-4}$ Тор) для сублимаційних насосів з резистивними випаровувачами.

Нижня межа робочого тиску (граничний вакуум) визначається рівноважним тиском залишкових газів над поверхнею титанової плівки та інтенсивністю утворення метану. У разі зменшення температури титанової плівки зменшується й рівноважний тиск залишкових газів та гальмуються процеси утворення метану; за азотних температур плівки ($T = 77$ К) синтез метану практично повністю припиняється.

Граничний вакуум випаровувальних титанових насосів з охолодженням титанової плівки (стінки насоса) проточною водою кімнатної температури становить $1,3 \cdot 10^{-5}$ Па ($1 \cdot 10^{-7}$ Тор). При використанні екранів, на які осідає титанова плівка, охолоджених до температури рідкого азоту $T = 77$ К (азотна кріопанель), граничний вакуум випарних титанових насосів сягає 10^{-10} Па (10^{-12} Тор).

Швидкість дії випарних насосів визначається площею поверхні стінки насоса, покритою титановою плівкою, і досить легко розраховується за даними табл. 7.2.

Малі сублимаційні насоси мають два біметалевих сублиматори титану діаметром 2 мм і забезпечують швидкість дії для азоту близько 10^3 л/с при охолодженні корпусу насоса проточною водою. Великі насоси мають до 7 біметалевих сублиматорів титану діаметром 6 мм і забезпечують швидкість дії для азоту близько $150 \cdot 10^3$ л/с при охолодженні корпусу насоса проточною водою. У разі використання екранів (кріопанелей) з охолодженням рідким азотом швидкість дії насосів збільшується майже у 2 рази.

Для відкачування газових середовищ з важкими вуглеводнями (C_mH_n) і інертними газами титанові сублимаційні насоси є малоефективними.

У процесі експлуатації випаровувальних титанових насосів необхідно періодично очищувати стінку корпусу насоса і екранів-кріопанелей від титанової плівки. Якщо товщина плівки сягає кількох десятків мікрометрів, через різницю коефіцієнтів термічного розширення плівки і матеріалу, з якого зроблено корпус насоса, плівка починає відшаровуватись і осипатися. Очищення стінки проводять механічними способами (струменем піску, металевою щіткою тощо). Необхідно зважати, що при очищенні плівки металевою щіткою можливе самозагорання титанового пилу.

Іонно-гетерні насоси. Основний недолік титанових випаровувальних насосів – нездатність відкачувати інертні гази та вуглеводні, вдалося певною мірою подолати, використавши ефект іонного відкачування. У результаті вивчення процесів, які відбуваються з газовими молекулами під час протікання електричного струму у вакуумі, було встановлено, що іонізовані молекули активних газів H_2 , N_2 , CO , O_2 (іони H_2 , N_2 , CO , O_2) мають набагато більшу активність при сорбції (ефективніше хемосорбуються плівкою активного металу) порівняно

з нейтральними молекулами цих газів. Крім того, якщо такі іони прискорити електричним полем, надавши їм енергії в кілька кеВ, то при бомбардуванні ними активної металевої поверхні відбувається не тільки їх поверхнева хемосорбція, а й проникання (імплантація) у товщу металу.

Таким чином, якщо частину молекул залишкових газів у випарному титановому насосі іонізувати, прискорити й спрямувати на поверхню титанової плівки, то їх сорбція буде більш ефективною (більший коефіцієнт прилипання).

Іонізація складних органічних молекул (вуглеводнів) призводить до розпадання таких молекул на іони-осколки, які також можна прискорити й імплантувати в плівку активного металу. Усі ці явища одержали загальну назву іонного відкачування.

Випарні насоси, які реалізують ще й ефект іонного відкачування, одержали назву *іонно-гетерних (гетерно-іонних) насосів*.

Залежно від способу іонізації газових молекул та способу прискорення іонів було створено кілька різновидів таких насосів. З одним із них – магніторозрядним насосом – ми вже познайомилися, виконуючи попередню лабораторну роботу.

В іонно-гетерному насосі перш за все необхідно забезпечити ефективну іонізацію (максимальну чисельність іонів) газових молекул. Існує кілька способів іонізації газових молекул у вакуумі. У магніторозрядних насосах, наприклад, іонізація газових молекул відбувається в комірці Пеннінга у схрещених електричному й магнітному полях. Іонізація газових молекул може також відбуватися під дією радіоактивного випромінювання в дуговому або тліючому розряді тощо. Але найчастіше для іонізації газових молекул у вакуумі використовується електронний удар, коли електрони з енергією більше ніж 100 еВ, зіштовхуючись з молекулами газу вибивають з електронної оболонки останніх один або кілька електронів. Іони, що утворилися, мають додатний заряд. Саме цей спосіб і використовується в іонно-гетерних насосах.

Для реалізації цього способу іонізації в насосі необхідно мати джерело електронів, систему електродів для надання електронам відповідної енергії, а також створити умови, які б забезпечували високу ефективність іонізації газу.

Першим таким насосом став створений у середині 50-х років ХХ століття насос, який поєднував у собі два функціонально незале-

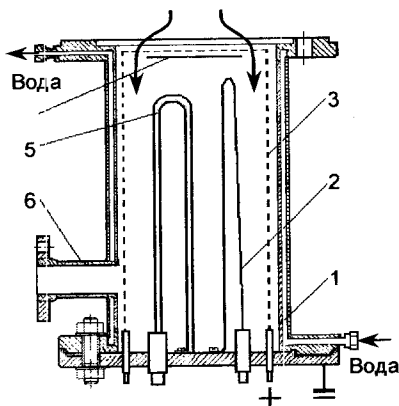


Рис. 7.3. Насос типу ГН: 1 – корпус; 2 – катод; 3 – анодна сітка; 4 – екран; 5 – сублиматор Ті; 6 – відкачний патрубок

жних та доповнюючих один одного пристрої: випаровувач титану та іонізатор газів молекул електронним ударом. У СРСР такий насос одержав назву ГН – гетеро-іонний насос, будова якого схематично зображена на рис. 7.3. Зарубіжні насоси мають аналогічну конструкцію.

ГН складається із циліндричного корпусу (1) з нержавіючої сталі з двома фланцями на кінцях. Корпус охолоджується проточною водою. Одним із фланців насос приєднується до вакуумної системи, на заглушці другого зібрані електродні системи випаровувача Ті та іонізатора газу. Через боковий патрубок (6) насос відкачується до попереднього вакууму.

Електродна система насоса складається з проточного випаровувача Ті (біметалевого сублиматора) (5), іонізатора газів молекул з вольфрамовим катодом (2) та рідкою анодною сіткою (3). Екран (4) запобігає прониканню атомів Ті до вакуумної системи.

Залежно від модифікації в насосі розміщується від двох до шести біметалевих U-подібних титанових сублиматорів діаметром 2–3 мм для ефективного запилення внутрішньої поверхні корпусу насоса титановою плівкою.

У процесі іонізації газів молекул вольфрамовий шпилькоподібний катод (2) діаметром 0,5 мм розжарюється внаслідок пропускання через нього електричного струму до появи на його поверхні в результаті термоелектронної емісії електронів. До рідкої молібденової анодної сітки (3), розташованої поблизу корпусу насоса, прикладається

додатній потенціал у 1200 В відносно заземленого на корпус насоса катода. Електрони, що вилітають з катода, рухаються прискорено до анодної сітки, набуваючи великої (близько 1200 еВ) енергії. Більшість електронів пролітають крізь рідку сітку, відштовхуються від зарядженої від'ємно стінки корпусу і, перш ніж остаточно осісти на сітці, здійснюють кілька коливань навколо її витків. Зустрічаючи на своєму шляху молекули залишкових газів, електрони іонізують їх, вибиваючи з молекули один або кілька електронів. Утворені додатні іони прискорено рухаються до від'ємно зарядженої стінки корпусу насоса, імплантиуються (за достатньої енергії) в осаджену на стінці титанову плівку та хемосорбуються нею.

Таким чином, стінка насоса відіграє роль колектора іонів. Якщо нейтральні газові молекули потрапляють на стінку насоса (плівку титану) випадково, унаслідок хаотичності свого руху в порожнині насоса, то іонізовані газові молекули рухаються до неї спрямовано.

Як уже зазначалося, іонізовані молекули набагато активніше й ефективніше хемосорбуються титановою плівкою. На відміну від чисто сублимаційних насосів, іонно-гетерні насоси краще відкачують як інертні гази, так і вуглеводні. У літературі навіть повідомлялося про можливість утворення хімічних сполук іонів He з Ti, але відкачування інертних газів забезпечується переважно імплантацією їх іонів у товщу плівки з подальшим їх „замуровуванням” новоосадженими шарами титану.

Анодна сітка може використовуватися також і як внутрішній нагрівник для знегажування корпусу насоса (завдяки тепловому випромінюванню, що виникає при пропусканні через неї електричного струму).

Граничний вакуум насосів серії ГН становить $1 \cdot 10^{-7}$ Па ($1 \cdot 10^{-9}$ Тор), тиск запуску – не більше $1 \cdot 10^{-1}$ Па ($1 \cdot 10^{-3}$ Тор). Залежно від розмірів насоса і кількості розташованих у ньому титанових сублиматорів швидкість дії насосів для повітря варіюється від 5 л/с (ГН-005) до 5000 л/с (ГН-5). Як і сублимаційні титанові, іонно-гетерні насоси мають значну селективність відкачування. Склад залишкової атмосфери ГН-ів також аналогічний складу залишкової атмосфери сублимаційних титанових насосів. Основними її компонентами є водень, метан, оксид вуглецю й аргон. Одним із недоліків ГН-ів є їх чутливість до аварійного проривання в працюючий насос атмосферного повітря (перегрівання катода).

Насоси орбітронного типу. У ГІН-ах випаровувач титану й іонізатор газових молекул працюють незалежно один від одного й функціонально не пов'язані між собою. Крім того, через невелику довжину вільного пробігу електронів (вони коливаються поблизу анодної сітки), у ГІН-ах імовірність іонізації газових молекул є також незначною, як і швидкість відкачування інертних газів такими насосами.

Цей недолік ГІН-ів було подолано у випарних гетерно-іонних насосах орбітронного типу (ОГІН). Уперше такий насос був створений Хербом у 60-ті роки минулого століття. Експериментуючи з манометричними перетворювачами Байярда-Альперта з іонізацією газів електронним ударом, Херб намагався збільшити чутливість цих перетворювачів у надвисоковакуумній області шляхом збільшення довжини вільного пробігу електронів. У результаті була запропонована конструкція перетворювача, у якому довжина вільного пробігу електронів зросла в десятки разів порівняно зі стандартними перетворювачами Байярда-Альперта. Таке збільшення довжини вільного пробігу електронів досягалося завдяки їх руху по довгих орбітальних траєкторіях (орбітронний ефект) навколо центрального електрода – анода. Орбітронний ефект був використаний Хербом і для створення конструкції вакуумного насоса, який одержав назву орбітронного насоса.

Конструкція (рис. 7.4) орбітронного насоса є надзвичайно простою. Він складається з циліндричного корпусу (1) з нержавіючої сталі з двома фланцями на торцях. Корпус охолоджується проточною водою. Одним із фланців (нижнім на рис. 7.4) насос приєднується до

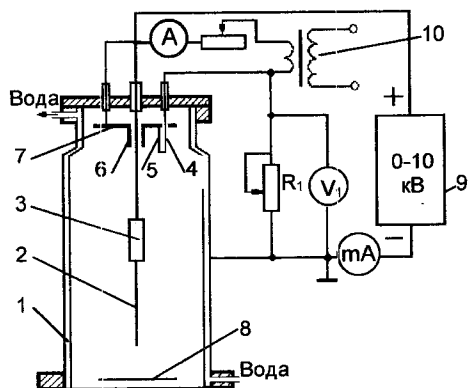


Рис. 7.4. Орбітронний насос з блоком живлення: 1 – корпус; 2 – анод; 3 – титановий циліндр; 4 – катод; 5 – тримач катода; 6 – екранна трубка; 7 – екранна пластина; 8 – екран-заслонка; 9 – високовольний випрямляч; 10 – трансформатор

вакуумної системи. На заглибленні другого фланця знаходиться система електродів, яка забезпечує й орбітальний рух електронів, і сублимацію титану.

Усередині корпусу на його вісі розташований анод (2), виготовлений з тонкої (діаметром 1–2 мм) вольфрамової дротини. Між корпусом і анодом прикладається висока напруга близько 10 кВ від високовольтного випрямляча (9), як показано на рисунку.

Таким чином, в електричному аспекті насос являє собою циліндричний конденсатор, однією з обкладок якого є від'ємно заряджений корпус, другою – додатно заряджений стрижневий анод.

На аноді закріплений невеликий шматочок титану (3) у вигляді циліндра діаметром 10–15 мм і заввишки 20–25 мм. Електрони емітуються вольфрамовим катодом прямого розжарення (4) діаметром 0,1–0,15 мм, який розташований на одному з кінців насоса і живиться змінним струмом від трансформатора (10). Катод знаходиться під невеликим (до 250 В) додатнім потенціалом зміщення $U_{зм}$ відносно корпусу насоса, величина $U_{зм}$ регулюється потенціометром R_1 .

Насос працює таким чином. Електрони, емітовані розігрітим катодом, рухаються прискорено до аноду. Безпосередньому їх потраплянню на анод перешкоджають тримач катода (5), виготовлений із дротини діаметром 1–1,5 мм, і екранна трубка (6), яка закриває частину аноду напроти катода. Таким чином переважна більшість емітованих катодом електронів пролітає мимо аноду. Крім цього, оскільки катод і його тримач знаходяться під потенціалом зміщення $U_{зм}$, це призводить до деякого спотворення аксіально-симетричного електричного поля насоса в просторі поблизу катода, як зображено на рис. 7.5. Поблизу като-

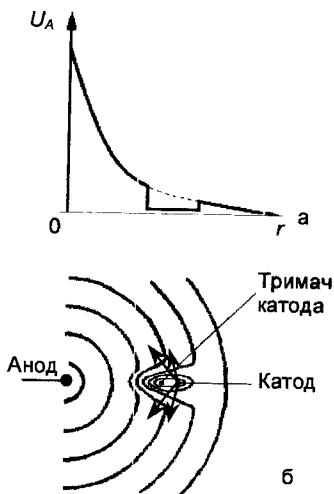


Рис. 7.5. Графічне зображення розподілу потенціалу в орбітронному насосі:
а – у площині анод-катод;
б – у діаметральному перерізі на рівні катода

да має місце стрибок потенціалу (рис. 7.5, а), унаслідок чого з'являються еквіпотенціальні поверхні, що охоплюють область простору, де знаходиться катод і його тримач (рис. 7.5, б).

У таких умовах електрони, що вилетіли з поверхні катода, починають рухатися нормально до найближчих еквіпотенціальних поверхонь електричного поля (як показано стрілками на рис. 7.5, б) і влітають у невикривлену область електричного поля, маючи, крім радіальної, значні як тангенціальну, так і аксіальну (осьову) складові своєї швидкості. Оскільки корпус відносно катода має від'ємний потенціал ($U_{зм}$), то осідати на ньому електрони не можуть. Вони прискорено рухаються в порожнині насоса, наближаючись до анода. Відповідні розрахунки траєкторій руху електронів за таких умов показують, що в порожнині насосу вони рухаються за складними просторовими кривими, відбиваючись від кінців насоса, де обривається електричне поле. На рис. 7.6 наведені типові траєкторії руху електронів з різними за величиною і напрямом початковими швидкостями в проекції на площину діаметрального перерізу насоса.

Таким чином, електрони, перш ніж потрапити на анод, рухаються по просторових орбітальних траєкторіях навколо нього і проходять досить великий (кілька метрів) шлях. Наявність такої великої довжини вільного пробігу в електронів істотним чином збільшує ймовірність іонізації ними молекул залишкових газів.

Урешті-решт усі електрони потрапляють на анод, створюючи в колі анод-корпус деякий електронний струм, який вимірюється міліам-

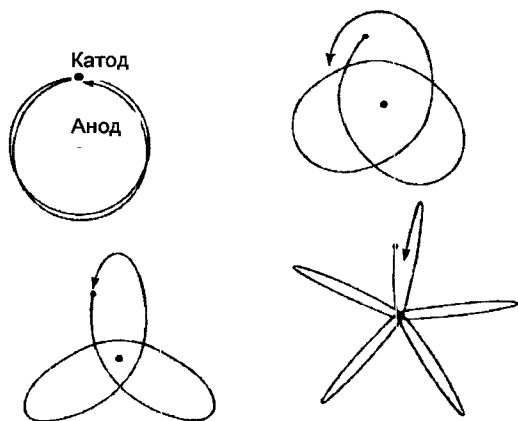


Рис. 7.6. Форми орбіт електронів у насосі (у площині діаметрального перерізу)

перметром (рис. 7.4). Оскільки діаметр анодного стрижня (1–2 мм) набагато менший за діаметр титанового циліндра (10–15 мм), то переважна більшість електронів перехоплюється саме титановим циліндром. Завдяки своїй значній енергії (кілька кеВ), електрони розігрівають його до температури сублімації 1100–1300 °С. Отже, в орбітронному насосі розпилення титану відбувається електронно-променевим способом, причому одні і ті ж самі електрони використовуються як для іонізації газових молекул, так і для розпилення титану.

Атоми титану, що випарувалися з поверхні циліндра, осідають на стінці корпусу насоса, утворюючи на ній сорбуючу титанову плівку.

Активні гази відкачуються насосом завдяки хемосорбції нерівно відновлюваної титанової плівки. Інертні гази відкачуються насосом унаслідок іонізації їхніх атомів електронами, що рухаються в порожнині насоса, і подальшого прискореного руху утворених додатних іонів до від'ємно зарядженої стінки корпусу насоса та наступної їх імплантації в титанову плівку і „замуровування” в ній осідаючими атомами Ті.

Тими ж самими прискореними електронами молекули важких вуглеводнів розбиваються на фрагменти-осколки, які також сорбуються титановою плівкою.

Таким чином, механізм відкачування орбітронного насоса аналогічний механізму відкачування ГН, але інертні гази (завдяки набагато довшим траєкторіям електронів) орбітронним насосом відкачуються більш ефективно (з більшими швидкостями). Для розрахунків швидкості відкачування активних газів орбітронним насосом можна скористатися даними табл. 7.2.

Швидкість дії орбітронних насосів, як і ГН-ів, визначається величиною площі поверхні стінки насоса, покритої титановою плівкою, і для промислових зразків насосів змінюється в межах від 200 л/с до 1000 л/с.

Граничний вакуум орбітронних насосів з охолодженням корпусу насоса (титанової плівки) проточною водою (за кімнатної температури) становить 10^{-8} Па (10^{-10} Тор). Використання азотної кріопанелі, на яку осаджується частина атомів Ті, дозволяє одержувати граничний вакуум порядку 10^{-11} Па (10^{-13} Тор).

Конструкція орбітронного насосу. На кафедрі фізики СумДПУ ім. А.С. Макаренка у 80-ті роки минулого століття під керівництвом

доц. В.Б. Лободи разом з інженерами в/о „Електрон” (нині ВАТ „Selmi”) було створено орбітронний насос для мас-спектрометрів МІ-1201В та МІ-1201ІГ. Насос був упроваджений у виробництво, серійно випускали кілька модифікацій базової моделі.

Одна з модифікацій такого насоса (рис. 7.7) використовується в цій роботі.

Насос складається з трьох основних вузлів: корпуса (1) з водяним охолодженням, фланця з електродною системою (2) та відсіку (3) для азотної кріопанелі. Через патрубок (5) насос приєднується до вакуумної системи, до патрубку (4) приєднується манометричний перетворювач ПММ-32 для вимірювання в насосі вакууму.

Анодний стрижень (7) виготовлений з вольфрамової дротини діаметром 2 мм, на стрижні закріплений циліндр (8), виготовлений з йодідного титану. Нитка розжарення катоду (10) має діаметр 0,12 мм і виготовлена з вольфрам-ренієвого сплаву. У насосі розміщено два однакових катоди – резервний і робочий. Екранна пластина (9) з екранною трубкою виготовлені з нержавіючої сталі. Елементи електродної

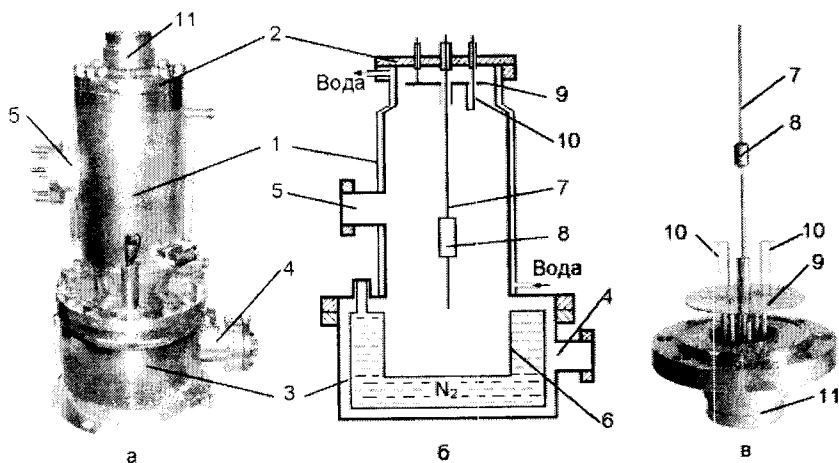


Рис. 7.7. Зовнішній вигляд (а), схематичне зображення конструкції (б) та електродна система (в) орбітронного насоса виробництва ВАТ „Selmi”:
 1 – корпус; 2 – електродний фланець; 3 – відсік для азотної кріопанелі; 4 – патрубок для ПММ-32; 5 – присднувальний патрубок; 6 – азотна кріопанель; 7 – анод; 8 – титановий циліндр; 9 – екранна пластина; 10 – катод; 11 – цоколь

системи зібрані на стрижнях-струмоводах цоколя (11), який аналогічний зображеному на рис. 1.3, б.

Насос має вертикальне робоче положення з цоколем угорі (як зображено на рис. 7.7, а). У нижній частині насоса в спеціальному відсіці (3) розташована азотна кріопанель (6), утворена внутрішньою (зверненою до аноду) поверхнею ємності, куди заливається рідкий азот. Ємність виготовлена з тонкої листової нержавіючої сталі і схожа на перевернуту букву П.

Атоми Ті, що випаровуються з розігрітого титанового циліндра (8), осідають як на бічній поверхні внутрішньої стінки корпусу насоса (1) (водяне охолодження), так і на внутрішніх поверхнях ємності з рідким азотом (охолодження до азотних температур $T = 77$ К). Ємність для рідкого азоту має внутрішній діаметр трохи більший за діаметр корпусу насоса для того, щоб шматочки титанової плівки, які з часом можуть відшаровуватися від стінки корпусу насоса, падали на її дно і знаходилися там за низької температури (цим зменшується їх газовиділення).

Живлення насоса здійснюється від електричного блока, принципова електрична схема якого аналогічна зображеній на рис. 7.4. Анодна напруга становить +7 кВ. Корпус насоса заземлюється. Струм розжарення нитки катода змінюється за допомогою реостата (рис. 7.4) у межах 0–3,2 А.

Розрахункова швидкість дії насоса для активних газів становить близько 400 л/с при охолодженні корпусу насоса проточною водою й близько 500 л/с при використанні азотної кріопанелі, охолодженої до $T = 77$ К. Оскільки насос призначався для відкачування камери аналізатора мас-спектрометра МІ201 (і йому подібних), то відкачування здійснюється через боковий патрубок (5) (рис. 7.7) ДУ-40 або ДУ-60 залежно від модифікації насоса. Унаслідок цього ефективна швидкість відкачування насоса становить $S_{\text{еф}} = 100\text{--}250$ л/с залежно від діаметра патрубка. Граничний вакуум насоса при охолодженні корпусу насоса проточною водою становить 10^{-8} Па (10^{-10} Тор), при використанні азотної кріопанелі, охолодженої до $T = 77$ К, – краще за 10^{-10} Па (10^{-12} Тор).

Вакуумна установка. У роботі використовується вакуумна частина надвисоковакуумної установки УВБЛ-6, яка детально описана в лабораторній роботі № 8 (принципова схема установки зображена на рис. 8.1, загальний вигляд – на рис. 8.2).

Вакуумна частина УВБЛ-6 подана на рис. 7.8.

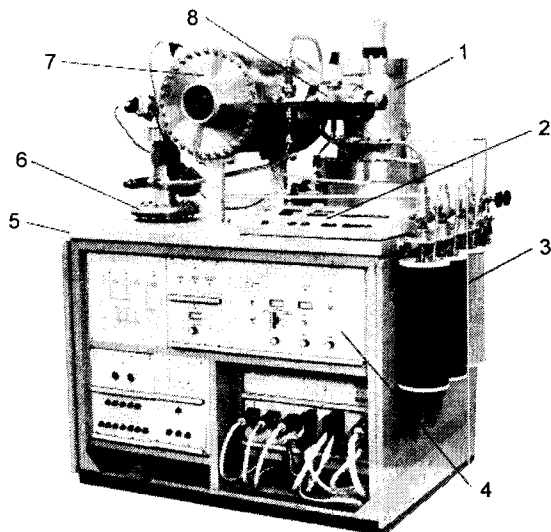


Рис. 7.8. Вакуумна частина установки УВБЛ-6: 1 – орбітронний насос; 2 – пульт управління; 3 – сорбційні насоси попереднього вакууму; 4 – блок живлення орбітронного насоса; 5 – опорна плита; 6 – фланець магніторозрядного насоса НМД-0,16; 7 – вакуумна камера; 8 – вентиль ДУ-60

Основними елементами вакуумної системи УВБЛ-6 (рис. 7.8) є орбітронний насос (1), система трьох адсорбційних вугільних насосів (3) для створення попереднього безмасляного вакууму та циліндрична вакуумна камера (7) об'ємом близько 20 л. Усі елементи вакуумної системи змонтовані на масивній опорній плиті (5). Під плитою на фланці (6) кріпиться магніторозрядний насос НМД-0,16. До складу вакуумної системи УВБЛ-6 входять також трубопроводи та вентилі, якими забезпечується можливість незалежного відкачування будь-якого з елементів системи (орбітронний насос, магніторозрядний насос, вакуумна камера) до попереднього вакууму 10^{-2} Па (10^{-4} Тор) адсорбційними насосами.

Орбітронний насос з'єднується з вакуумною камерою вентилем ДУ-60 (8). Таким самим вентилем з'єднується з вакуумною камерою і магніторозрядний насос. Корпус орбітронного насоса та вакуумна

камера можуть прогріватися до 300 °С електричним нагрівником або охолоджуватися проточною водою (нагрівники і змішувачі водяного охолодження закриті металевими кожухами корпусу насоса та камери). Високий вакуум у вакуумній камері та обох насосах вимірюється за допомогою трьох манометричних перетворювачів ПММ-32, вакуумметрами ВМБ-14 або вакуумметром пульту управління (2) установкою. Попередній вакуум вимірюється або з пульту управління, або вакуумметром ВІТ-2 за допомогою манометричного перетворювача ПМТ-2.

Живлення орбітронного насоса здійснюється електронним блоком живлення (4), розміщеним під плитою у відсіці для електронних блоків УВБЛ-6.

Завдання до роботи

1. Ознайомитися з конструкцією, технічними даними та правилами експлуатації орбітронного насоса (заводські інструкції, розібраний насос).
2. Ознайомитися з правилами експлуатації адсорбційних вугільних насосів з охолодженням рідким азотом.
3. Ознайомитися з правилами експлуатації приладів для вимірювання низького та високого вакууму (інструкції до вакууметрів ВІТ-2 і ВМБ-14 та манометричних перетворювачів ПМТ-2 і ПММ-32).
4. Ознайомитися з принциповою схемою, конструкцією надвисоково-вакуумної установки УВБЛ-6 та правилами її експлуатації (знати призначення кожного її елемента і схему одержання вакууму).
5. Одержати (за необхідності) безмасляний попередній вакуум у робочій камері установки за допомогою адсорбційних насосів.
6. Одержати високий вакуум у робочій камері установки за допомогою магніторозрядного насоса НМД-0,16.
7. Одержати високий вакуум у робочій камері установки за допомогою орбітронного насоса. Виміряти його величину. Побудувати криву відкачування $P = f(t)$ вакуумної камери орбітронний насосом.
8. Одержати за допомогою мас-спектрометра МХ7304А мас-спектр залишкової атмосфери в робочій камері установки.

Послідовність виконання роботи

1. Одержати (за необхідності) у вакуумній камері попереднє розрідження $\sim 10^{-2}$ Па (10^{-4} Тор) за допомогою охолоджених до температури рідкого азоту адсорбційних насосів (1), відкриваючи по чергово вентилі (2) (рис. 8.1). Відкачування камери проводять за умови закритих високовакуумних вентилів (5) та (7).
2. Увімкнути магніторозрядний насос НМД-0,16 і відкачати (відкривши вентиль (5)) робочу камеру до вакууму не гірше за 10^{-3} Па (10^{-5} Тор). Відкрити вентиль (7) і відкачати орбітронний насос (8) до такого самого розрідження.
3. Увімкнути подачу води для охолодження корпусу орбітронного насоса.
4. Увімкнути блок живлення орбітронного насоса. Перед увімкненням блоку живлення встановити: регулятор „Ток накала” в крайнє ліве положення, регулятор „Смещение” – у крайнє праве положення, перемикач шкал вимірювальної прилади – у положення „Анодное 10 кВ”, вимикач „Высокое напряжение” – у положення „Откл”. Після цього натиснути кнопку „Пуск” і увімкнути вимикач „Высокое напряжение”. Переконавшись в тому, що вимірювальний прилад показує наявність високої напруги 7 кВ, прикладеної до аноду насоса. Поставити перемикач шкал вимірювальної прилади в положення „Ток анода” і, плавно обертаючи регулятор „Ток накала” (у межах від нуля до 3 А), установити величину анодного струму близько 20–30 мА. При вмиканні насоса звичайно має місце деяке погіршення вакууму в ньому через газовиділення з титанового циліндра, що розігрівається. Після початку сублимації титану вакуум покращується. Підібрати таку величину напруги зміщення (регулятор „Смещение”), щоб розрідження в насосі було якомога кращим.
5. За допомогою перетворювача ПММ-32 виміряти високий вакуум у робочій камері.
6. Відсікти магніторозрядний насос (закрити вентиль (5)). Переконавшись, що вакуум у робочій камері покращується. Виміряти високий вакуум у робочій камері. Одержані дані занести до табл. 7.3. За даними таблиці побудувати графік відкачування $P = f(t)$.
7. Залити рідкий азот для охолодження азотної кріопанелі орбітронного насоса. Переконавшись, що вакуум став значно кращим.

Записати значення граничного вакууму під час роботи орбітронного насоса з азотною кріопанеллю.

8. За допомогою мас-спектрометра МХ7304А отримати мас-спектр залишкової атмосфери у вакуумній камері при її відкачуванні орбітронним насосом без азотної кріопанелі та з нею. Проаналізувати отримані мас-спектри. Зробити висновки.
9. Вимкнути вакуумну установку.

Таблиця 7.3. Результати вимірювання тиску

t, c										
P, Pa										

Порядок вимикання вакуумної установки УВБЛ-6

1. Вимкнути мас-спектрометр МХ7304А.
2. Закрити високовакуумний вентиль орбітронного насоса.
3. Вимкнути блок живлення орбітронного насоса: вимкнути високу напругу живлення аноду (вимикач „Высокое напряжение”), плавно обертаючи регулятор „Ток накала”; зменшити до нуля струм розжарення нитки катоду. Після цього натиснути кнопку „Стоп”.
4. Перекрити подачу води для охолодження корпусу орбітронного насоса.

Зміст звіту

1. Будова і короткий опис принципу роботи орбітронного насоса.
2. Принципова схема вакуумної установки, результати вимірювань тиску (крива відкачування на високий вакуум), мас-спектри залишкової атмосфери, висновки щодо виконаної роботи.

Запитання для самоконтролю

1. Який принцип роботи випарного гетерного і випарного іонно-гетерного насосів? У чому полягають їх схожість і відмінність?
2. Які існують типи випаровувачів гетерного матеріалу? Охарактеризуйте їх.

3. Які особливості відкачування різних газів сублимаційними та іонно-гетерними титановими насосами?
4. У чому полягають принцип дії і конструктивні особливості орбітронних насосів?
5. Які механізми відкачування різних газів іонно-гетерними насосами?
6. Чому швидкість дії і граничний вакуум орбітронного насоса зростають у разі використання азотної кріопанелі?
7. Пояснити відмінності у складі залишкової атмосфери магніторозрядного і орбітронного насосів.

Література: [1, 4–5, 8–10].

Визначення складу залишкової атмосфери вакуумної установки за допомогою мас-спектрометра MX7304A

Мета роботи: Ознайомитися з фізичними принципами мас-спектрометричного методу аналізу хімічного складу газів, дослідити хімічний склад газів залишкової атмосфери вакуумної установки.

Обладнання: вакуумна установка УВБЛ-6 із мас-спектрометром MX7304A з комп'ютерним управлінням.

Короткі загальні та теоретичні відомості

При проведенні наукових досліджень та здійсненні технологічних процесів у вакуумі потрібно знати не тільки загальний тиск газів у вакуумній системі (виміряний за допомогою вакуумметрів), а й знайти їх склад та їх парціальні тиски.

Основним газом, який найчастіше відкачується з вакуумних установок, є повітря, яке являє собою суміш багатьох газів. Різні складові цієї суміші відкачуються насосами, сорбуються й десорбуються стінками установки по-різному, тому, склад залишкової атмосфери вакуумної установки та склад газів у ній під час різних технологічних процесів, як правило, не збігається зі складом атмосферного повітря.

Дослідження складу газів у вакуумній системі передбачає якісний і кількісний аналіз. Якісний аналіз дозволяє встановити, з яких газів складається залишкова атмосфера вакуумної установки, кількісний – дозволяє визначити парціальні тиски цих складових.

Парціальним тиском даного газу у складі суміші газів, які хімічно не взаємодіють між собою, називається тиск, який створюється у всьому об'ємі суміші даним газом за відсутності інших газів. Згідно із за-

коном Дальтона повний тиск залишкової атмосфери установки (той, що вимірюється вакуумметром) дорівнює сумі парціальних тисків газів – компонент залишкової атмосфери вакуумної установки.

Прилади для вимірювання складу газової суміші (газоаналізатори) мають назву мас-спектрометрів, яка підкреслює, що аналіз газів у них здійснюється шляхом одержання спектра мас компонент суміші. При цьому можна виміряти як масу молекули чи атома газу-компоненти, так і їх кількість.

Перші мас-спектрометри були створені Астоном (Англія) і Демстером (США) на початку ХХ століття. У цих приладах розділення складових компонент речовини відбувалось у магнітних полях певної просторової конфігурації. За майже 100 років розвитку мас-спектрометрії як методу дослідження складу речовини було створено більше десяти різновидів мас-спектрометрів, у яких для одержання спектра мас використовуються різні фізичні явища. У даній роботі для аналізу складу залишкової атмосфери вакуумної установки використовується вітчизняний мас-спектрометр МХ7304А, який належить до типу немагнітних динамічних мас-спектрометрів. У таких приладах розділення компонент залишкової атмосфери відбувається у високочастотному електромагнітному полі.

Вакуумна установка. У роботі використовується вакуумна установка УВБЛ-6 (установка вакуумна безмасляна лабораторна), структурна схема якої зображена на рис. 8.1. Загальний вигляд установки поданий на рис. 8.2.

Установка УВБЛ-6 складається з циліндричної вакуумної камери (6) (рис. 8.1) об'ємом близько 20 л, виготовленої з нержавіючої сталі. У вакуумній камері за допомогою системи вакуумних насосів (1, 4, 8) може бути створений безмасляний надвисокий вакуум $P \sim 1 \cdot 10^{-10}$ Па. Адсорбційні вугільні насоси (1) створюють попереднє розрідження (форвакуум) близько $P = 1 \cdot 10^{-2}$ Па. Високий вакуум (близько $P = 10^{-6}$ Па) створюється за допомогою магніторозрядного насоса НМД-0,16 (4), а фінішний надвисокий (близько $P = 10^{-10}$ Па) – за допомогою орбітального надвисоковакуумного насоса (8).

Індикація високого вакууму здійснюється за допомогою магнітно-іонізаційного перетворювача ПММ-32 (9) з блоком живлення ВМБ-14.

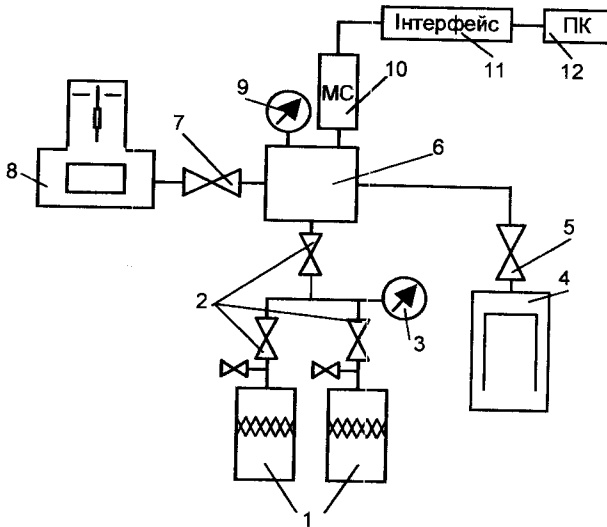


Рис. 8.1. Принципова схема вакуумної установки УВБЛ-6:

1 – система попереднього відкачування (адсорбційні вугільні насоси); 2 – запірні вентилі ДУ-12; 3 – манометричний перетворювач ПМТ-4М; 4 – магніторозрядний насос НМД-0,16; 5, 7 – високовакуумний вентиль ДУ-50; 6 – вакуумна камера; 8 – надвисоковакуумний насос типу „Орбітрон”; 9 – манометричний перетворювач ПММ-32; 10 – аналізатор мас-спектрометра МХ7304А; 11 – інтерфейс зв'язку; 12 – персональний комп'ютер

Дослідження складу залишкових газів у вакуумній камері здійснюється за допомогою монопольного мас-спектрометра МХ7304А, аналізатор якого (10) приєднаний безпосередньо до вакуумної камери.

Конструкція УВБЛ-6 (рис. 8.2) має вигляд вакуумної стійки і стійки з приладами. У стійці з приладами розташовані блоки живлення магніторозрядного насоса (1) та мас-спектрометра МХ7304А (2), комп'ютер (3, 4) та самописний електронний потенціометр Н-306 (5). Основою вакуумної частини УВБЛ-6 є вакуумна камера (8) (рис. 8.2), розташована у відкритій верхній частині вакуумної стійки. До камери приєднані всі основні вузли вакуумної системи: вакуумні насоси (6, 11), аналізатор мас-спектрометра МХ7304А (9) та система форвакуумного відкачування (13).

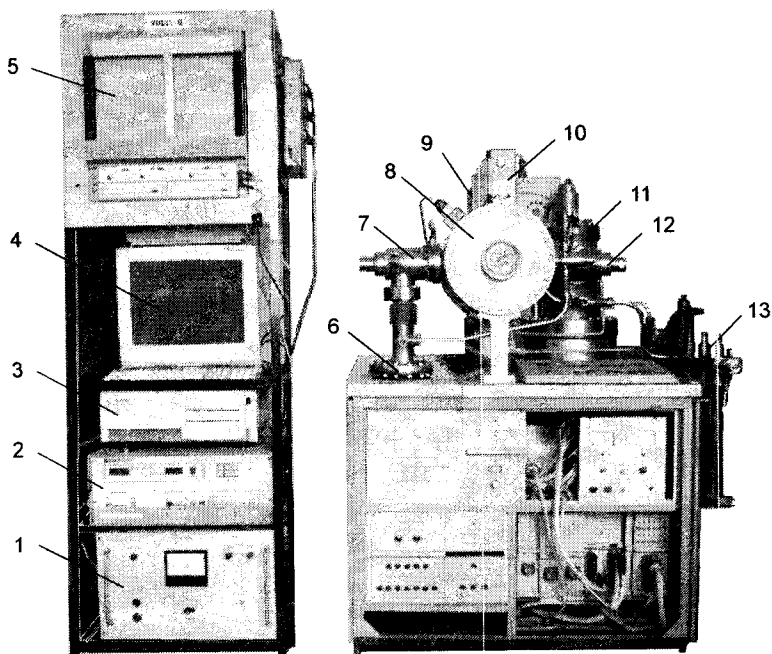


Рис. 8.2. Загальний вигляд вакуумної установки УВБЛ-6:

1 – блок живлення магніторозрядного насоса НМД-0,16; 2 – блок живлення мас-спектрометра МХ7304А; 3, 4 – персональний комп'ютер; 5 – електронний самописець Н-306; 6 – магніторозрядний насос НМД-0,16; 7 – високовакуумний вентиль ДУ-50; 8 – вакуумна камера; 9 – аналізатор мас-спектрометра МХ7304А; 10 – блок індикації вакууму ВМБ-14; 11 – надвисоковакуумний насос типу „Орбітрон”; 12 – високовакуумний вентиль ДУ-50; 13 – система попереднього відкачування

У нижній частині вакуумної стійки розташовані електронні блоки її живлення. Нижня частина закривається спеціальною панеллю.

Усі основні вакуумні вузли установки можуть прогріватися до 300 °С для знегажування електричними нагрівниками.

Залишкова атмосфера надвисоковакуумної установки

Залишковою атмосферою установки називається газове середовище, що залишається в робочій камері після її відкачування до фініш-

ного (10^{-5} – 10^{-10} Па) вакууму. Склад залишкової атмосфери залежить від багатьох факторів: якості герметичності установки, матеріалу, з якого виготовлена вакуумна камера, типу вакуумних насосів, температури вакуумної камери тощо. Оскільки до відкачування у вакуумній камері, як правило, знаходилося атмосферне повітря, то й основними складовими залишкової атмосфери будуть складові атмосферного повітря – кисень (O_2), азот (N_2), аргон (Ar) та водяна пара (H_2O). У разі використання вакуумних насосів, робочими тілами яких є мінеральні масла або ртуть (дифузійні насоси), у залишковій атмосфері будуть присутні й компоненти їх робочих тіл (компоненти масел або пара ртуті).

Для створення вакууму в УВБЛ-6 використовуються тільки безмасляні насоси: для створення форвакууму – адсорбційні вугільні насоси, які поглинають атмосферне повітря при охолодженні активованого вугілля до температури рідкого азоту (-197 °C), для створення високого і надвисокого вакууму – електрофізичні насоси (магніторозрядний та орбітронний), які поглинають гази плівкою розпиленого титану.

Таким чином, у залишковій атмосфері УВБЛ-6 будуть відсутні компоненти масел та атоми ртуті й міститимуться лише складові атмосферного повітря та водяна пара.

Атмосферне повітря складають більше 10 газів, основними з яких є азот (78%), кисень (21%), аргон (0,9%). Інші гази (CO, CO_2 , H_2 , He, Ne тощо) становлять менше ніж 0,1%. Кількість водяної пари H_2O у повітрі залежить від багатьох природних факторів і неконтрольовано змінюється у досить широких межах.

Особливістю електрофізичних насосів є селективність (вибірковість) відкачування – активні гази (O_2 , H_2 , N_2) відкачуються ними краще, інертні (He, Ne, Ar) – набагато гірше. Таким чином, залишкова атмосфера, створювана такими насосами буде збіднена на активні гази та збагачена на інертні (її склад кількісно не відповідатиме складу повітря). Водяна пара H_2O є також досить хімічно активним газом і добре відкачується такими насосами. Основним джерелом водяної пари в залишковій атмосфері є стінки вакуумної камери, на яких її молекули знаходяться у фізично сорбованому стані. У вакуумі така водяна пара десорбується зі стінок. За кімнатної температури стінок вакуумної камери десорбція молекул водяної пари відбувається дуже повільно. Інтенсифікувати процес десорбції можна нагріванням сті-

нок до 300–400 °С. За таких температур молекули водяної пари інтенсивно десорбуються й відкачуються насосами, у результаті чого їх кількість у залишковій атмосфері значно зменшується. Нагріванням стінок вакуумної камери суттєво зменшують і кількість інших газів у залишковій атмосфері, оскільки їх частина також фізично сорбується холодними стінками й активно десорбується в разі їх нагрівання.

Таким чином, склад залишкової атмосфери вакуумної установки істотно залежить від стану внутрішніх поверхонь вакуумної камери та інших вакуумних вузлів, приєднаних до неї. За наявності негерметичності (течі) у вакуумній установці склад її залишкової атмосфери практично буде повністю відповідати складу атмосферного повітря як якісно, так і кількісно.

Мас-спектрометричний аналіз газів. Сутність якісного мас-спектрометричного хімічного аналізу речовини полягає в знаходженні маси атомів чи молекул цієї речовини. Так, наприклад, молекула води (H_2O) має молекулярну масу 18, молекула азоту (N_2) – 28, кисню (O_2) – 32, вуглекислого газу (CO_2) – 44 а.о.м. і т.д. Визначивши за допомогою мас-спектрометра масу молекули невідомого газу, можна тим самим установити, що це за газ (якісний аналіз). У мас-спектрометрі нейтральні атоми і молекули речовини перетворюються в додатні іони. Під дією електричних чи магнітних полів у аналізаторі мас-спектрометра пучок іонів розщеплюється (у просторі або часі) на пучки іонів однакових мас. Розділені пучки іонів реєструються системою реєстрації. Маса іонів відповідають за хімічний склад речовини, кількість іонів даної маси відповідає за вміст цієї речовини в суміші.

Мас-спектрометр можна зобразити схематично (рис. 8.3).

У джерелі іонів нейтральні атоми і молекули речовини іонізуються (перетворюються в додатні іони). На виході із джерела іони формуються в пучок певної просторової конфігурації. Найбільш вивченими і вживаними є джерела з іонізацією електронним ударом. Схематично будова такого джерела іонів подана на рис. 8.4.

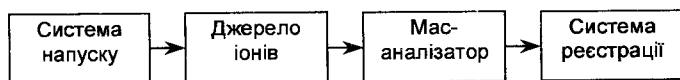


Рис. 8.3. Блок-схема мас-спектрометра

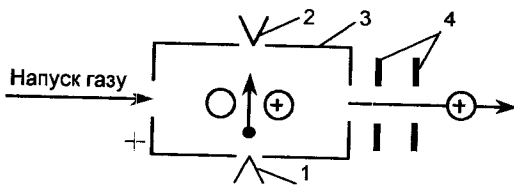


Рис. 8.4. Схема джерела іонів з іонізацією електронним ударом: 1, 2 – робочий і резервний катод; 3 – іонізаційна камера; 4 – електроди, що формують іонний пучок

Досліджуваний газ напускається до іонізаційної камери (3) – металевої тонкостінної коробочки об'ємом кілька см³. Через катод (1) (вольфрамова дротина діаметром 0,1 мм) пропускається електричний струм, що розігріває його до температури 2500–3000 °С, за якої з поверхні катода відбувається емісія електронів. Між катодом і корпусом іонізаційної камери прикладається різниця потенціалів $U_i = 50\text{--}100\text{ В}$ (іонізаційна напруга) так, щоб вона прискорювала ці електрони. Прискорені електрони проникають через отвір напроти катода всередину іонізаційної камери і, зустрічаючи на своєму шляху нейтральні атоми і молекули газу, вибивають з них один або кілька електронів (як правило, один), перетворюючи їх у додатні іони. За допомогою електродів у вигляді щілин (4), які мають невеликий від'ємний потенціал, іони витягуються з іонізаційної камери і формуються в пучок круглого перерізу діаметром кілька міліметрів. Катод (2) є резервним. Струм емісії електронів і всі напруги вимірюють відповідними приладами і можуть регулюватися для одержання максимальної інтенсивності іонного пучка.

Сформований таким чином іонний пучок потрапляє в мас-аналізатор, де відбувається його розщеплення на пучки іонів з однаковою масою (точніше, з однаковим відношенням маси іона m до його електричного заряду q). Відношення m/q позначають через M і називають масовим числом іона, вимірюючи при цьому заряд іона q не в Кл, а в зарядах електрона e ($q = 1e$, $q = 2e$ і т.д.). Якщо $q = 1e$ ($M = m$), іони є однозарядними. Якщо $q = 2e$ ($M = m/2$), ідеться про двозарядні іони і т.д. Як правило, електричні параметри роботи джерела іонів обирають такими, щоб у джерелі іонів створювалися переважно однозарядні іони. Тоді маса такого іона m збігається з його масовим числом M .

Мас-спектрометр МХ7304А, який використовується в даній роботі, належить до динамічних приладів. Розділення іонів у часі в ньо-

му відбувається в результаті їх проходження через область високочастотного електромагнітного поля, яке створюється за допомогою двох електродів: один з них є стрижнем, другий – кутником, як показано на рис. 8.5. Такий аналізатор називається монопольним аналізатором.

У джерелі іонів (1) відбувається іонізація залишкових газів і формування пучка іонів, які спрямовуються в електродну схему, утворену кутником та стрижнем (2). Джерело іонів цього мас-спектрометра не має іонізаційної камери, її роль відіграє анод у вигляді конічної спіралі, виготовленої з молібденової дротини (анодом джерела іонів, зображеного на рис. 8.4, був корпус іонізаційної камери). У нашому випадку джерело іонів є відкритим (без іонізаційної камери), щоб молекули залишкових газів вільно проникали в область іонізації джерела. Така конструкція анода дозволяє його легко знегажувати, пропускаючи електричний струм через молібденову дротину. Завдяки цьому вдається значно зменшити "пам'ять" приладу. Джерело іонів має два катоди K_1 і K_2 (рис. 8.5), один з яких є робочим, другий – резервним.

Електродний блок (2) аналізатора складається з кутника і стрижня, установлених паралельно один до одного з високою точністю. Аналізатор змонтований у герметичному циліндричному корпусі, який захищає його від впливу зовнішніх електромагнітних полів. Корпус безпосередньо приєднаний до вакуумної камери, що дозволяє молекулам залишкових газів з камери вільно проникати в аналізатор.

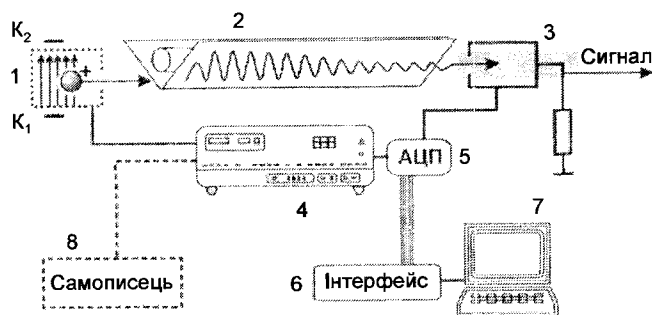


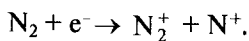
Рис. 8.5. Схематичне зображення будови мас-спектрометра MX7304A: 1 – джерело іонів; 2 – електродна схема аналізатора; 3 – детектор іонів; 4 – блок живлення мас-спектрометра; 5 – АЦП; 6 – інтерфейс; 7 – персональний комп'ютер; 8 – електронний самописець

На виході з аналізатора розташована детекторна система (3) для реєстрації виділених іонів. Залежно від величини іонного струму як детектор іонів може використовуватися або циліндр Фарадея (великі іонні струми величиною більше ніж 10^{-10} А) або вторинний електронний помножувач (ВЕП) типу ВЕУ-6 (малі іонні струми величиною менше ніж 10^{-10} А). Виділений і підсилений іонний струм може бути зареєстрований на папері за допомогою електронного самописного приладу (8), або після цифрової обробки в АЦП (аналого-цифровий перетворювач) – за допомогою персонального комп'ютера (ПК) (7). При цьому мас-спектр або зберігається в пам'яті ПК, або ж безпосередньо після закінчення аналізу виводиться на екран його монітора.

У даному приладі ПК використовується також і для повного управління процесом мас-спектрометричного аналізу за допомогою відповідного програмного забезпечення. При цьому мас-спектрометр працює в автоматичному режимі під управлінням ПК. За необхідності мас-спектрометр може працювати в "ручному" режимі управління. При цьому запис мас-спектра здійснюється самописним приладом.

Програмне забезпечення комп'ютерного управління мас-спектрометра. Програмне забезпечення управління мас-спектрометром МХ7304А виконане в середовищі Windows і дозволяє повністю керувати мас-спектрометром (контролювати і змінювати всі режими роботи джерела іонів та аналізатора, виводити на екран монітора та принтер зображення мас-спектра у вигляді діаграми (рис. 8.6) та таблиці піків).

Особливості розшифрування мас-спектрограми залишкових газів. Як уже зазначалося, у джерелі іонів у результаті бомбардування нейтральних газових атомів і молекул електронами відбувається їх іонізація. Розглянемо іонізацію досить простого газу – азоту. Азот у природі існує у вигляді молекули, що складається з двох атомів – N_2 . Молекулярна маса молекули азоту становить 28 а.о.м. Схематично реакція утворення іонів азоту в результаті електронного удару виглядає так:



Молекулярний іон азоту N_2^+ (унаслідок відривання одного електрона) має масове число $M = m/1 = 28$ а.о.м., а уламок молекули (атомарний іон азоту N^+) має масове число $M = 14$ а.о.м. Таким чином, мас-спектр азоту складається з двох піків з масовими числами

$M_1 = 14$ а.о.м. (уламок) та $M_2 = 28$ а.о.м. (молекулярний іон). Аналогічних висновків доходимо й щодо кисню O_2 : у його мас-спектрі буде також два піки, але з масовими числами $M_1 = 16$ а.о.м. (уламок, атомарний кисень) та $M_2 = 32$ а.о.м. (молекулярний кисень). Таким чином, вимірявши масові числа іонів у мас-спектрі даної речовини, можна судити про її хімічний склад.

У складі мас-спектрометра MX7304A є вимірювач масових чисел, що показує масове число іона, який у даний момент часу реєструється самописним приладом (ручний режим роботи). При реєстрації мас-спектра за допомогою ПК всі піки мас-спектра оцифровуються програмним забезпеченням і на екрані монітора мас-спектр має такий вигляд, як подано на рис. 8.6, де вздовж вертикальної вісі відкладена інтенсивність піка, а вздовж горизонтальної вісі – масове число іона $M = m/q$.

Мас-спектр (рис. 8.6) потрібно розшифрувати: шляхом логічних міркувань установити хімічні формули всіх груп іонів, представлених на мас-спектрі у вигляді піків. Правильність встановлення хімічної формули групи іонів (інтерпретація) залежить від урахування особливостей одержання мас-спектра.

Як уже зазначалося, у результаті іонізації атомів і молекул з'являються однозарядні ($q = 1$), багатозарядні ($q = 2$ та більше), а також

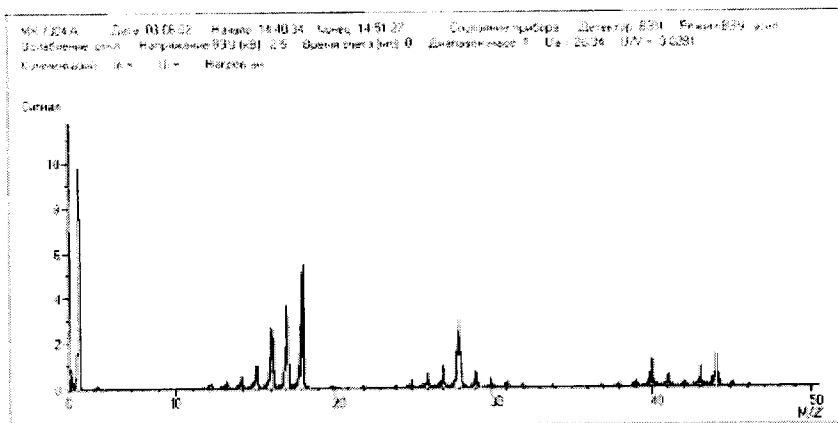
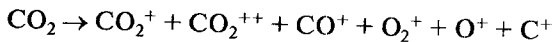


Рис. 8.6. Зображення мас-спектра на екрані монітора ПК

фрагментарні іони-уламки. Наприклад, під час електронної іонізації діоксиду вуглецю (CO_2) одержуємо такі іони:



з масовими числами, що дорівнюють 44, 22, 28, 32, 16, 12 а.о.м. відповідно. Молекулярними в нашому випадку будуть іони CO_2^+ з масовим числом 44 а.о.м. – найбільше масове число цієї групи іонів. Двозарядний іон CO_2^{++} має масове число $44/2 = 22$ а.о.м. Усі інші іони CO^+ , O_2^+ , O^+ , C^+ – це іони-уламки (фрагменти) молекули CO_2 , які утворюють у мас-спектрі відповідні піки. Крім того, у мас-спектрі присутні також піки стабільних ізотопів. На перший погляд, усе це безнадійно ускладнює мас-спектр газової суміші. Але цікаво, що мас-спектри певного газу, одержані на приладах одного типу, які працюють в однакових режимах іонізації, теж є однаковими. Це дозволяє за наявності фрагментних піків ідентифікувати той чи інший газ на приладах з невеликою роздільною здатністю. Наприклад, розглянемо мас-спектри азоту N_2 і вуглекислого газу CO . Молекулярні іони цих газів мають однакові масові числа 28 а.о.м., але фрагментарні іони цих газів є різними (різні масові числа і різна інтенсивність піків). Таким чином, мас-спектр кожного газу має свої індивідуальні особливості (як відбиток пальця). Завдяки цьому мас-спектри, одержані на приладах з невеликою роздільною здатністю, можна ідентифікувати.

На сьогодні мас-спектри всіх газів досить добре вивчені і подаються у відповідних каталогах. У табл. 8.1 наведено величини відносних інтенсивностей мас-спектрометричних піків низки газів, які трапляються у складі залишкової атмосфери вакуумних установок.

Користуючись цією таблицею, можна встановити хімічний склад того чи іншого газу. Так, наприклад, у мас-спектрі азоту N_2 присутні всього три піки з масовими числами 28 а.о.м. (інтенсивність 1,00), 29 а.о.м. (інтенсивність 0,01) та 14 а.о.м. (інтенсивність 0,08). Мас-спектр же CO містить п'ять мас-спектрометричних піків з масами 28 а.о.м. (інтенсивність 1,00), 29 а.о.м. (інтенсивність 0,1), 12 а.о.м. (інтенсивність 0,4), 14 а.о.м. (інтенсивність 0,01) та 16 а.о.м. (інтенсивність 0,01). Наявність піків з масовими числами 12 та 16 а.о.м. дозволяє однозначно ідентифікувати даний газ як CO , а не N_2 .

Наведені вище міркування дозволяють провести якісний аналіз складу залишкових газів (відповісти на питання, з яких газів складається залишкова атмосфера).

Таблиця 8.1. Відносна інтенсивність мас-спектрометричних піків різних газів*

Газ	μ , а.о.м	Масове число $M = m/q$, а.о.м.															
		2	4	12	13	14	15	16	17	18	20	22	28	29	32	40	44
H ₂	2	1,00															
He	4		1,00														
CH ₄	16	0,03		0,02	0,08	0,17	0,36	1,00	0,01								
H ₂ O	18	0,01						0,01	0,23	1,00							
Ne	20										1,00	0,01					
N ₂	28					0,08							1,00	0,01			
CO	28			0,04		0,01		0,01					1,00	0,01			
O ₂	32							0,11							1,00		
Ar	40										0,11					1,00	
CO ₂	44			0,06		0,08		0,08				0,01	0,11				1,00

* Інтенсивність молекулярного піка становить 1,00.

Оскільки інтенсивність кожного мас-спектрометричного піка (кількість іонів певної маси) пропорційна концентрації даної газової компоненти в суміші, то це дозволяє провести й кількісний аналіз складу залишкових газів (визначити, який парціальний тиск P_i даного газу в суміші).

Отже, мас-спектр газової суміші містить у собі інформацію як якісного, так і кількісного характеру.

Кількісний аналіз. Визначення парціальних тисків газів, з яких складається залишкова атмосфера, передбачає перш за все виділення (ідентифікацію) в одержаному мас-спектрі (наприклад, рис. 8.6) молекулярних піків основних газів – N₂ (28 а.о.м.), O₂ (32 а.о.м.), H₂O (18 а.о.м.), Ar (40 а.о.м.), CO₂ (44 а.о.м.) та ін. Після цього необхідно виміряти за мас-спектрограмою інтенсивності (висоти) цих піків I_i . Це можна зробити або за допомогою лінійки (тоді I_i будуть виражені в мм) або ж скористатися результатами автоматичного (за допомогою програмного забезпечення MX7304A) їх вимірювання (вивести таблицю інтенсивності піків у праву частину мас-спектрограми), тоді I_i будуть виражені в мілівольтах (mV).

Користуючись даними табл. 8.1, бачимо, що лише піки з масовими числами 4 а.о.м. (He), 18 а.о.м. (H₂O), 32 а.о.м. (O₂), 40 а.о.м. (Ar)

та 44 а.о.м. (CO_2) утворені безпосередньо цими газами, на відміну від піків з масовими числами 2, 16, 20 та 28 а.о.м. Так, наприклад, пік з масовим числом 2 а.о.м. (H_2) утворений як безпосередньо воднем, який є у складі залишкової атмосфери, так і тими молекулами водню, які утворилися в результаті фрагментації молекул метану (CH_4) та води (H_2O) у джерелі іонів мас-спектрометра. Ще більш складним є пік з масовим числом 16 а.о.м. Він утворений як самим метаном (16 а.о.м.), так і атомами кисню O у результаті фрагментації в джерелі іонів мас-спектрометра молекул O_2 та CO_2 . Пік з масовим числом 20 а.о.м. утворений безпосередньо іонами неону та двозарядними іонами аргону Ar^{++} . Пік з $M = 28$ а.о.м. утворений безпосередньо іонами N_2 і CO та фрагментом CO молекули CO_2 .

Для правильного вимірювання парціальних тисків H_2 , CH_4 , Ne та N_2 необхідно встановити істинні інтенсивності піків цих газів, віднявши від повної інтенсивності цих піків внески фрагментарних іонів, утворених у джерелі іонів мас-спектрометра (табл. 8.1).

Позначимо I_2 , I_{16} , I_{20} , I_{28} – інтенсивності піків з масовими числами 2, 16, 20 та 28 а.о.м. відповідно, виміряні безпосередньо за мас-спектрограмою. Тоді істинні інтенсивності піків азоту, неону, метану та водню будуть мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} I_{N_2} &= I_{28} - 0,11I_{44}, \\ I_{Ne} &= I_{20} - 0,11I_{40}, \\ I_{CH_4} &= I_{16} - 0,01I_{18} - 0,11I_{32} - 0,08I_{44}, \\ I_{H_2} &= I_2 - 0,01I_{18} - 0,03I_{CH_4}, \end{aligned} \quad (8.1)$$

де I_{40} , I_{18} , I_{32} , I_{44} – інтенсивності піків з відповідними масовими числами, виміряні на мас-спектрограмі, а числа перед ними – відповідні коефіцієнти їх внесків в істинні піки (табл. 8.1).

Внеском унаслідок фрагментації молекули CO можна знехтувати через малу кількість цього газу у складі залишкової атмосфери установки УВБЛ-6.

Після обчислення за формулами (8.1) істинних значень інтенсивності піків цих газів, можна обчислити й парціальні тиски всіх складових компонент залишкової атмосфери. Кількість цих складових (H_2 , Ne , CH_4 , H_2O , Ne , N_2 , O_2 , Ar та CO_2) становить 9, яку позначимо як

кількість $N = 9$. Тоді повний тиск суміші цих газів $P_{повн}$ буде визначатися сумою їх парціальних тисків P_i

$$P_{повн} = \sum_{i=1}^9 P_i, \quad (8.2)$$

де P_i – шуканий парціальний тиск i -ої компоненти залишкової атмосфери.

Одним з установлених експериментально фундаментальних положень мас-спектрометрії газів є твердження про те, що інтенсивність молекулярного (атомарного) мас-спектрометричного піка даного газу пропорційна його парціальному тиску

$$I_i = K_i P_i, \quad (8.3)$$

де K_i – коефіцієнт пропорційності, або чутливість мас-спектрометра для даного газу.

Для нашої залишкової атмосфери одержимо:

$$\begin{aligned} I_{H_2} &= K_{H_2} P_{H_2}, \\ I_{He} &= K_{He} P_{He}, \\ \text{-----} & \\ I_{CO_2} &= K_{CO_2} P_{CO_2}. \end{aligned} \quad (8.4)$$

Значення K_i одержують експериментально для даного мас-спектрометра в результаті його калібрування по цих газах. У першому наближенні всі K_i можна вважати однаковими (з точністю 20–50%). З рівнянь (8.2) та (8.3) маємо

$$P_{повн} = \sum_{i=1}^N P_i = \sum_{i=1}^N I_i / K_i. \quad (8.5)$$

За умови рівності $K_1 = K_2 = \dots = K_N = K$ одержуємо

$$P_{повн} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^N I_i. \quad (8.6)$$

З рівняння (8.6) одержимо значення K

$$K = \left(\sum_{i=1}^N I_i \right) / P_{\text{повн}}. \quad (8.7)$$

Визначивши K , з рівняння (8.3), одержуємо (у межах указаної похибки) парціальні тиски компонент залишкової атмосфери:

$$P_i = \frac{I_i}{K} = P_{\text{повн}} \cdot \frac{I_i}{\sum_{i=1}^N I_i}. \quad (8.8)$$

Для нашого випадку залишкової атмосфери, що складається з $N = 9$ газів, маємо дев'ять рівнянь:

$$P_{H_2} = P_{\text{повн}} \cdot \frac{I_{H_2}}{\sum_{i=1}^9 I_i},$$

$$P_{He} = P_{\text{повн}} \cdot \frac{I_{He}}{\sum_{i=1}^9 I_i}, \quad (8.9)$$

$$P_{CO_2} = P_{\text{повн}} \cdot \frac{I_{CO_2}}{\sum_{i=1}^9 I_i}.$$

Значення величини повного тиску $P_{\text{повн}}$ визначається вимірюванням тиску у вакуумній камері УВБЛ-6 вакуумметром повного тиску ВМБ-14 з манометричним перетворювачем ПММ-32.

Для більш точного встановлення парціальних тисків P_i необхідно проводити калібрування приладу за всіма i -газами складових суміші і установивши всі значення K_i , розв'язати систему рівнянь (8.4) та (8.5).

Завдання до роботи

1. Ознайомитися з конструкцією та порядком експлуатації вакуумної установки УВБЛ-6. Увімкнути установку й одержати в робочій камері установки вакуум порядку 10^{-4} – 10^{-6} Па.

2. Ознайомитися з конструкцією та порядком експлуатації мас-спектрометра МХ-7304А.
3. Ознайомитися з робочою програмою комп'ютерного управління мас-спектрометром.
4. Увімкнути МХ-7304А, провести запис мас-спектра залишкових газів у кількох режимах роботи ВЕП.
5. Користуючись табл. 8.1, розшифрувати отриманий мас-спектр.
6. Дані про мас-спектрометричний склад представити у вигляді діаграми та табл. 8.2 за двома значеннями напруги живлення ВЕП (2,5 кВ та 3,0 кВ).
7. Визначити парціальні тиски складових залишкової атмосфери.

Таблиця 8.2. Результати вимірювань

$P_{\text{повн.}}$ Па	№ пор.	Масове число іона, а.о.м.	Інтенсивність піка, мВ (мм)	Газ	
				Хімічна формула	P_i , Па

Послідовність виконання роботи

1. Переконатися, що у вакуумній камері установки УВБЛ-4 створено високий вакуум не гірше ніж 10^{-4} – 10^{-6} Па.
2. Перевірити стан органів управління мас-спектрометра. Перевести всі перемикачі на передній панелі блока живлення мас-спектрометра у вихідне положення:
 - перемикачі групи „Аттенюатор” – „Откл”;
 - перемикач „ВЭУ-Колл” – „Колл”;
 - перемикачі групи «Контроль» – “ВЭУ”;
 - перемикач „Диапазон” – I;
 - перемикач „АН” – відпущений;
 - перемикач „Ручн” – натиснутий;
 - перемикачі групи „Скорость-Скан-Размах” – усі, крім „Макс”, відпущені;
 - перемикачі групи „Эмиссия” – „Откл”;
 - перемикач „Дегазация” – відпущений;
 - перемикач „Сеть” – відпущений.

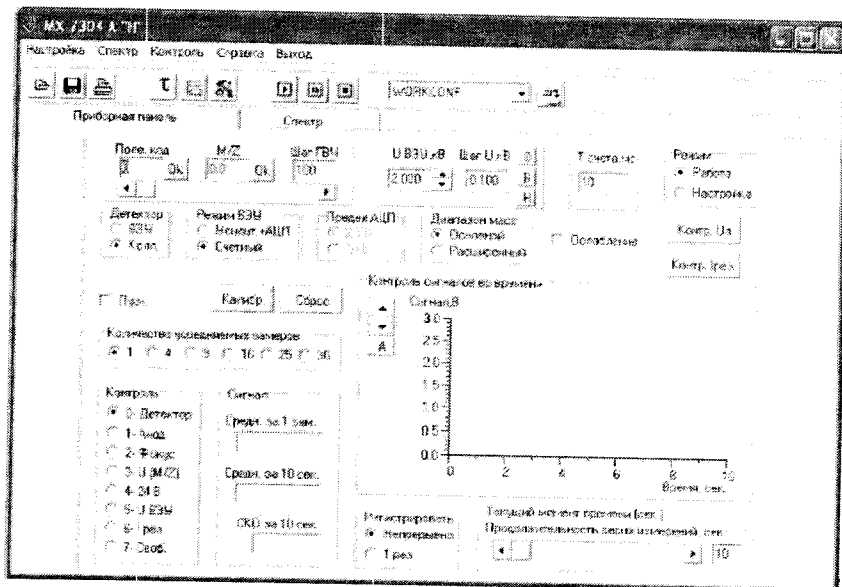


Рис. 8. 7. Основне робоче вікно управління мас-спектрометром

- Увімкнути ПК і запустити програму управління мас-спектрометром MX-7304A.

Після появи на екрані монітора основного робочого вікна управління мас-спектрометром „Приборная панель” (рис. 8.7) ознайомитися з функціональними можливостями панелі управління приладом.


- Увімкнути блок живлення мас-спектрометра:
 - натиснути перемикач „Сеть” (засвічується зелена лампочка „24 V”). У разі, якщо засвічується і червона лампочка (наявність неполадок), необхідно вимкнути перемикач „Сеть” і повідомити викладача;
 - увімкнути живлення катода, натиснувши перемикач „Эмиссия” „0,5 mA”;
 - перевести перемикач „ВЭУ-Колл” у верхнє положення – „ВЭУ”;
 - натиснути перемикач „Аттенюатор” – 100.

Після цього мас-спектрометр готовий до роботи під управлінням ПК.

5. Установити необхідні режими роботи мас-спектрометра, користуючись основним вікном „Приборная панель” за допомогою курсора:

- перейти в режим „Настройка”;
- „Детектор” – у стан „ВЭУ”;
- „Режим ВЭУ” – „Усилит+АЦП”;
- „Предел АЦП” – 2,5 В;
- „Диапазон масс” – „Основной”;
- установити у вікні „U ВЭУ, кВ” напругу живлення ВЭП, що дорівнює 2,500 кВ, після чого натиснути клавішу „В” (висока напруга);
- перейти в режим „Работа”.

Після цього робота з панеллю приладу вважається завершеною (усі інші режими роботи мас-спектрометра студентами не задаються).

6. Перейти в режим сканування спектра мас, натиснувши курсором „Спектр” та символ  „Снять спектр”, після цього з’являється нове вікно „Параметры сканирования” (рис. 8.8).

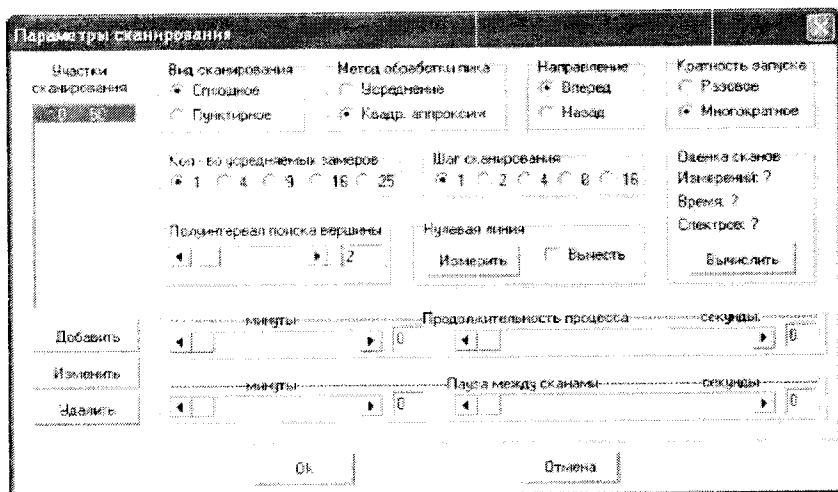


Рис. 8.8. Вікно вибору параметрів сканування

7. У вікні „Параметры сканирования” (рис. 8.8) вибрати режими сканування:

- „Кол-во усредняемых замеров” – від 1 до 25 (це кількість вимірів величини інтенсивності сигналу кожного піка – чим більша кількість вимірів, тим точніше буде виміряна величина інтенсивності піка, але при цьому повільніше відбуватиметься сканування всього мас-спектру);
- „Шаг сканирования” – від 1 до 16 – чим менше це число, тим точніше буде проведене вимірювання, але тим більше часу буде потрібно для сканування всього мас-спектру;
- „Кратность запуска” – „Разовое”;
- після вибору режимів сканування натиснути „Ок”.

Дане вікно дозволяє виконати ще низку установок (змінити діапазон мас, змінити напрямок сканування, провести вибіркоче сканування та ін.), але ці параметри студенти не задають.

Комп’ютер почне записувати мас-спектр, сигналізуючи при цьому, скільки відсотків спектра відскановано на даний момент часу у спеціальному вікні. Після завершення процесу сканування мас-спектр з’являється на екрані монітора у вигляді рис. 8.6.

8. Надрукувати одержаний мас-спектр.

9. Збільшити величину напруги живлення ВЕП до 3,000 кВ і записати новий мас-спектр (викликати панель управління приладом „Приборная панель” і в режимі „Настройка” змінити величину напруги живлення ВЕП).

10. Вимкнути мас-спектрометр:

- закрити програму управління ПК;
- вимкнути ПК;
- вимкнути блок живлення мас-спектрометра (вимкнути живлення катода, вимкнути „Сеть”).

11. Порівняти між собою мас-спектрограми, отримані за напруг живлення ВЕП $U_1 = 2,5$ кВ та $U_2 = 3,0$ кВ. Зробити висновки.

Зміст звіту

1. Принципова схема вакуумної установки УВБЛ-6, особливості складу її залишкової атмосфери.
2. Принцип роботи мас-спектрометра МХ-7304А, його будова.

3. Мас-спектри залишкової атмосфери вакуумної установки УВБЛ-6 у вигляді діаграм та заповненої табл. 8.2 за двох значень напруги живлення ВЕП: $U_1 = 2,5$ кВ і $U_2 = 3,0$ кВ.
4. Визначені парціальні тиски основних складових залишкової атмосфери УВБЛ-4 (заповнена табл. 8.2).

Запитання для самоконтролю

1. Що називається залишковою атмосферою вакуумної установки? Як змінюється її склад залежно від стану вакуумної установки та використовуваних вакуумних насосів?
2. Як відбувається іонізація газових молекул у мас-спектрометрі?
3. У чому полягає принцип роботи мас-спектрометра МХ-7304А?
4. Як здійснити розшифровку мас-спектрограми і встановити якісний склад залишкової атмосфери?
5. Як виконати кількісний аналіз залишкової атмосфери і визначення парціальних тисків її компонент?

Література: [3, 7, 10].

Прилади і методи пошуку негерметичностей вакуумних систем

Мета роботи: ознайомитися з існуючими методами і прийомами контролю герметичності вакуумних установок та основними приладами для пошуків натікань (течі).

Обладнання: вакуумні установки для пошуків течі методом високочастотного розряду та галоїдним методом, течешукач ГТІ-6, вакуумна установка УВЛ-8 у комплекті з мас-спектрометром МХ7303, шприц, пробні гази та рідини.

Короткі загальні та теоретичні відомості

Герметичність вакуумної системи та її кількісна оцінка. Коли йдеться про створення вакууму в деякій посудині, то мається на увазі, що певна частина маси газу забирається з цієї посудини насосом і виводиться за її межі. При цьому в посудині зменшується маса газу і, відповідно, зменшується кількість газових молекул та його тиск.

Якщо в первинному стані (перед початком відкачування) у посудині об'ємом V знаходилося N молекул газу масою m_0 кожна, то процес відкачування (створення вакууму) можна характеризувати швидкістю зміни маси газу в ній – $\frac{dm}{dt}$. Вважаючи газ ідеальним, а процес відкачування ізотермічним, можна записати:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt}(Nm_0) = m_0 \frac{dN}{dt} = m_0 \frac{d}{dt} \left(\frac{PV}{kT} \right) = \frac{m_0}{kT} \frac{d}{dt}(PV), \quad (9.1)$$

де T – абсолютна температура газу;

k – стала Больцмана;

P – тиск газу в посудині об'ємом V .

У вакуумній техніці величина $\frac{d}{dt}(PV)$ називається газовим потоком Q

$$Q = \frac{d}{dt}(PV), \quad (9.2)$$

а добуток PV – кількістю газу.

При відкачуванні ідеально герметичної посудини зміна (зменшення) кількості газу в ній визначатиметься лише продуктивністю насоса $Q_n = S_{ef}P$ і становитиме

$$\frac{d}{dt}(PV) = -Q_n = -S_{ef}P, \quad (9.3)$$

де S_{ef} – ефективна швидкість відкачування посудини насосом, якщо тиск у ній дорівнює P .

Знак „мінус” перед Q_n означає зменшення кількості газу в посудині (величина похідної $\frac{d(PV)}{dt} < 0$ при відкачуванні посудини).

На жаль, для реальних посудин (вакуумних камер) швидкість зменшення кількості газу в них визначається не тільки продуктивністю насоса Q_n , а й газовиділенням з її стінок, овернених у вакуум Q_o та натіканням зовнішнього газу через негерметичність (течі) Q_m , причому обидва ці газові потоки зменшують швидкість зміни кількості газу в посудині, унаслідок чого

$$-\frac{d}{dt}(PV) = (Q_o + Q_m) - Q_n = (Q_o + Q_m) - S_{ef} \cdot P. \quad (9.4)$$

Дане рівняння виражає закон збереження кількості газу і фактично є рівнянням неперервності газового потоку при відкачуванні – зміна кількості газу у вакуумній камері дорівнює сумі газових потоків, що надходять у неї $(Q_o + Q_m) > 0$ та виводяться з неї $-S_{ef} \cdot P < 0$, за одиницю часу.

Як правило, об’єм посудини (вакуумної камери) при її відкачуванні не змінюється ($V = \text{const}$). Тоді рівняння (9.4) набуває вигляду

$$V \frac{dP}{dt} = (Q_B + Q_T) - S_{ef} P. \quad (9.5)$$

Диференціальне рівняння (9.5) виражає зміну протягом певного тиску газу P у відкачуваному об'єкті за наявності газовиділення зі стінок об'єкта Q_s та натікання газу в нього Q_m через негерметичність (течі).

Відкачування (зменшення кількості газових молекул і відповідне зменшення тиску газу в об'єкті) відповідає умові, якщо

$$\frac{dP}{dt} < 0. \quad (9.6)$$

З рівняння (9.5) випливає, що таке зменшення тиску у відкачуваному об'єкті матиме місце за умови

$$S_{ef} P > Q_s + Q_m, \quad (9.7)$$

тобто сумарний газовий потік молекул (за одиницю часу), які виділяються зі стінок і натікають через негерметичності, повинен бути меншим від продуктивності насоса $S_{ef} P$. Інакше, відкачування (мається на увазі зменшення тиску газу в об'єкті) не відбуватиметься, хоча газові молекули будуть відводитися насосом з відкачуваного об'єму.

Прийнявши величини Q_s , Q_m та S_{ef} сталими (для реальних вакуумних систем ці умови непогано виконуються в певних областях тисків), можна розв'язати диференціальне рівняння (9.5) відносно невідомого P . За умови (9.7) одержимо

$$P = \frac{Q_s + Q_m}{S_{ef}} - \left(\frac{Q_s + Q_m}{S_{ef}} - P_0 \right) e^{-\frac{S_{ef}}{V} t}, \quad (9.8)$$

де P_0 – початковий тиск у відкачуваному об'єкті.

З даного розв'язку випливає, що в процесі відкачування тиск газу в об'єкті експоненціально зменшується з часом і за умови $t \rightarrow \infty$ становить гранично можливу величину (мінімальний тиск)

$$P_{ep} = \frac{Q_B + Q_T}{S_{ef}}. \quad (9.9)$$

Таким чином, не тільки швидкість зменшення тиску $\frac{dP}{dT}$ (рівняння (9.5)), а й мінімальний тиск P_{zp} у об'єкті визначається сумою газових потоків Q_g та Q_m . Цілком зрозуміло, що мінімальний тиск у відкачуваному об'єкті буде тим меншим, чим більша величина S_{ef} (ефективна швидкість відкачування об'єкта насосом) і чим меншою буде сума $Q_g + Q_m$. Величина $P_{zp} \rightarrow 0$ за $Q_g + Q_m \neq 0$ можлива лише за умови, що $S_{ef} \rightarrow \infty$.

Оскільки значення S_{ef} для конкретної вакуумної системи є цілком певною величиною (S_{ef} визначається швидкістю дії насоса S_n та провідністю вакуумпроводу, що з'єднує насос та відкачуваний об'єкт) і не може бути нескінченно великою величиною, то й $P_{zp} \neq 0$ завжди для реальних вакуумних систем.

Формула (9.9) дозволяє оцінити величину сумарного газового потоку $Q_g + Q_m$ для того, щоб за заданої величини S_{ef} одержати необхідне граничне розрідження (граничний вакуум) у відкачуваному об'єкті.

У табл. 9.1 для ілюстрації сказаного наведені розраховані за формулою (9.9) значення величини $Q_g + Q_m$ для невеликих надвисоковакуумних систем, які відкачуються насосом з $S_{ef} = 0,1 \text{ м}^3/\text{с} = 100 \text{ л/с}$.

З наведених даних випливає, що наявність сумарного газового потоку обумовленого газовиділенням Q_g і натіканням Q_m , який становить величину, що дорівнює $10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ($10^{-5} \text{ Тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$), унеможливілює у вакуумній системі з таким газовим потоком і насосом з $S_{ef} = 0,1 \text{ м}^3/\text{с} = 100 \text{ л/с}$ отримання вакууму, кращого ніж 10^{-5} Па (10^{-7} Тор), хоча граничний вакуум самого насоса може бути набагато кращим.

Усі існуючі вакуумні системи можна поділити на дві групи: динамічні і статичні. У *динамічних* системах камера, у якій за робочого

Таблиця 9.1. Значення сумарного газового потоку $Q_g + Q_m$ у надвисоковакуумній системі, за якого насосом з $S_{ef} = 0,1 \text{ м}^3/\text{с} = 100 \text{ л/с}$ забезпечується певний граничний вакуум $P_{гр}$

Граничний вакуум $P_{гр}$	$Q_g + Q_m$, $\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ($\text{Тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$)
10^{-3} Па (10^{-5} Тор) – СВ	10^{-4} (10^{-3})
10^{-5} Па (10^{-7} Тор) – ВВ	10^{-6} (10^{-5})
10^{-8} Па (10^{-10} Тор) – НВВ	10^{-7} (10^{-6})

розрідження $P_{роб}$ відбувається деякий технологічний процес, неперервно відкачується вакуумними насосами протягом усього часу, необхідного для здійснення цього процесу. Прикладом таких систем є вакуумні установки керованого термоядерного синтезу, імітатори космічного простору, мас-спектрометри, електронні мікроскопи, вакуумні установки для виготовлення елементів інтегральних мікросхем та електронних приладів, вакуумні установки знегажування і вакуумного переплавлення металів тощо.

У *статичних* системах у вакуумній камері потрібно забезпечити робоче розрідження $P_{роб}$ протягом деякого часу (як правило, тисяч годин) без неперервного її відкачування вакуумними насосами. Класичним прикладом таких вакуумних систем є радіолампи, електронно-променеві трубки різних типів, у т. ч. і кінескопи, рентгенівські трубки, фотоелементи тощо. У цих виробах „вакуумною камерою” є безпосередньо їх корпус (скляний чи металевий балон), відпаяний від вакуумної системи після створення в ньому необхідного вакууму.

У практиці виготовлення вакуумних систем були вироблені і прийняті такі вимоги до їх герметичності.

Динамічні вакуумні системи. Граничне розрідження $P_{сп}$ у таких системах повинне становити

$$P_{сп} \leq 0,1 \cdot P_{роб}. \quad (9.10)$$

Якщо система добре знегажена і газовиділеннями можна знехтувати ($Q_g = 0$), допустимий газовий потік, який надходить через усі течі, повинен становити

$$Q_m \leq P_{сп} S_{эф} = 0,1 \cdot P_{роб} S_{эф}. \quad (9.11)$$

Для високовакуумних систем при $S_{эф} = 100$ л/с і $P_{роб} = 10^{-5}$ Па (табл. 9.1) величина допустимого газового потоку, який надходить через всі течі, повинна становити $Q_m \leq 10^{-7}$ Па · м³ · с⁻¹ (10^{-6} Тор · л · с⁻¹).

Статичні вакуумні системи. Для таких систем необхідно забезпечити (при $Q_g = 0$) натікання

$$Q_T \leq V \frac{\Delta P}{\Delta t}, \quad (9.12)$$

де V – робочий об’єм системи;

ΔP – зміна тиску в ньому за час працездатності Δt .

Дані вимоги набагато жорсткіші, ніж для динамічних систем. Як правило, статичні системи повинні зберігати працездатність протягом кількох років ($\Delta t \approx 10^8$ с), і за цей час збільшення тиску в них не повинне перевищувати $\Delta P = 10^{-2}$ Па. Якщо об'єм системи $V \approx 0,01$ м³ = 10 л, з формули (12) випливає, що натікання в такий об'єм повинне становити величину

$$Q_T \leq 10^{-12} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} = 10^{-11} \text{ Тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (9.13)$$

тобто порівняно з динамічними системами Q_m повинне бути меншим у 100 000 разів. Для систем з $V \approx 1$ см³ (радіолампи) Q_m ще менше.

Забезпечення такої високої герметичності вакуумних систем є досить складною інженерною задачею. Вона розв'язується з одного боку цілою низкою конструкторських рішень від вибору матеріалів для виготовлення систем до технологій їх виготовлення та правильності експлуатації таких систем. З іншого боку, для виготовлення таких систем повинні бути створені методи та прилади контролю герметичності вакуумних систем (течошукачі), які б забезпечували знаходження таких малих негерметичностей (течій).

Пошуки течі (течопошук). У вакуумній техніці під *течопошуком* розуміють сукупність засобів, методів і способів виявлення течі. Під *течею* розуміють порушення цілісності вакуумної оболонки системи, через що вона протікає. Як правило, течами є мікропори в самому матеріалі оболонки, мікропори та мікротріщини у зварних швах, заборіни та подряпини ущільнювальних поверхонь фланців, які не герметизуються ущільнювальними прокладками за умови, що ці дефекти утворюють наскрізні канали з виходами на обидва боки вакуумної оболонки.

Величина течі характеризується газовим потоком (натіканням) Q_m , який проникає через ці дефекти у вакуумовану посудину за одиницю часу за нормального зовнішнього тиску атмосферного повітря.

Слід зазначити, що пошуки течі у вакуумних системах досить часто є складним завданням, яке для свого вирішення потребує спеціального обладнання, досвіду, значних зусиль і часу. Справа в тому, що перераховані вище дефекти (мікропори, мікротріщини, заборіни, подряпини тощо), які створюють газові потоки, наведені в табл. 9.1, візуально виявити неможливо через їх малі розміри. Проілюструємо це таким чином. Змодельємо мікропору капіляром діаметром d та

завдовжки l і розрахуємо ці геометричні розміри для натікань, наведених в табл. 9.1. Розрахунки показують, що для капіляра з $l = 1$ см натікання $Q_m = 10^{-7} - 10^{-6}$ Па·м³·с⁻¹ забезпечується за його діаметра $d \sim 0,1$ мкм, а натікання $Q_m \sim 10^{-10}$ Па·м³·с⁻¹ (типове натікання для надвисоковакуумних систем) – за $d \ll 0,1$ мкм.

Таким чином, для пошуків течі необхідно застосовувати спеціальні методи і прийоми, не пов'язані з візуальним обстеженням вузлів вакуумної системи.

Якщо насоси справні, основними причинами, що перешкоджають одержанню розрахункового граничного вакууму в системі, як уже зазначалося, є газовиділення (Q_g) і натікання через негерметичності (Q_m). Величина Q_g залежить від матеріалу, з якого виготовлена вакуумна система, якості обробки поверхонь, звернених у вакуум, їх температури тощо. Правильним підбором матеріалів, з яких виготовлена вакуумна установка, покращенням чистоти обробки її внутрішніх поверхонь та тривалим її знегажуванням під час нагрівання, величину Q_g можна звести до деякого мінімального значення, за якого

$$Q_{g \min} \ll S_{\text{эф}} P, \quad (9.12)$$

де $S_{\text{эф}}$ та P – те ж саме, що й у формулі (9.3). За таких умов величина граничного вакууму в системі буде визначатися лише величиною Q_m – натіканням.

Експериментально наявність чи відсутність течі у вакуумній системі можна встановити дуже простим способом. Якщо розрідження в системі гірше, ніж розрахункове (за умови справних насосів), то необхідно відсікти (ізолювати) систему від насоса і побудувати графік експериментальної залежності зміни тиску в ній від часу (рис. 9.1).

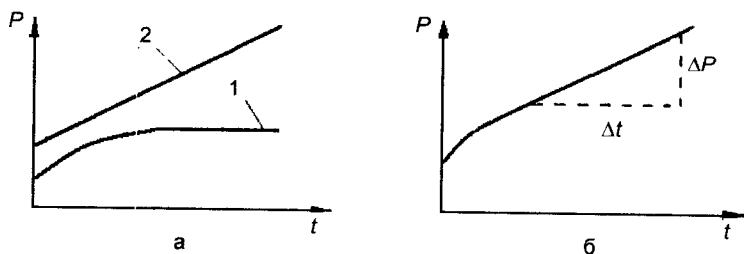


Рис. 9.1. Залежність зміни тиску з часом у системі, ізолюваній від насоса

За відсутності течі газовиділення призводить до залежності зміни тиску з часом відповідно до кривої 1, як показано на рис. 9.1, а. Характерним для кривої 1 є зменшення швидкості зміни тиску з часом і вихід кривої на насичення, що відповідає стану рівноваги між виділенням газів і їх поглинанням стінками вакуумної системи.

За наявності течі (без газовиділення) тиск P зростає в системі відповідно до лінійної залежності від часу t (крива на рис. 9.1, а), оскільки провідність течі в умовах високого вакууму не залежить від тиску і визначається лише її розмірами.

Газовиділення і натікання в чистому вигляді практично не спостерігається. Для реальних систем криві 1 і 2 накладаються одна на одну, і експериментально маємо залежність $P = P(t)$, яка зображена на рис. 9.1, б, де також є лінійна ділянка.

Для кількісної оцінки негерметичності користуються поняттям *величини течі*, або *величини натікання* V , яка визначається кількістю газу, що проникає з атмосфери всередину відкачаного й ізольованого від насоса об'єкта, об'єм V за одиницю часу

$$V = V \frac{\Delta P}{\Delta t}, \quad (13)$$

де V – величина течі (натікання);

ΔP – зміна тиску в ізольованій від насоса системі об'ємом V за час Δt (рис. 9.1, б).

При такому визначенні величини течі (натікання) стандартним газом вважають повітря, а зовнішній тиск приймається таким, що дорівнює нормальному атмосферному тиску. З формули (9.13) випливає, що одиницями натікання є одиниці газового потоку $1 \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ та $1 \text{ Тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$, між якими існує такий зв'язок

$$1 \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} = 7,5 \text{ Тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1} \text{ та } 1 \text{ Тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1} = 0,133 \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Якщо натікання у вакуумну систему становить $V = 1 \text{ Тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$, то це означає, що в ізольованому від насоса об'ємі $V = 1 \text{ л}$ за час $\Delta t = 1 \text{ с}$ тиск зростає на $\Delta P = 1 \text{ Тор}$.

Оскільки за своєю сутністю, натікання є газовим потоком, який перешкоджає одержувати у вакуумній системі максимально можливе розрідження, то для вакуумних систем величина V не повинна перевищувати значення, указані в табл. 9.1 для $Q_g + Q_m$. Особливо високі

вимоги до малості V висувують надвисоковакуумні системи, оскільки практично всі надвисоковакуумні насоси за тисків $P < 10^{-8}$ Па (10^{-10} Тор) мають порівняно невеликі швидкості дії.

Для пошуків течі використовуються як спеціальні прилади *течошукачі*, так і стандартні вакуумметри з тепловими та іонізаційними перетворювачами. Ідея використання більшості течошукачів і вакуумметрів для пошуків негерметичностей базується на тому, що ці прилади мають різну чутливість до різних газів, за допомогою яких визначають місця негерметичностей. Такі гази називають *пробними газами*, або *пробними речовинами*. Пробний газ після проникнення через місце течі всередину вакуумної системи змінює склад її залишкової атмосфери (залишкова атмосфера збагачується не повітрям, а пробним газом), що зумовлює зміну показань вакуумметра (вакуумметричний метод) появу сигналу в електронній схемі відповідного течошукача. Методи течопошуків повинні не тільки дозволяти сигналізувати про наявність течі, а й давати можливість локалізувати її, тобто встановлювати якомога точніше її місцезнаходження для подальшої ліквідації.

Основними методами пошуків течі є *метод опресовування*, *метод високочастотного розряду*, *манометричний*, *галогенний* та *мас-спектрометричний методи*. Кожний з цих методів реалізується за допомогою певних прийомів та відповідних приладів і обладнання. Основними параметрами будь-якого методу течопошуків є чутливість методу та область тисків (розріджень), за яких він застосовується. Під чутливістю методу (приладу) розуміють мінімальний газовий потік V_{\min} який може бути зареєстрований даним методом (приладом). На рис. 9.2 як ілюстрацію подано параметри вказаних вище основних методів пошуків течі.

Найбільш грубими ($V_{\min} = 10^{-2} - 10^{-3}$ Тор \cdot л \cdot с $^{-1}$) є методи опресування та високочастотного розряду (рис. 9. 2), вони ж мають і найбільш вузький діапазон розріджень, за яких можуть бути реалізованими. Найбільш універсальним (за діапазоном тисків) і найбільш чутливим ($V_{\min} = 10^{-12}$ Тор \cdot л \cdot с $^{-1}$ і краще) є мас-спектрометричний метод.

Метод опресовування полягає у створенні всередині досліджуваного об'єкта (вакуумна камера, частина вакуумпроводу тощо) тиску газу, більшого, ніж атмосферний, і використанні якого-небудь способу індикації виходу газу через негерметичність.

Цей метод найчастіше використовується для перевірки на герметичність окремих вузлів вакуумних установок, бо, як правило, у пов-

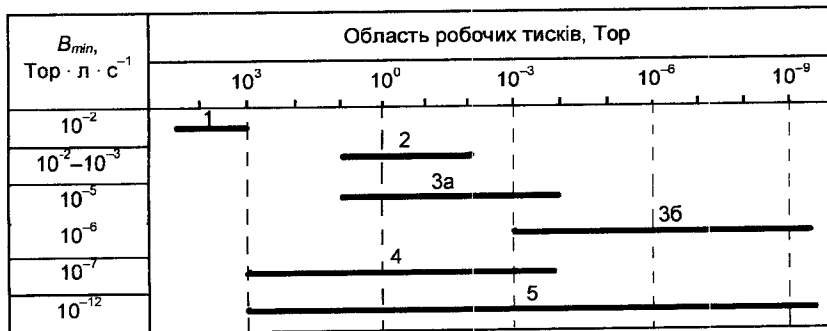


Рис. 9.2. Области робочих тисків і чутливості V_{\min} різних методів пошуків течі: 1 – метод опресовування; 2 – метод високочастотного розряду; 3 – манометричний метод з тепловим (а) та іонізаційним (б) перетворювачами; 4 – галогенний метод; 5 – мас-спектрометричний метод

ністю зібраній вакуумній складній установці неможливо створити, тиск більший, ніж атмосферний. Тиск газу всередині досліджуваного об'єкта здебільшого створюється за допомогою невеликих повітряних насосів чи компресорів. Для виявлення місць негерметичності (виходу повітря) можна використовувати коливання полум'я горілки чи свічки, піднесеної до місця течі, чи навіть звук (шипіння) повітря, що виходить через місце течі. У такі способи знаходять грубі течі $V \geq 0,5 \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ($4 \text{ Тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$). Більш чутливим є пошук течі за допомогою бульбашок повітря, які виходять з місця течі, якщо об'єкт занурити в чисту прозору воду. І, нарешті, найбільш чутливим способом знаходження течі повітря за допомогою опресовування є виявлення утворення в місці течі мильних пузирів при використанні мильної плівки, якою покривають поверхню досліджуваного об'єкта. У цілому чутливість методу опресовування є невеликою і становить близько $V_{\min} = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ($10^{-2} \text{ Тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$).

Методом опресовування користуються, якщо в певному об'єкті через наявність великої течі не вдається створити форвакуумне розрідження хоча б 10 Па (10^{-1} Тор).

Метод високочастотного розряду полягає в знаходженні місця течі у скляній вакуумній установці (або її частині) за допомогою металевого тонкого щупа, приєднаного до вторинної обмотки трансформатора

Тесла. За тиску повітря в системі $100\text{--}1\text{ Па}$ ($1\text{--}5 \cdot 10^{-2}\text{ Тор}$) і бездефектності її скляної оболонки, в разі наближення до неї щупа, іскри, що вилітають з кінця щупа, не матимуть певного напрямку свого руху. Коли ж щуп опиняється над негерметичною ділянкою скла, то іскри спрямовуються в дефектне місце, мають значну яскравість і в такий спосіб точно вказують місце течі.

Для металеві системи цей метод не придатний, оскільки іскри в разі наближення щупа до металеві поверхні рухаються найкоротшим шляхом до поверхні металу і потрапляють у ту точку поверхні, яка знаходиться найближче до щупа, а не в місце течі.

Для металевих систем використовують різновид методу високочастотного розряду, коли в скляній частині металеві вакуумної системи (спеціальна скляна трубка – розрядник, корпус скляного манометричного перетворювача тощо) від трансформатора Тесла запалюється високочастотний тліючий розряд. Місце течі таким методом можна встановити, спостерігаючи за зміною кольору розряду, якщо підозрілі на течі місця установки змочувати рідинами, які легко випаровуються (бензин, спирт, ефір, ацетон тощо). При потраплянні через негерметичність усередину установки пари такої рідини змінюється колір свічення розряду. Методами високочастотного розряду вдається відшукувати течі величиною $V_{\min} = 10^{-3}\text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ($10^{-2}\text{ Тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$). Такі течі часто називають форвакуумними.

Манометричні методи пошуку течі є найдоступнішими, оскільки манометричні перетворювачі (теплові та іонізаційні) є у всіх вакуумних установках. Як теплові, так і іонізаційні перетворювачі у складі вакууметрів можуть бути використані для пошуків течі у випадку, коли в системі вдається створити відповідні розрідження, за яких вони можуть працювати (форвакуум – для теплових перетворювачів та високий вакуум – для іонізаційних).

Метод теплового манометра. Тепловий манометр будь-якої конструкції може бути використаний для пошуків течі, єдиною необхідною умовою його ефективного використання є наявність достатньої провідності між датчиком і вакуумною системою. Пошуки течі починають з обдування пробним газом або паром пробної речовини підозрілих на течі місць (стики деталей, зварні шви тощо). Як пробну речовину вибирають такі гази чи пари, для яких коефіцієнти чутливості датчика (див. табл. 2.1 лабораторної роботи № 2) або набагато більші (наприклад, Ar), або набагато менші (наприклад, H_2 , CH_2), ніж кое-

фіцієнт чутливості датчика для повітря. У разі потрапляння цих газів через місця течі у вакуумну систему температура нитки розжарення датчика змінюється (зменшується для H_2 , CH_2), що змушує стрілку вимірювального приладу вакуумметра рухатися вліво (указуючи нібито на підвищення тиску). У разі використання Ag – усе відбуватиметься навпаки.

Отже, за допомогою теплового манометричного перетворювача і його електронного вимірювального блоку вдається досить ефективно проводити пошуки місць негерметичності у форвакуумній області (області працездатності датчика) тисків. Мінімальна величина течі, яку можна встановити таким методом, становить $10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ($10^{-5} \text{ Тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$).

Метод іонізаційного манометра використовується для пошуків течі, якщо вакуумна система може бути відкачана до розрідження $P < 10^{-1} \text{ Па}$ (10^{-3} Тор), за якого можлива нормальна робота електронного іонізаційного перетворювача (ПМІ-2 або йому подібних).

Методика пошуків течі аналогічна описаній: обдуваючи підозрілі місця вакуумної системи пробними газами (гелій, неон) або змочуючи їх пробними рідинами (ацетон, ефір, спирт), фіксують зміни показів вакуумметра (зміну іонного струму), оскільки чутливість іонізаційних манометричних перетворювачів (див. табл. 2.2 лабораторної роботи № 2) є різною для різних газів.

При обдуванні місць течі гелієм або неоном (для цих газів чутливість ПМІ є низькою порівняно з повітрям) спостерігатиметься зменшення іонного струму, і вакуумметр покаже позірне зниження тиску (рух стрілки приладу вліво). Якщо пробними речовинами будуть ацетон, спирт, ефір, то молекули пари цих складних органічних рідин, що потрапляють через негерметичність усередину вакуумної установки, в іонізаційному перетворювачі, зустрічаючись з електронами, розвалюватимуться на низку іонів-фрагментів (уламків), зумовлюючи збільшення іонного струму, у такому разі вакуумметр покаже позірне збільшення тиску (рух стрілки приладу вправо).

Методом іонізаційного манометра вдається виявляти течі мінімальною величиною $B_{\min} = 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ($10^{-7} \text{ Тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$), а в окремих випадках („метод диференціальної системи манометрів“) за допомогою магнітних іонізаційних манометрів вдається виявляти течі мінімальною величиною $B_{\min} = 10^{-10} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ($10^{-9} \text{ Тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$).

Галогенний метод пошуку місць течі ґрунтується на ефекті різкого збільшення емісії додатних газових іонів з розігрітої до 800–900 °С платини в разі потрапляння на її поверхню газів, що містять галоїди (фтор, хлор, бром, йод). Галогенний метод реалізується за допомогою спеціальних приладів, які називаються галогенними (галоїдними) течешукачами.

Основним елементом такого приладу є спеціальний датчик (рис. 9.3), який являє собою діод прямого розжарення, що складається з двох платинових електродів – колектора та емітера, у зазорі між якими продувається газ.

Електричний струм розжарення, який протікає через емітер (2) у вигляді спіралі з платинової дротини діаметром 0,2 мм, розігріває її до температури близько 900 °С, у результаті чого з її поверхні відбувається емісія додатних газових іонів. Між емітером і колектором (1) у вигляді тонкостінної трубки, що охоплює емітер, прикладається невелика різниця потенціалів, як показано на рис. 9.3. У результаті додатні іони збираються колектором і в ланцюзі колектор-емітер виникає іонний струм, який підсилюється за допомогою підсилювача (3) (початковий струм датчика). Датчик працює як за атмосферного тиску, так і у вакуумі. Якщо в простір між колектором і емітером потрапляє пробний газ, у складі якого є галогени, іонна емісія з поверхні емітера різко зростає, що зумовлює різке зростання іонного струму між колектором і емітером. Таке зростання струму є сигналом датчика, бо величина іонного струму прямо пропорційна парціальному тиску

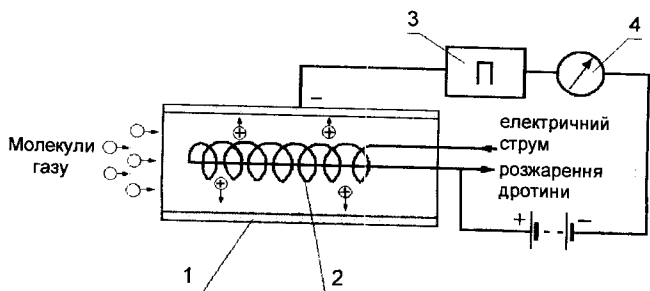


Рис. 9.3. Схематичне зображення датчика галоїдного течешукача: 1 – колектор (платинова трубка); 2 – емітер (платинова дротина); 3 – підсилювач іонного струму; 4 – вимірювальний прилад

пробного газу. Після підсилення іонний струм може бути вимірний вимірювальним приладом (4), показання якого дозволяють судити про величину течі. Паралельно з цим течошукач може подавати звуковий і світловий сигнали про наявність течі.

Механізм виникнення емісії додатних газових іонів з поверхні розігрітої платини є не до кінця вивченим, і в загальних рисах може бути описаний так. Якщо молекули газу налітають на розігріту металеву поверхню, то після відбивання від неї деяка їх частина перетворюється в додатні іони (це явище називається явищем поверхневої іонізації). Відношення числа утворених додатних іонів N^+ до числа нейтральних молекул N_0 , які залишають поверхню за 1 с (ступінь поверхневої іонізації), виражається емпіричною формулою Ленгмюра-Саха

$$\frac{N^+}{N_0} = Ae^{-\frac{A_{вих} - eU_i}{kT}}, \quad (9.13)$$

де A – деяка константа, яка характеризує пару газ – метал;

e – заряд електрона;

U_i – потенціал іонізації молекул даного газу;

$A_{вих}$ – робота виходу електрона із металу;

k – стала Больцмана;

T – абсолютна температура металу.

За відсутності галогенів між емітером і колектором у датчику (рис. 9.3) знаходиться повітря, основними складовими якого є молекули азоту, потенціал іонізації яких становить $U_i = 15$ В і відношення

$\frac{N^+}{N_0}$ – невелике. При потраплянні у простір між емітером і колектором сполук, що містять галогени (наприклад, фреон-12, CF_2Cl_2), потенціал іонізації молекул яких становить $U_i = 9-10$ В, експоненціальний член формули (9.13) різко зростає (робота виходу електронів для платини є сталою величиною яка дорівнює $A_{вих} = 5,4$ еВ), що зумовлює

різке зростання кількості додатних іонів $\frac{N^+}{N_0}$ і відповідно різке зростання й іонного струму через датчик.

Таким чином заміна повітря в датчику пробним газом, що містить галогени, викликає збільшення іонного струму, що сигналізує про появу в датчику цього пробного газу.

Як правило, галогенні течошукачі складаються з реєструючого електронного блоку (підсилювач іонного струму та прилад для його вимірювання) та двох датчиків. Один з них працює за атмосферного тиску і вмонтований у спеціальний виносний щуп, виконаний у формі пістолета. У щупі позаду датчика розташований мініатюрний вентилятор. Під час його роботи суміш пробного газу з повітрям засмоктується через вхідний отвір щупа і проходить через датчик.

За допомогою виносного щупа здійснюється пошук негерметичностей методом опресовування, коли у вакуумній системі за допомогою суміші пробного газу і повітря створюється тиск більший від атмосферного. Виносним щупом обстежуються („обнюхуються”) підозрілі на течі місця вакуумної системи і в разі знаходженні місця витoku пробного газу електронний блок сигналізує про це збільшенням величини іонного струму, а також світловим та звуковим сигналами.

Другий датчик може розміщатися за допомогою спеціального герметичного фланця безпосередньо всередині вакуумної системи. Залежно від можливостей вакуумної системи він працює як в умовах низького, так і високого вакууму. Обстеження вакуумної системи на герметичність у даному випадку проводиться обдуванням підозрілих на течі місць пробним газом, що містить галогени, за допомогою спеціального обдувача (тонкої трубки, з'єднаної з балоном з пробним газом, на виході з якої формується вузький струмінь пробного газу для обдування).

Зовнішній вигляд одного з поширених галогенних течошукачів ГТІ-6 поданий на рис. 9.4.

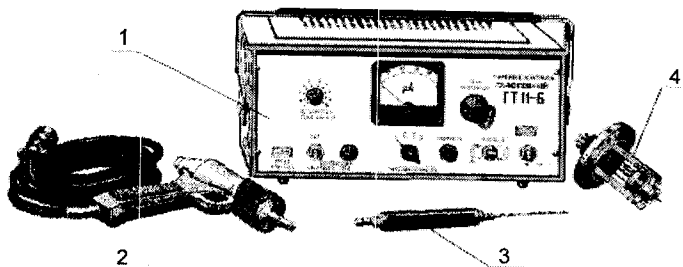


Рис. 9.4. Зовнішній вигляд течошукача ГТІ-6: 1 – електронний реєстраційний блок; 2 – виносний щуп у формі пістолета; 3 – обдувач; 4 – вакуумний датчик

Чутливість (мінімальний потік пробного газу) течешукача ГТІ-6 з виносним щупом у випадку хладону-12 (фреон CF_2Cl_2) становить $V_{\min} = (0,7-1,25) \cdot 10^{-6} \text{ Тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$. Якщо вакуумний датчик працює у вакуумі не гірше ніж $5 \cdot 10^{-4} \text{ Тор}$, реалізується максимальна чутливість течешукача, який відповідає мінімальний парціальний тиск хладону-12 у вакуумній системі $P_{\min} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ Тор}$. За гірших вакуумних умов у вакуумній системі чутливість зменшується обернено пропорційно величині тиску.

Мас-спектрометричний метод пошуку течі є найбільш чутливим і універсальним. Для цього використовується мас-спектрометр, налаштований на реєстрацію іонів одного масового числа пробного газу. Мас-спектрометричний метод може бути реалізований за допомогою мас-спектрометра будь-якого з існуючих типів. Як правило, у складі сучасних універсальних надвисоковакуумних установок є квадрупольний або монопольний мас-спектрометр для аналізу складу їх залишкової атмосфери. Він може бути успішно використаний і для пошуків течі, які не дозволяють отримати гранично можливе розрідження.

У виробництві вакуумного обладнання контроль за герметичністю виробів, як правило, здійснюється спеціалізованими пересувними мас-спектрометричними течешукачами, побудованими на основі статичного секторного магнітного аналізатора, налаштованого на виявлення пробного газу гелію. Їх називають гелієвими течешукачами.

Використання гелію як пробного газу обумовлене цілою низкою обставин:

- а) вміст гелію в атмосферному повітрі надзвичайно малий, гелій практично не сорбується стінками вакуумних установок і тому не створює фону;
- б) гелій має лише один ізотоп з масовим числом $M = 4$, який неможливо сплутати з іншими ізотопами;
- в) завдяки малим розмірам атома гелію і його інертності він є практично ідеальним пробним газом;
- г) мала величина масового числа атома гелію $M = 4$ дозволяє суттєво зменшити розміри магнітного сектора мас-спектрометра, спростити його конструкцію і, відповідно, створити малогабаритний прилад у цілому. Крім того, гелій абсолютно безпечний для вакуумної апаратури і обслуговуючого персоналу.

Принцип роботи мас-спектрометричного течешукача ґрунтується на таких процесах, що відбуваються в приладі в умовах високого вакууму:

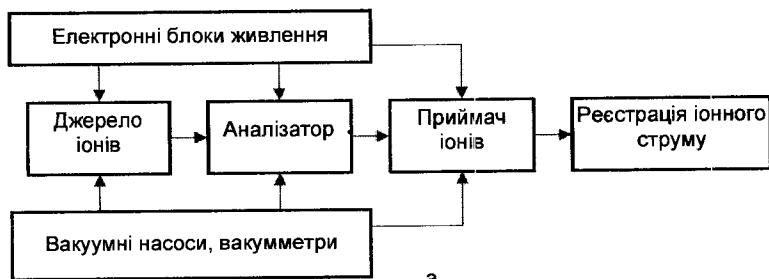
1. Перетворення атомів газів, у т.ч. й атомів пробного газу, у додатні іони із зарядом $q = +e$.
2. Створення з цих іонів моноенергетичного вузького пучка шляхом прискорення їх електричним полем.
3. Розділення іонного пучка на компоненти (іонні промені) відповідно до їх масового числа, $M = \frac{m}{q} 1$, де m – маса іона, q – заряд іона і виділення з пучка іонних променів з різними масовими числами лише іонного променя певного масового числа (пробного газу)
4. Реєстрація і вимірювання інтенсивності виділеного іонного променя.

Ці процеси здійснюються в чотирьох основних вузлах мас-спектрометра: джерелі іонів, аналізаторі, приймачі іонів та системі реєстрації (рис. 9.5, а).

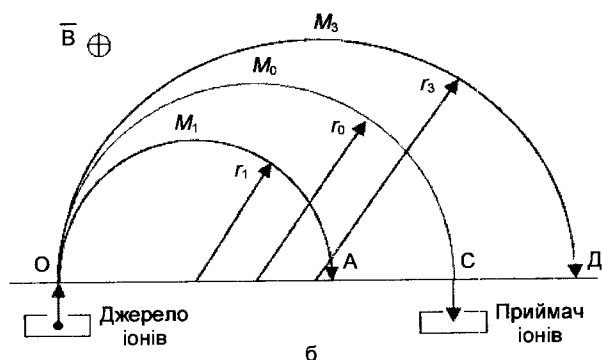
У *джерелі іонів* відбувається іонізація атомів і молекул газу і формування з них вузького пучка іонів, який в *аналізаторі* розщеплюється на компоненти (іонні промені). Виділений іонний промінь певного масового числа $M_0 = \frac{m_0}{q}$ спрямовується в *приймач іонів*, де в ланцюзі колектора виникає іонний струм, величина якого пропорційна кількості іонів, що потрапили в приймач. Після підсилення іонний струм вимірюється *системою реєстрації*.

У гелійових течешукачах переважно використовується розділення іонів у постійних магнітних полях індукцією B з поворотом пучка іонів на 180° (рис. 9.5, б). Згідно з теорією руху заряджених частинок у магнітному полі, іони під дією сили Лоренца в магнітному полі будуть рухатися дугою кола певного радіуса r . Радіус r траєкторії руху іонів з масовим числом $M = \frac{m}{q}$ залежить від індукції магнітного поля B та напруги U , що прискорює іони таким чином:

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{2UM}. \quad (9.14)$$



а



б

Рис. 9.5. Спрощена блок-схема мас-спектрометра (а) та схематичне зображення мас-спектрометричної камери аналізатора тещукача (б)

Із цієї формули випливає, що за сталих значень індукції магнітного поля B та напруги U , що прискорює іони, радіус кривизни траєкторії іонного променя визначається тільки його масовим числом M . Отже, за фіксованих значень B і U у точку C , де розташований колектор (приймач) іонів (рис. 9.5, б), будуть надходити тільки іони лише певної маси M_0 . Знаючи B , U та $M_0 = \frac{m_0}{q} = 4$, можна розрахувати положення приймача іонів ($OC = 2r_0$) так, щоб на колектор потрапляли тільки іони пробного газу гелію з $M_0 = 4$ а.о.м., а іони всіх інших атомів і молекул, які потрапляють у джерело іонів разом з пробним газом, не реєструвалися. Оскільки для гелію M_0 досить мале (для N_2 , O_2 ,

Ag масові числа M відповідно становлять 28, 32 та 40 а.о.м.) то й розміри мас-спектрометричної камери гелієвого течешукача є невеликими (наприклад, для серійного течешукача ПТІ-10 $r_0 = 3,5$ см), що дозволяє зробити прилад достатньо малогабаритним і пересувним. На відміну від інших течешукачів, мас-спектрометричні мають власну вакуумну систему (рис. 9.5, а), яка складається з насосів попереднього вакууму (як правило, ротаційних), насосів високого вакууму (дифузійних паромасляних з азотними уловлювачами масляних парів, або турбомолекулярних), клапанів, вакуумметрів та електронних блоків живлення й управління. Зовнішній вигляд одного із сучасних серійних промислових течешукачів даного типу ПТІ-10 поданий на рис. 9.6.

Мас-спектрометричні течешукачі є універсальними приладами, вони можуть використовуватися як для пошуків течі методом обдуву вакуумованого об'єкта гелієм за допомогою спеціального обдувача, з якого виходить тонкий струмінь гелію, так і методом опресовування, коли в об'єкті створюється тиск суміші повітря з гелієм трохи більший від атмосферного.

При використанні методу обдуву вакуумований об'єкт з'єднується вакуумпроводом з джерелом іонів мас-спектрометричного течешукача.

При використанні методу опресовування джерело іонів мас-спектрометричного течешукача приєднується вакуумпроводом до спеціального шупа який засмоктує суміш повітря і гелію, що виходить через негерметичності об'єкта.

Мас-спектрометричні течешукачі є найбільш чутливими серед існуючих. Гранично висока чутливість цих приладів становить 10^{-13} Па · м³ · с⁻¹

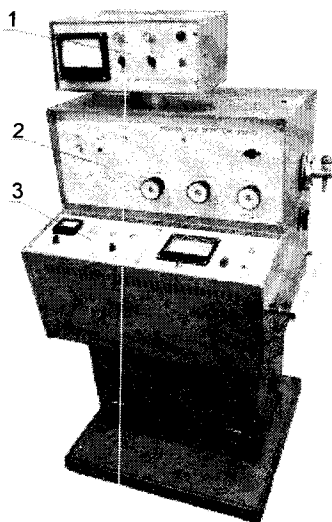


Рис. 9.6. Зовнішній вигляд течешукача ПТІ-10:
1 – блок індикації іонного струму;
2 – блок управління вакуумною системою;
3 – електронні блоки живлення

(10^{-12} Тор \cdot л \cdot с $^{-1}$). Завдяки високій чутливості та наявності власної відкачної системи область робочих тисків вакуумних установок, з якими можуть працювати гелієві течношукачі, перекидає 13 порядків (рис. 9.2), що повністю задовольняє вимоги всіх існуючих вакуумних систем і установок.

Завдання до роботи

Навчитися визначати місце натікання (течу):

- 1) методом високочастотного розряду;
- 2) галогенним методом;
- 3) манометричним методом;
- 4) мас-спектрометричним методом.

Хід роботи

1. Визначити наявність течі в досліджуваній вакуумній установці за допомогою тліючого розряду, збудженого високочастотним генератором, використовуючи як пробну речовину ацетон або спирт:
 - а) ознайомитися з будовою досліджуваної вакуумної установки (рис. 9.7);
 - б) за закритих вентилів (2) та (3) увімкнути форнасос і, відкривши вентиль (2) відкачати вакуумну камеру (5) до тиску $P = (3-5) \cdot 10^{-2}$ Тор. Ступінь розрідження контролювати вакууметром ВТ-2А з датчиком ПМТ-4 (4);

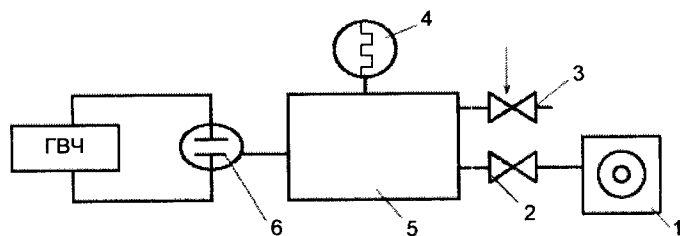


Рис. 9.7. Схематичне зображення вакуумної установки для демонстрації методу пошуку течі за допомогою тліючого розряду: 1 – форвакуумний насос 2НВП-5Д; 2 – запірний вентиль; 3 – дозуючий вентиль; 4 – манометричний перетворювач ПМТ-4М; 5 – вакуумна камера; 6 – скляна розрядна лампа

- в) увімкнути високочастотний генератор ГВЧ (рис. 9.7) і переконатися в тому, що в розрядній лампі за такого розрядження тліючий розряд відсутній;
 - г) за допомогою дозуючого вентиля (3) створити течу повітря у вакуумну камеру. Регулюючи величину натікання дозуючим вентиляем установити такий газовий потік повітря, за якого в розрядній лампі спостерігається стійке горіння тліючого розряду;
 - д) за допомогою шприца облити пробною рідиною (ацетоном або спиртом) вхідний штуцер дозуючого вентиля. Переконатися у зміні показань вакуумметра та кольору свічення розряду в розрядній лампі;
 - е) закрити дозуючий вентиль і, продовжуючи відкачування, спостерігати за зміною показань вакуумметра та зміною свічення тліючого розряду. Повторити п. д) і переконатись у відсутності течі. Зробити висновок;
 - ж) закрити вентиль (2) і вимкнути установку.
2. Визначити наявність течі в досліджуваній вакуумній установці за допомогою галоїдного течешукача ГТІ-6 методом опресовування:
- а) ознайомитися з будовою досліджуваної вакуумної установки (рис. 9.8);
 - б) ознайомитися з будовою (рис. 9.4) та порядком роботи з галоїдним течешукачем ГТІ-6 (інструкція до приладу). Приєднати до реєструючого блоку (1) виносний щуп (2) й увімкнути прилад;
 - в) через вентиль (1) (рис. 9.8) залити у вакуумну камеру (2) кілька крапель галоїдної рідини (CF_2Cl_4) і автомобільним насосом

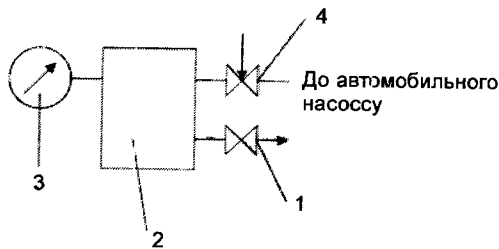


Рис. 9.8. Схематичне зображення вакуумної установки для демонстрації пошуку течі галоїдним течешукачем: 1 – запірний вентиль; 2 – вакуумна камера; 3 – механічний манометр; 4 – дозуючий вентиль

- створити в камері тиск близько 2 атм. Після цього закрити вентиль (1);
- г) дослідити за допомогою щупа приладу підозрілі щодо течі місця установки. Переконались у відсутності течі;
 - д) відкрити дозуючий вентиль (4) і створити невелику течу. Знайти течу за допомогою щупа. За наявності течі має місце відхилення стрілки приладу та збільшення частоти звукового й світлового сигналів течешукача ГТІ-6;
 - е) закрити дозуючий вентиль (ліквідувати течу). Пересвідчитись у відсутності течі за допомогою ГТІ-6. Вимкнути ГТІ-6. Зробити висновки.
3. Визначити наявність течі в досліджуваній високовакуумній установці манометричним і мас-спектрометричним (мас-спектрометр МХ7303) методами:
- а) ознайомитися з будовою вакуумної установки УВЛ-8 (лабораторна робота № 5, розділи „Методичні вказівки до виконання роботи” і „Порядок вмикання та вимикання установки”). Ознайомитися за заводськими інструкціями з будовою мас-спектрометра МХ7303 та правилами його експлуатації;
 - б) увімкнути УВЛ-8, одержати в робочій камері високий вакуум. Увімкнути мас-спектрометр і записати мас-спектр залишкової атмосфери. Звернути увагу на величини піків N_2 , O_2 та Ar у мас-спектрі;
 - в) за допомогою дозуючого вентиля В2 (рис. 9.15) лабораторної роботи № 5) створити натікання атмосферного повітря у вакуумну камеру (збільшити тиск приблизно на порядок). Записати мас-спектр залишкової атмосфери в разі натікання. Звернути увагу на величини піків N_2 , O_2 та Ar . Зробити висновок;
 - г) збільшити чутливість підсилювача іонних струмів мас-спектрометра і, установивши циклічну розгортку спектра мас у районі масового числа $M = 4$ а.о.м., проконтролювати наявність у мас-спектрі піка гелію з $M = 4$ а.о.м.;
 - д) обдути гелієм вхідний штуцер дозуючого вентиля і переконались у різкому зростанні величини інтенсивності піка He у мас-спектрі. Переконались також у зміні показань вакуумметра ВІТ-3 (іонізаційний датчик ПМІ-2);
 - е) закрити дозуючий вентиль і спостерігати за зменшенням інтенсивності піка He у мас-спектрі. Зробити висновки;

- ж) самостійно встановити, які мас-спектрометричні піки повинні мати місце в разі використання як пробних газів парів спирту та ацетону. Експериментально перевірити свої висновки, повторивши пункт д) і замінивши пробний газ гелій на спирт або ацетон. Переконайтесь у зміні показань вакуумметра ВІТ-3 (іонізаційний датчик ПМІ-2);
- з) вимкнути мас-спектрометр та вакуумну установку УВЛ-8.

Зміст звіту

1. Зміст методів течепошуку (метод високочастотного розряду, галогенний, манометричний та мас-спектрометричні методи).
2. Результати пошуку течі.

Запитання для самоконтролю

1. Чим обумовлюється граничний вакуум системи?
2. Що таке герметичність вакуумної системи? Яка її кількісна оцінка? Дайте визначення величині течі.
3. Чим відрізняються вимоги до герметичності динамічних і статичних вакуумних систем?
4. Які основні методи пошуків течі та прилади для їх реалізації? Які відмінності в чутливостях методів пошуку течі?
5. У чому полягає сутність галогенного методу пошуків течі?
6. Охарактеризуйте манометричний метод пошуків течі.
7. Охарактеризуйте мас-спектрометричний метод пошуків течі.
8. Чим обумовлений вибір гелію як пробного газу?

Література: [1, 2, 4, 5].

Вивчення конструкції та одержання високого вакууму у промисловій вакуумній установці ВУП-5

Мета роботи: ознайомитися з конструкцією вакуумного універсального поста ВУП-5, одержати високий вакуум у робочому об'ємі установки, провести напилення тонкої металевої плівки.

Обладнання: вакуумна установка ВУП-5 та технічна документація до неї, пристрій для випаровування металів у вакуумі, підкладки з полірованого скла.

Короткі загальні та теоретичні відомості

Сучасна вітчизняна промислова установка ВУП-5 (вакуумний універсальний пост) виробництва ВАТ „Selmi” призначена для одержання плівок з різних металів, металізації поверхонь невеликих зразків, підготовки (препарування) об'єктів для електронних мікроскопів, а також проведення низки досліджень (у галузі фізики, хімії, біології, матеріалознавства тощо) в умовах високого вакууму. До комплекту приладу входить близько 10 різних пристроїв для проведення цих досліджень. ВУП-5 широко використовується в наукових установах України та країн СНД.

ВУП-5 (рис. 10.1) виконаний у вигляді однієї стійки, у якій розміщені робоча вакуумна камера (1), вакуумна система, за допомогою якої в робочій камері створюється необхідне розрідження, блоки живлення вакуумної системи і пристроїв та пульт управління установкою й пристроями.

Для полегшення доступу до вузлів установки під час профілактичних і ремонтних робіт бокові і задня стінки стійки можуть бути зняті, а передня стінка виконана у вигляді двостулкових дверей, що легко

відкриваються. Робоча вакуумна камера (1) виконана у вигляді металевого (нержавіюча сталь) ковпака з двома вакуумними скляними вікнами-ілюмінаторами. Крім стаціонарного пульта управління (2), ВУП-5 має невеликий переносний пульт управління вакуумною системою (рис. 10.6), який з'єднується з установкою гнучким кабелем завдовжки близько двох метрів. Цей пульт може бути розташований на робочому столі оператора, що дозволяє керувати установкою дистанційно.

У робочій камері створюється високий вакуум 10^{-2} – 10^{-4} Па (10^{-4} – 10^{-6} Тор). Для одержання такого розрідження використовується класична цільнометалева вакуумна система на базі паромасляного високовакуумного насоса НВДМ-160 та форвакуумного механічного пластинчато-роторного насоса 2НВР-5ДМ. Ущільнення всіх роз'ємних вузлів здійснюється за допомогою гумових прокладок. Високовакуумна відкачна система розташована в лівій частині стійки.

Спрощена принципова вакуумна схема ВУП-5 подана на рис. 10.2.

Попередній вакуум (не гірше ніж $6,6$ Па ($5 \cdot 10^{-2}$ Тор)) створюється механічним форвакуумним насосом (2). За допомогою комутуючих електромагнітних клапанів K_7 і K_8 форнасос може або відкачувати робочу камеру (через клапан K_7), або відкачувати (через клапан K_8) форвакуумний балон (3), дифузійний насос (4) і азотний уловлювач (5). Вимірювання попереднього вакууму здійснюється за допомогою манометричних перетворювачів ПМТ-2 D_1 (робоча камера), D_2 (форнасос) та D_4 (дифнасос).

Високий вакуум не гірше ніж $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па ($1 \cdot 10^{-5}$ Тор) у вакуумній камері (1) створюється дифузійним паромасляним насосом НВДМ-160 (4) з паспортною швидкістю дії 700 л/с. У разі охолодження уловлювача (5)

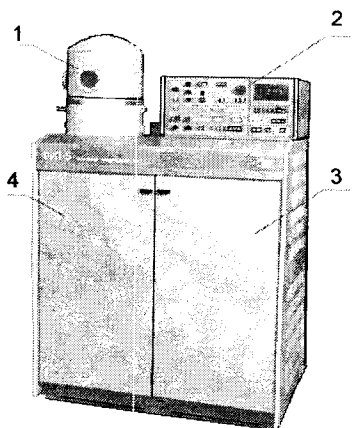


Рис. 10.1. Загальний вигляд приладу ВУП-5: 1 – робоча вакуумна камера; 2 – пульт управління; 3 – відсік для блоків живлення; 4 – відсік для вакуумної системи

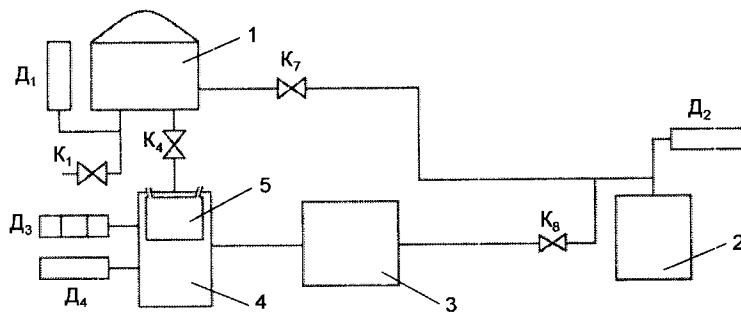


Рис. 10.2. Спрощена принципова вакуумна схема ВУП-5: 1 – робочий об'єм; 2 – форвакуумний насос; 3 – форвакуумний балон; 4 – дифузійний насос; 5 – високовакуумний азотний уловлювач; D_1 , D_2 , D_4 – манометричні перетворювачі ПМТ-2 для вимірювання форвакууму; D_3 – манометричний перетворювач ПМІ-2 для вимірювання високого вакууму

рідким азотом граничний вакуум у робочій камері покращується на порядок і становить $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па ($1 \cdot 10^{-6}$ Тор). Робоча камера в нижній своїй частині приєднується до азотного уловлювача через високовакуумний клапан K_4 із пневмоприводом. Для плавного напускання в робочу камеру повітря або іншого газу слугує дозуючий п'єзокерамічний вентиль (натікач) K_1 з електричним управлінням.

Загальний вигляд вакуумної системи (за відкритих передніх дверей стійки) ВУП-5 поданий на рис. 10.3.

Вакуумна система ВУП-5 може працювати у двох режимах – ручному й автоматичному, тобто одержання високого вакууму в робочій камері може відбуватися під безпосереднім управлінням оператора або повністю без його втручання.

Для захисту обслуговуючого персоналу від ураження електричним струмом передбачене блокування (за відкритих бічних і задньої стінок каркаса) електричного живлення всіх вузлів ВУП-5. Для захисту підковпачного обладнання й електронних блоків його живлення (випаровувачі, нагрівники тощо) передбачене блокування їх роботи в недостатньо високому (гірше за 10^{-1} Па) вакуумі.

Одержання тонких плівок резистивним випаровуванням. Тонкі плівки як металів, так і неметалів надзвичайно широко використовуються

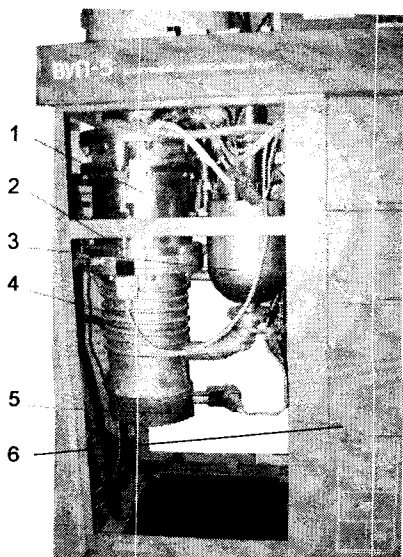


Рис. 10.3. Загальний вигляд ВУП-5 з відкритими передніми дверима:
 1 – азотний уловлювач; 2 – манометричний перетворювач ПМІ-2;
 3 – форвакуумний балон;
 4 – дифузійний насос; 5 – електроніч дифузійного насоса; 6 – електронні блоки живлення

в сучасній науці і техніці. Протягом останніх 30–40 років у фізиці твердого тіла сформувався самостійний напрямок, пов'язаний з дослідженням особливостей стану твердого тіла у вигляді тонкої плівки – **фізика тонких плівок**. Величезний прогрес у розумінні і практичному використанні особливих властивостей тонких плівок та технологій їх приготування дозволили створити елементну базу сучасної мікроелектроніки. Сьогодні зароджується новий напрямок науки і техніки – наноелектроніка і нанотехнології. Усе це відбувається значною мірою завдяки успіхам фізики тонких плівок.

У цій лабораторній роботі студентам пропонується ознайомитися з одним з найпростіших способів одержання тонких металевих плівок – осадженням плівок з парової фази, одержаної резистивним нагріванням вихідного металу.

Практично всі метали за кімнатної температури є твердими кристалічними тілами. Як і більшість твердих тіл, метали під час нагрівання до певної температури плавляться (переходять у рідкий стан). У разі подальшого нагрівання вони починають кипіти й випаровуватися. У табл. 10.1 наведені температури плавлення низки широковикористовуваних металів. Якщо процеси плавлення відбуваються на по-

Таблиця 10.1. Основні параметри випаровування легкоплавких металів

Речовина, що випаровується	Температура плавлення, °C	Матеріал випарника	Примітка
Sn	505	W, Ta, Mo	Змочує і руйнує Mo
Pb	601	W, Mo, Ni, Fe	Не змочує тугоплавкі метали, металева пара токсична
Al	932	W	Легко змочує й розчиняє всі матеріали; утворює сплави
Ag	1234	Mo, Ta	Не змочує W, Mo
Au	1336	W, Mo	Змочує W, Mo
Cu	1357	W, Mo, Ta	Практично не взаємодіє з тугоплавкими матеріалами
Ni	1723	W	Утворює сплави з тугоплавкими металами

вітрі за нормального атмосферного тиску, то поверхня розігрітого металу покривається окисами, які утруднюють його кипіння і випаровування. У разі ж нагрівання металу у високому вакуумі він звільняється від різних летких домішок (очищається), і достатньо лише трохи збільшити температуру металу після його плавлення, як він починає інтенсивно випаровуватися. Деякі метали (Ti, Cr, Zn) активно випаровуються у вакуумі навіть за температур, менших ніж температура плавлення, залишаючись при цьому твердими (сублімація).

Найпростіший спосіб випарувати легкоплавкий метал у високому вакуумі – це розмістити його невеликий шматочок на тонкій стрічці у формі човника (рис. 10.4), виготовленою з тугоплавкого металу (W, Ta, Mo, Re), і нагріти стрічку до необхідної температури, пропускаючи безпосередньо через неї електричний струм у кілька десятків ампер. Такий спосіб випаровування називається резистивним.

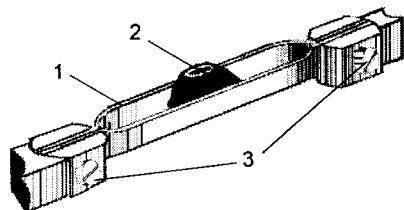


Рис. 10.4. Схематичне зображення стрічкового випарувача: 1 – стрічка з тугоплавкого металу завтовшки 50–100 мкм у формі човника; 2 – вихідний метал; 3 – контактні затискачі

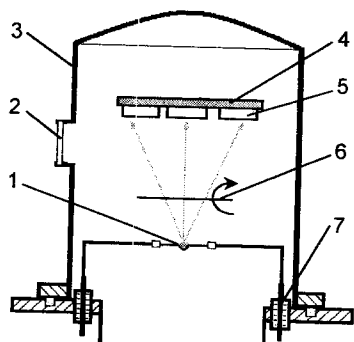


Рис. 10.5. Схема осадження тонких металевих плівок з парової фази:
 1 – стрічковий випаровувач; 2 – скляне вікно; 3 – ковпак вакуумної камери; 4 – тримач підкладок; 5 – підкладка; 6 – екран-заслонка; 7 – струмоввід

На рис. 10.5 наведена схема одержання тонких металевих плівок шляхом конденсації випарованого в такий спосіб металу. Атоми, що випаровуються з поверхні металу, розігрітого стрічковим випаровувачем (1), мають значну кінетичну енергію й у високому вакуумі розлітаються від розігрітої поверхні металу прямолінійно в різні боки. Якщо на їх шляху розмістити холодну поверхню (5), своєрідну підкладку (зі скла, кераміки, іншого металу), вони осідають (конденсуються) на ній з утворенням твердого тіла – металеві плівки. Товщина плівки залежить від інтенсивності випаровування вихідного металу, віддалі підкладки від випаровувача та часу експозиції підкладки в паровому потоці. Підкладки закріплюються на тримачі (4), за допомогою поворотної заслонки (6) регулюється час експозиції підкладки в паровому потоці (час наплення плівки). Через скляне оглядове вікно (2) здійснюється візуальний контроль за процесом осадження плівки.

Тугоплавкі метали випаровують за допомогою електронно-променевого, дугового та плазмового нагрівання. Обладнання для такого випаровування (воно є в комплекті ВУП-5) є набагато складнішим за обладнання для резистивного випаровування. Установа ВУП-5 комплектується обладнанням для нанесення плівок практично всіх металів і низки неметалів.

Завдання до роботи

1. Ознайомитися з конструкцією вакуумної установки ВУП-5 та її основними параметрами.

2. Одержати й виміряти високий вакуум у робочій камері ВУП-5.
3. Ознайомитися з одним з найпоширеніших вакуумних технологічних процесів – одержанням тонких металевих плівок на скляних підкладках (одержати резистивним випаровуванням плівку Al або Si на скляній підкладці).

Порядок роботи з ВУП-5

Студенти одержують високий робочий вакуум у ВУП-5 у режимі ручного управління роботою вакуумної системи за допомогою виносного пульта управління (рис. 10.6).

У верхній частині пульта розташовані клавіші (кнопки) перемикачів управління роботою вакуумних клапанів.

На лицевій поверхні пульта зображена мнемосхема комутації вузлів вакуумної системи ВУП-5, яка відповідає його принциповій вакуумній схемі, зображеній на рис. 10.2. Після натискання певної кнопки пульта відкривається відповідний клапан системи із дублюванням його стану сигнальною лампочкою на мнемосхемі. Після натискання кнопки „АВТ” ВУП-5 переходить у автоматичний режим роботи вакуумної системи.

Порядок увімкнення приладу

Перш ніж увімкнути ВУП-5, необхідно ознайомитися з описом конструкції приладу та правилами його експлуатації, користуючись заводською технічною документацією (книга 2). Усі роботи на приладі повинні проводитися з дотриманням правил техніки безпеки під безпосереднім керівництвом викладача або лаборанта.

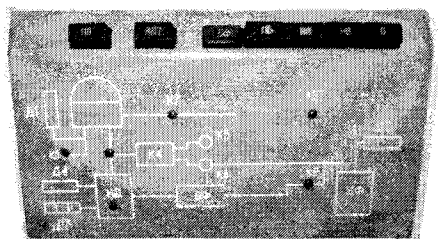


Рис. 10.6. Виносний пульт управління ВУП-5

1. Перевірити положення кнопок на виносному пульті управління (рис. 10.6). Повинна бути натиснута лише кнопка „БФ” („Балон форвакуумний”).
2. Натиснути кнопку „Сеть” на пульті керування ВУП-5. При цьому повинна засвітитися сигнальна лампочка поряд із кнопкою.
3. Увімкнути живлення двигуна форнасоса (натиснути кнопку „НФ” („Насос Форвакуумний”) на пульті керування ВУП-5). На пульті повинна засвітитися сигнальна лампочка поряд з кнопкою і чути характерний шум працюючого механічного насоса. Розрідження на вході у форнасос контролюється манометричним перетворювачем D_2 (рис. 10.2) і повинне становити не гірше, ніж 2 Па ($1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Тор}$), що відповідає значенню ЕРС термопари близько 5 мВ . Якщо натиснути кнопку „БФ” на виносному пульті, повинна засвітитися лампочка K_8 – це означає, що клапан K_8 відкритий і форнасос відкачує форбалон, дифнасос і високовакуумний уловлювач (рис. 10.2).
4. Відкрити вентиль подачі води для охолодження дифузійного насоса.
5. У разі досягнення попереднього вакууму в дифузійному насосі близько 2 Па ($1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Тор}$) за показаннями датчика D_4 (або D_2) увімкнути живлення електропечі дифузійного насоса (натиснути кнопку „НД” („Насос дифузійний”) на пульті управління ВУП-5). Повинна світитися сигнальна лампочка біля кнопки „НД” та на мнемосхемі виносного пульту.
6. Через 30–40 хвилин перевірити наявність високого вакууму в дифузійному насосі. За його нормальної роботи величина ЕРС термопари датчика D_4 повинна становити близько 10 мВ .
7. Перевірити, чи закритий ковпак робочої камери, й одержати в ній попередній вакуум не гірше ніж 5 Па ($4 \cdot 10^{-2} \text{ Тор}$) згідно з показаннями датчика D_1 . Для цього натиснути кнопку „ПВ” („Попередній вакуум”) на виносному пульті керування. При цьому клапан K_8 повинен перейти в закритий стан, а клапан K_7 – відкритися. (Сигнальна лампочка K_8 повинна згаснути, а сигнальна лампочка K_7 – засвітитися).
8. Після досягнення необхідного попереднього вакууму в робочій камері натиснути на виносному пульті кнопку „ВВ” („Високий вакуум”). При цьому клапан K_7 закриється, відкриються клапан K_8 і високовакуумний клапан K_4 . Дифузійний насос розпочне відкачування робочої камери на високий вакуум.

9. Через 40–60 хв виміряти високий вакуум у робочій камері: переконатися, що величина ЕРС термопари датчика D_1 становить близько 10 mV й увімкнути високовакуумний датчик D_3 (ПМІ-2) відповідно до порядку проведення вимірювань манометричним перетворювачем ПМІ-2 (установити необхідний струм емісії катода, прогріти анодну сітку, установити нуль підсилювача, вибрати відповідну шкалу вимірювання приладу). Виміряне значення тиску занести в робочий зошит.
10. Провести конденсацію металевої плівки, спостерігаючи за ходом напilenня через ілюмінатори робочої камери.
11. Витримати одержаний зразок у високому вакуумі близько 30 хв.
12. Напустити атмосферне повітря в робочу камеру – натиснути на виносному пульті управління кнопку „НВ” („Напуск повітря”). При цьому високовакуумний клапан K_4 перейде в закритий стан, відкриється клапан напускання повітря K_1 і робоча камера розгерметизується.
13. Відкрити вакуумну камеру й вилучити отримані зразки металевих плівок.

Порядок вимикання приладу

1. Закрити ковпак робочої камери. Віджати кнопку „НВ” на виносному пульті управління й натиснути кнопку „ПВ” (відкачати робочу камеру до форвакууму).
2. Натиснути кнопку „БФ” виносного пульта управління і вимкнути живлення печі дифузійного насоса.
3. Через 25–30 хвилин вимкнути форвакуумний насос і закрити вентиль подачі води до дифузійного насоса.

Хід роботи

1. Відкрити робочу камеру установки (відхилити ковпак до упору).
2. Змонтувати на робочій платформі вакуумної камери резистивний випарник зі шматочком металу для випаровування. Установити напроти випарника контрольне скло-підкладку. Перевірити роботу екрану-заслонки.
3. Закрити ковпак і провести вимикання ВУП-5 згідно з розділом „Порядок увімкнення приладу”.

4. Одержати в робочій камері високий вакуум і провести конденсацію плівки металу.
5. Вилучити отримані зразки і вимкнути ВУП-5 згідно з розділом „Порядок вимикання приладу”.

Зміст звіту

1. Принципова вакуумна схема ВУП-5.
2. Технічні параметри ВУП-5 та його застосування.
3. Резистивний спосіб одержання тонких металевих плівок.
4. Результати вимірювань форвакууму та високого вакууму в установці.

Запитання до самоконтролю

1. Описати роботу вакуумної системи ВУП-5.
2. Чому на початковому етапі розжарення стрічки резистивного випарника відбувається значне погіршення високого вакууму в робочій камері ВУП-5?
3. Користуючись вакуумною схемою ВУП-5 (рис. 10.1), описати роботу автоматики приладу та свої дії в разі:
 - аварійного вимикання подачі води;
 - аварійного вимикання електричного струму мережі.

Література: [5–7].

Довідковий розділ

Фізичні сталі

Найменування величини	Округлене значення в системі СІ
Стала Больцмана, k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Універсальна газова стала, R	8,31 Дж/моль·К
Заряд електрона, e	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Маса електрона, m_e	$9,1 \cdot 10^{-31}$ кг
Маса протона, m_p	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
Стала Планка, h	$6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Число Авогадро (число молекул в 1 молі речовини)	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹

Одиниці тиску

Одиниця	Па (Н/м ²)	бар	мбар	мм рт.ст. (Тор)	атм
Па (Н/м ²)	1	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$9,87 \cdot 10^{-6}$
бар	$1 \cdot 10^5$	1	1000	750	0,987
мбар	100	$1 \cdot 10^{-3}$	1	0,75	$9,87 \cdot 10^{-4}$
мм рт.ст. (Тор)	133	$1,33 \cdot 10^{-3}$	1,33	1	$1,32 \cdot 10^{-3}$
атм	$1,01 \cdot 10^5$	1,013	1013	760	1

Одиниці газового потоку

Одиниця	Па · м ³ /с	мбар · л/с	Тор · л/с
Па · м ³ /с	1	10	7,5
мбар · л/с	0,1	1	0,75
Тор · л/с	0,133	1,33	1

Література

1. Вакуумная техника : Справочник / Е. С. Фролов, В. Е. Минайчев, А. Т. Александрова и др.; под общей ред. Е. С. Фролова, В. Е. Минайчева. — М. : Машиностроение, 1992. — 480 с.
2. Глазков А. А. Учебная лаборатория вакуумной техники / А. А. Глазков, Р. А. Милованова. — М. : Атомиздат, 1971. — 278 с.
3. Грошковский Я. Техника высокого вакуума / Я. Грошковский ; пер. с польск. — М. : Мир, 1975. — 624 с.
4. Кучеренко Е. Т. Справочник по физическим основам вакуумной техники / Е. Т. Кучеренко. — К. : Вища школа, 1981. — 264 с.
5. Лобода В. Б. Фізичні основи вакуумної техніки / В. Б. Лобода. — Суми : Університетська книга, 2011. — 256 с.
6. Основы вакуумной техники / Б. И. Королев, В. И. Кузнецов, А. И. Пипко и др. — М. : Энергия, 1975. — 416 с.
7. Розанов Л. Н. Вакуумная техника / Л. Н. Розанов. — М. : Высшая школа, 1990. — 320 с.
8. Саксаганский Г. Л. Электрофизические вакуумные насосы / Г. Л. Саксаганский. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 280 с.
9. Сверхвысокий вакуум в радиационно-физическом аппаратостроении / Г. Л. Саксаганский, Ю. Н. Котельников, М. Д. Малеев и др.; под общей редакцией Г. Л. Саксаганского. — М. : Атомиздат, 1976. — 288 с.
10. Уэстон Дж. Техника сверхвысокого вакуума / Дж. Уэстон ; пер. с англ. — М. : Мир, 1988. — 366 с.

Навчальне видання

Лобода Валерій Борисович
Хурсенко Світлана Миколаївна
Шкурдода Юрій Олексійович

**Лабораторний практикум
з фізичних основ вакуумної техніки**

Навчальний посібник

Головний редактор В.І. Кочубей
Технічний редактор І.Ф. Артюшенко
Дизайн обкладинки і макет В.Б. Гайдабрус
Комп'ютерна верстка О.І. Молодецька, А.О. Литвиненко

Підписано до друку 22.09.2015
Формат 60x84 ¹/₁₆. Папір офсетний.
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 13,4. Обл.-вид. арк. 13,1.
Додрук. Замовлення № Д15-09/30

Відділ реалізації
Тел./факс: (0542) 65-75-85
E-mail: info@book.sumy.ua

ТОВ "ВТД "Університетська книга"
40009, м. Суми, вул. Комсомольська, 27
E-mail: publish@book.sumy.ua
www.book.sumy.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 489 від 18.06.2001

Надруковано на обладнанні ВТД "Університетська книга"
вул. Комсомольська, 27, м. Суми, 40009, Україна