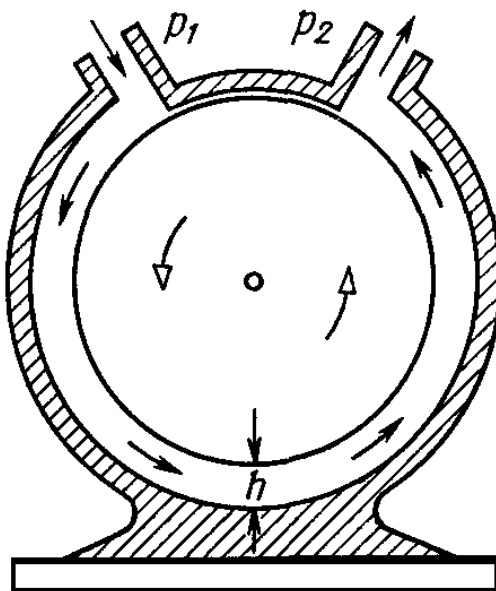


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДВНЗ «УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА КВАНТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

МИТРОПОЛЬСЬКИЙ І.Є., ГРИЦАК Р.В.

ВАКУУМНА ТЕХНІКА

Навчальний посібник



Ужгород
«Говерла»
2018

УДК 621.52

М-66

Митропольський І.Є., Грицак Р.В. **Вакуумна техніка**: Навчальний посібник, Ужгород. Видавництво УжНУ «Говерла», 2018. – 138 с. – Іл. 63. – Бібл.9. – Укр. мовою.

У посібнику викладено основні поняття вакуумної техніки, розглянуто процеси і явища, на яких ґрунтується дія засобів для отримання і вимірювання вакууму. Наводиться будова та технічні характеристики сучасних вакуумних насосів, вакуумметрів, течешукачів, уловлювачів, а також матеріалів, які застосовуються для виготовлення елементів вакуумних систем. Приведені літерні коди, умовні графічні позначення елементів і пристроїв вакуумної системи. Посібник містить тестові завдання для контролю засвоєння матеріалу. Призначено для студентів і магістрантів фізичних і інженерних спеціальностей.

Рецензенти

д. ф.-м.н., проф. Шафраньош І.І.

д. ф.-м.н., проф. Малінін О.М.

Рекомендовано до друку Вченою радою ДВНЗ «Ужгородський національний університет» (протокол №5 від 24 травня 2018 р.)

Рекомендовано до друку Редакційно-видавничою радою ДВНЗ «Ужгородський національний університет» (протокол №4 від 23 травня 2018 р.)

ЗМІСТ

Передмова.....	5
Вступ. Експеримент як складова частина процесу пізнання	6
1. Визначення вакууму та його характеристики	9
1.1. Вакуум, його роль в у науці і техніці	9
1.2. Історія вакуумної техніки	11
1.3. Теоретичні основи вакуумної техніки.....	14
1.4. Явища переносу	19
<i>Тестові завдання до розділу 1</i>	<i>22</i>
2. Вакуумні насоси. Способи одержання попереднього розрідження	25
2.1. Теоретичні основи процесу відкачування	25
2.2. Основні параметри вакуумних насосів	28
2.3. Класифікація вакуумних насосів	30
2.4. Об'ємне відкачування. Об'ємні насоси.....	31
2.4.1. Пластинчато-роторні насоси	32
2.4.2. Пластинчато-статорні насоси.....	33
2.4.3. Золотникові насоси.....	34
2.4.4. Обертові газобаластні насоси.....	35
2.4.5. Об'ємні безмасляні насоси.....	35
2.5. Рідинно - кільцеві насоси.....	36
2.6. Поршневі насоси.....	37
2.7. Вакуумна олива для обертових насосів	38
<i>Тестові завдання до розділу 2</i>	<i>39</i>
3. Молекулярні вакуумні насоси	42
3.1. Принцип молекулярної відкачки	42
3.2. Молекулярний обертовий насос	42
3.3. Турбомолекулярні насоси	44
3.4. Струминні насоси	47
3.4.1. Типи струминних насосів	47
3.4.2. Дифузійні вакуумні насоси.....	49
3.4.3. Багатоступеневі пароструминні насоси	51
3.4.4. Робочі рідини для пароструминних насосів	53
3.5. Іонні насоси	55
<i>Тестові завдання до розділу 3</i>	<i>56</i>
4. Фізико-хімічні методи отримання вакууму. Насоси для високого і надвисокого вакууму	59
4.1. Сорбція і її види	59
4.2. Фізична адсорбція і її головні закономірності	59
4.3. Хімічна адсорбція	60
4.4. Абсорбція газів металами	60
4.5. Закони десорбції	61
4.6. Знегажування і газопоглиначі	62
4.7. Сорбційні вакуумні насоси.....	64
4.7.1. Випарні насоси.....	67

4.7.2. Іонно-сорбційні насоси (іонно-гетерні)	68
4.7.3. Адсорбційні насоси	73
4.8. Кріогенні насоси	75
<i>Тестові завдання до розділу 4</i>	78
5. Техніка вимірювання низьких тисків	82
5.1. Класифікація манометрів	82
5.2. Деформаційні манометри	83
5.3. Гідростатичні вакуумметри	84
5.4. Теплові манометричні перетворювачі	87
5.5. Іонізаційні манометричні перетворювачі	91
5.6. Іонізаційний манометр Байярда – Альперта	94
5.7. Магнітні перетворювач	94
5.8. Радіоізотопні перетворювачі	96
5.9. Динамічні і радіометричні вакуумметри	96
5.10. Груба оцінка вакууму	98
5.11. Градування вакуумметрів	99
5.12. Вимірювання парціальних тисків	99
5.13. Вакуумметри з активним датчиком	101
<i>Тестові завдання до розділу 5</i>	102
6. Вакуумні системи та їх елементи	108
6.1. Вакуумні уловлювачі та їх експлуатація	108
6.1.1. Призначення та основні вимоги до вакуумних уловлювачів	108
6.1.2. Механічні уловлювачі	109
6.1.3. Низькотемпературні охолоджувальні уловлювачі	110
6.1.4. Адсорбційні уловлювачі	111
6.1.5. Гарячі (термічні) уловлювачі	112
6.1.6. Електричні (газорозрядні) уловлювачі	113
6.2. Вакуумні з'єднання	113
6.2.1. Конструкційні матеріали, що використовуються у вакуумній техніці	113
6.2.2. Нерозбірні вакуумні з'єднання	115
6.2.3. Розбірні вакуумні з'єднання	116
6.2.4. Передача руху у вакуум	118
6.2.5. Запірно-регулююча апаратура	119
6.3. Течі і методи їх пошуку	119
6.4. Особливості фізики надвисокого вакууму	123
6.4.1. Отримання надвисокого вакууму	123
6.4.2. Вимірювання надвисокого вакууму	124
6.5. Умовні графічні позначення елементів вакуумних систем	125
<i>Тестові завдання до розділу 6</i>	132
Заключення	136
Список використаної літератури	138

ПЕРЕДМОВА

В університетській підготовці фізиків одним з найважливіших завдань є отримання досвіду з проведення наукових досліджень в різних напрямках їх спеціалізації. Рівень досліджень і цінність одержуваних результатів безпосередньо пов'язані з правильністю вибору і застосування комплексу сучасних фізичних методів і технічних засобів. Саме навчальна дисципліна «Техніка фізичного експерименту» спрямована для вирішення цих завдань при підготовці фахівців за напрямком 6.040203 «Фізика». Через зростаючий пріоритет вакуумних і оптичних технологій програма дисципліни складається із двох навчальних модулів: «Вакуумна техніка» і «Спектральні прилади та їх застосування».

Передній край сучасної науки та сучасні технологічні процеси, розробка нових, більш передових, наукомістких з високим рівнем доданої вартості, тісно пов'язані із створенням і підтримкою вакууму як ідеально чистого середовища. За останні роки збільшується обсяг спеціальної літератури, у т.ч. кількість україномовних посібників з основ вакуумної техніки [1-5], які відбивають сьогоденний рівень знань у цій галузі, але в основному зорієнтовані на майбутніх спеціалістів в галузі електрофізичного вакуумного обладнання або на фізиків-дослідників, в діяльності яких вакуумні умови відіграють переважну роль. Проте у всіх розвинутих країнах відчувається необхідність в глибоких знаннях теоретичних і прикладних основ вакуумної техніки не лише вузькими спеціалістами, а й майбутніми виробничниками, науковцями і вчителями.

Мета пропонованого посібника «Вакуумна техніка» підвищити якість підготовки студентів-фізиків до виконання науково-дослідних, кваліфікаційних та дипломних робіт, де вакуумна техніка є засобом, який використовується експериментатором для забезпечення відповідного середовища. В посібнику розглянуто конструкції і характеристики вакуумних насосів, аналітичного обладнання, більшість з яких використовуються в наукових лабораторіях фізичного факультету Ужгородського Національного Університету та інших провідних закладах, де студенти проходять практику. Неможливо сподіватись на успішне проведення фізичного експерименту із застосуванням вакуумного обладнання без знань теорії та розуміння явищ і закономірностей, що лежать в основі роботи різних засобів отримання низьких тисків і способів їх аналізу. Тому основна увага приділена опису фізичних явищ і процесів, які визначають різноманітність способів одержання і вимірювання вакууму.

Перший розділ присвячено теоретичним основам вакуумної техніки. В р.2-4 описано типи, будову й принципи дії насосів для створення низького, середнього, високого й надвисокого вакууму. В р.5 приводяться способи і засоби вимірювання тиску залишкових газів. При викладені матеріалу прийнята єдина схема: фізика процесів, конструкції і характеристики приладів, переваги і недоліки, область застосування, сучасні досягнення. В р.6 приводяться властивості матеріалів для вакуумної техніки, описано деякі компоненти вакуумних систем, зокрема пастки, вакуумні з'єднання, викладено принципи течешукання та приведено графічні позначення елементів вакуумної техніки. Орієнтацією засвоєння матеріалу слугують тестові завдання до кожного розділу.

Оскільки програма курсу передбачає вивчення широкого кола питань, то через обмежений обсяг годин розглянуті лише ті питання, які сприяють розумінню принципів організації та проведення фізичного експерименту із застосуванням вакуумної техніки, дають можливість скласти правильне уявлення про сучасний рівень цієї галузі техніки, розширити фаховий кругозір студентів-фізиків. Зокрема, поза межі курсу винесені розрахунки основних характеристик вакуумних систем (методики проектувальних і перевірочних розрахунків вакуумних систем можна знайти в [5-9]). Ми сподіваємось, що посібник буде корисний студентам, науковим робітникам неспеціалістам з вакуумної техніки, які за допомогою фахової літератури зорієнтуються у виборі методів і апаратного оснащення при вирішенні наукових і виробничих задач, де створення і використання вакууму грає або визначальну роль, або є необхідною умовою їх вирішення, з урахуванням технології, економічної ефективності, конструкторського рішення тощо.

ВСТУП

ЕКСПЕРИМЕНТ ЯК СКЛАДОВА ЧАСТИНА ПРОЦЕСУ ПІЗНАННЯ

Людині притаманний інтерес до навколишнього світу. Справді, з різних джерел ми багато чого знаємо. Наприклад, що Земля не плоска, як ми начебто бачимо навкруги, а куляста з радіусом близько 6,5 тис. км. На іншому "кінці" розмірів ніколи не бачені безпосередньо людиною ядра атомів, які, як нам відомо, складаються з протонів і нейтронів, а їх радіус складає мізерну, з побутової точки зору, величину 10^{-13} см. Гравітаційна або кулонівська взаємодії згасають обернено пропорційно квадрату відстаней між тілами або зарядами. В нашій Галактиці приблизно $2 \cdot 10^{11}$ зірок, а температура на поверхні Сонця оцінюється в 6000°C . Ці прості відомості є лише малою частиною тисяч інших, причому абсолютно різних. А всі вони разом утворюють упорядковану, для розуміючих їх, мозаїку, що зветься *фізичною картиною світу*. Але нескінченна різноманітність спостережуваних і принципово дозволених для реалізації природних і штучних ефектів базується на скінченній і досить невеликій кількості основоположних принципів, які називаються *законами*. У цьому й полягає гармонія навколишньої природи. Закон визначає загальні, суттєві, стійкі і повторювані зв'язки між явищами або властивостями об'єктів. Ці закономірні зв'язки існують у самій природі, людина здатна лише їх пізнавати і надалі використовувати у своїй практичній діяльності. Закони природи об'єктивні. Основне завдання фізики і тепер не змінилося – побудувати єдину теорію, яка б в ідеалі містила фундаментальні рівняння, що описують усі відомі факти, і правильно передбачала б нові.

Постає питання: а звідки ми це знаємо і чому так упевнені, що все відбувається саме так, як стверджує фізика? Скажімо, що в ядрі гелію два протони і два нейтрони, що Земля за формою подібна кулі, що рівняння Максвелла описують електромагнітні хвилі і багато чого ще. Кожний відповість – з *експериментів*, які люди давно почали проводити, відмовившись від простого споглядання явищ і замінивши їх спеціально поставленими, свідомими лабораторними дослідженнями. *Експеримент* з латинської – *дослід, проба*. Вже давно людство дійшло висновку, що пізнання природи можна і треба робити за схемою:

спостережуване явище → можливе пояснення → висновки і передбачення → лабораторний експеримент → повна теорія.

Фізика – природнича наука. Природу можна пізнавати лише дослідно, а тому фізика – наука експериментальна. Основою будь-якої науки є її теорії. Фізичні теорії ґрунтуються на фундаментальних фізичних експериментах. Здавалося б, усе просто, і ланцюжок послідовних дій зрозумілий і виконуваний. Але так здається лише на перший погляд, і є приклади, коли час від початку до кінця вивчення певної проблеми забирав століття. Найвідоміший – загальний устрій Всесвіту, схему якого деякі мислителі почали пропонувати задовго до нової ери літочислення, відколи стала панівною Птолемеєва або геоцентрична система. За нею, центром світу була

нерухома планета Земля, а навколо неї "літали" Сонце та інші планети. Але під натиском подальших спостережень виникали серйозні складнощі, коли передбачення про положення небесних тіл на сферично подібному небосхилі не узгоджувалися зі спостереженнями. Саме це змусило М.Коперника у середині XVI ст. відмовитись від геоцентричної моделі і висунути принципово іншу – геліоцентричну. В її становленні вирішальну роль зіграв саме експеримент.

Експеримент - це метод вивчення об'єкта, який пов'язаний з активним і цілеспрямованим втручанням дослідника в природні умови існування предметів і явищ або створенням штучних умов, необхідних для виявлення його відповідної властивості. Експеримент, зазвичай, проводиться за допомогою відповідних приладів та установок (спеціального обладнання). Він лежить в основі експериментального методу пізнання, за допомогою якого в контрольованих і керованих умовах досліджуються явища об'єктивної дійсності. Експеримент, як одна з форм практики є основою фізичних теорій, виконує функцію критерію істинності наукового пізнання. Прикладом сказаного є дослідження за допомогою великого адронного колайдера. Основною метою його будівництва було уточнення або спростування Стандартної моделі - теоретичної конструкції у фізиці, яка описує елементарні частинки і три з чотирьох фундаментальних взаємодій: сильну, слабку і електромагнітну, за винятком гравітаційної. Формування Стандартної моделі було завершено в 1960-1970-х роках, і всі зроблені з тих пір відкриття, на думку вчених, описувалися природними розширеннями цієї теорії. При цьому Стандартна модель пояснювала, яким чином взаємодіють елементарні частинки, але не відповідала на питання, чому саме так, а не інакше. У липні 2012 р. було оголошено про виявлення за допомогою колайдера частки, яка з високою ймовірністю представляла собою бозон Хіггса - його існування підтверджувало правильність Стандартної моделі будови речовини від найпростіших фундаментальних частинок до Всесвіту.

За роки розвитку фізики було проведено багато експериментів. З загальних курсів фізики можна уявити їх кількість. Але серед них завжди є *experimentum cricis* (лат.) – *вирішальні, фундаментальні*, постановка яких дала відповіді на глибинні питання свого часу. Залежно від наукової та технічної значущості їх ролі для розвитку науки дані експерименти можна умовно розділити на п'ять груп, три з яких безпосередньо торкаються базової науки, а дві – прикладних областей науки і техніки.

1. *Експерименти, які стали емпіричним базисом у виявленні фізичних законів і становленні наукових теорій.* У механіці, наприклад, такі експерименти проводив Г. Галілей, з молекулярної фізики – Р.Бойль, Е.Маріотт, в електродинаміці – Ш.Кулон, Г.Ом, Х. Ерстед, А.-М. Ампер, у квантовій фізиці – Дж. Томсон, О.Столетов, А.Беккерель, Е.Резерфорд. Відкриття радіоактивності солей урану А.Беккерелем в 1895 р. було початком створення теорії будови атомного ядра. Такі експерименти, проведення яких призводить до створення нових теорій, складають фундамент фізичної теорії, і

тому логічно їх назвати *фундаментальними*. Сюди ж можна віднести досліди, що підтвердили вже створені фізичні теорії, що стали експериментальною перевіркою істинності законів. Такі експерименти відіграють суттєву, вирішальну роль в подальшому розвитку науки. Наприклад, досліди А.Майкельсона і Е.Морлі остаточно довели неправомірність уявлень про світовий ефір; досліди Дж.Франка і Г.Герца - підтвердили дискретність атомних рівнів, досліди К.Девіссона і Л.Джермера - довели правомірність гіпотези де Бройля.

2. Експерименти, які дозволили виявити фізичні явища, що отримали в подальшому широке застосування у науці та техніці, побутовому житті. Це, наприклад, експерименти Л.Гальвані (електричний струм), Х.Ерстеда (магнітна дія струму), В.Рентгена (рентгенівське випромінювання) та ін.

Численна група історичних дослідів, в результаті яких люди дізнаються про нові фізичні явища, які або не помічали в процесі спостережень (оскільки фізичні явища рідко протікають незалежно одне від одного, а частіше виявляються нерозривно пов'язаними) або не могли спостерігати без спеціально створених для цього умов. Як приклад, відкриття броунівського руху в 1827 р. На перших порах це відкриття не вплинуло на розвиток молекулярно-кінетичної теорії, оскільки, ще довгий час багато вчених не визнавали молекулярно-кінетичної гіпотези. Лише після створення теорії броунівського руху А.Ейнштейном і М.Смолуховським в 1905 р. і проведення дослідів Ж.Перреном в 1908-1911 рр. молекулярно-кінетична теорія була визнана всією науковою громадськістю.

3. Експерименти, на основі яких були створені нові експериментальні методи: метод атомних і молекулярних пучків (О.Штерн), метод схрещених полів (Дж.Дж.Томсон), спектроскопічний метод (Р.Бунзен, Г.Кірхгоф), метод рентгеноструктурного аналізу (В.Рентген, М.Лауе), метод мічених атомів (І. та Ф.Жоліо-Кюрі), голографічний метод (Д.Габор, Ю.Денисюк, Е.Лейт) та ін. Дані методи знайшли застосування не лише у фізиці, але і в хімії, медицині, біології, техніці, сільському господарстві, тощо.

4. Експерименти, які лягли в основу промислового виробництва, найважливіших напрямків науково-технічного прогресу. Можна відмітити експерименти з електромагнітної індукції (електроенергетика), вимушене випромінювання (лазерна технологія), поділ важких ядер урану (ядерна енергетика) тощо. Наука не тільки живить вічне прагнення людства до пізнання, але і дає можливість застосовувати наукові знання для задоволення практичних потреб людини. Наука є основою технічного прогресу. Тому наукові експерименти не менш важливі для конструювання нових установок, які використовуються в подальших наукових дослідженнях, для створення нових матеріалів та для розробки способів технічного застосування уже відкритих фізичних явищ. Так створення просвічуючого (трансмісійного) електронного мікроскопа (нім. інженери М.Кноль та Е.Руска у 1931 р.) стало можливим завдяки завершенню ряду експериментальних досліджень у фізиці, а саме: 1) відкриття Дж.Томсоном у 1897 р. явища відхилення електронного

пучка магнітним та електричним полями; 2) визначення заряду та маси електрона Р.Міллікеном у 1913 р.; 3) встановлення залежності маси електрона від його швидкості, що було отримано В.Кауфманом у 1901 р., А.Ейнштейном у 1905 р. та Г.Лоренцом у 1916 р.; 4) відкриття дифракції повільних (К.Девіссон і Л.Джермер) та швидких (Дж.Томсон і А.Рейд) електронів у 1927 р.; 5) створення магнітної лінзи Х.Бушем у 1926 р.

5. *Експерименти, за допомогою яких були розраховані фізичні константи:* швидкість світла у вакуумі, гравітаційна стала, елементарний електричний заряд, число Авогадро, стала Планка тощо, які грають велику роль у фізиці. Вчені прагнуть з більшою точністю визначити значення цих особливих величин. Від їх значення іноді залежить “доля” теоретичних уявлень про важливі і складні явища. Класичним прикладом експериментів з даної групи є визначення значення гравітаційної постійної (Г.Кавендіш).

Однією з ознак експерименту є створення спеціальних умов, які дають можливість вивчати досліджуване явище і відтворювати його кожного разу при повторенні цих умов. Без сумніву розвиток фундаментальної та прикладної фізичної науки неможливий без створення вакуумних умов, тобто таких, при яких із певного об’єму і стінок, що його обмежують, а також із об’єктів всередині видалені гази. Хоча перший насос для отримання розрідження був створений в XVII ст., активне використання вакууму у експериментах почалося з кінця XIX ст., з відкриттям термодіфузії електронів і фотоефекту. Народження та розвиток атомної фізики і квантової механіки стимулював фізиків застосовувати вакуумне обладнання на шляху до правильного пізнання, правильних поглядів на світобудову і природу речей.

Пріоритетні напрямки сучасної фізики, а саме експериментальні дослідження фізики елементарних частинок, випаровування і конденсації, поверхневих явищ, теплових процесів, низьких температур, термоядерних реакцій, створення нано- і біоструктур нерозривно пов’язані з вакуумом.

Що стосується самої вакуумної техніки, то в даний час вона виділилася з фізики і стала самостійною дисципліною, яка вивчає фізико-хімічні процеси в газах за низьких тисків, питання отримання, збереження і вимірювання вакууму. Вакуумна техніка визначається як розділ фізичних наук і техніки, що забезпечує теоретичну і експериментальну базу для досліджень, здійснюваних в розрідженому газі або середовищі з низькою ентропією. При такому визначенні вакуумна техніка, як навчальна дисципліна, набула статусу міждисциплінарної.

1. ВИЗНАЧЕННЯ ВАКУУМУ ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1. Вакуум, його роль в науці і техніці

Слово “**вакуум**” у перекладі з латинської означає “пустота”, “порожнеча”. Розрізняють поняття фізичного і технічного вакууму.

Під *фізичним вакуумом* в сучасній фізиці розуміють простір, повністю позбавлений речовини. Це ідеалізована абстракція. Навіть якби вдалося отримати цей стан на практиці, він не був би абсолютною порожнечою.

Квантова теорія поля стверджує, що, у згоді з принципом невизначеності, у фізичному вакуумі постійно народжуються і зникають віртуальні частинки: відбуваються так звані нульові коливання полів. У деяких теоріях поля вакуум може володіти нетривіальними топологічними властивостями, а також в теорії можуть існувати різні вакууми, що розрізняються щільністю енергії тощо.

Технічним вакуумом або просто вакуумом називають стан газу за тиском нижче атмосферного. Ясно, що таких станів газу може бути багато, тому умовно вакуум поділяють на такі ступені: низький, середній, високий і надвисокий. Проблеми отримання і підтримки технічного вакууму, здійснення вакуумних вимірів, а також питання розроблення, конструювання і застосування вакуумних систем та їх функціональних елементів є предметом вивчення *вакуумної техніки (ВТ.)*

Фізичні дослідження та технологічні процеси проводяться у вакуумних умовах з двох основних причин: 1) забезпечення руху частинок і молекул, вільного від зіткнень з молекулами або атомами газів або іншими частками; 2) отримання дуже чистих поверхонь, вільних від адсорбованих газів (знегажена поверхня залишається чистою довше, чим вище вакуум).

Галузі використання вакуумної техніки. У сьогодення важко знайти таку галузь науки і техніки де не застосовувалися б досягнення вакуумної техніки. З кінця минулого сторіччя до наших днів головною сферою застосування ВТ залишається електронна техніка. В електронно-вакуумних приладах вакуум є конструктивним елементом і обов'язковою умовою функціонування пристроїв на протязі довгого часу. Низький і середній вакуум використовується у освітлювальних і газорозрядних приладах. Високий вакуум — у приймально-підсилюючих та генераторних лампах. Найбільш високі вимоги до вакууму пред'являються при виробництві електронно-променевих трубок та надвисокочастотних приладів. Для роботи напівпровідникових приладів наявність вакууму не потрібна, але в процесі їх виготовлення обов'язково застосовується ВТ. Широкого застосування ВТ набула при виготовленні мікросхем, де процеси нанесення тонких плівок, іонного травлення, електронної літографії забезпечують отримання елементів електронних схем субмікронного розміру. В останні роки розвиваються методи синтезу наноматеріалів, які можуть бути здійснені лише в умовах вакууму.

В енергетиці застосування ВТ, перш за все, пов'язано з проблемою керованого термоядерного синтезу. Усі теперішні проекти реакторів передбачають наявність вакуумної камери.

Дуже багато прикладів застосування вакуумної техніки у металургії, а саме у отриманні надчистих матеріалів. Виплавлення металів у вакуумних умовах звільняє їх від газів, які розчиненні в них. Завдяки цьому метали набувають високої механічної міцності, пластичності та в'язкості. Плавленням у вакуумі отримують без вуглецеві сорти сталі для електродвигунів, мідь високої електропровідності, магній, кальцій, тантал, платину, титан, цирконій, берилій, рідкісні метали та їх сплави. Спікання у вакуумі порошків тугоплавких металів (вольфрам і молібден) є одним з основних процесів у

порошковій металургії. Надчисті речовини виготовляються у вакуумних кристалізаційних установках. Штучні кристали алмазів, рубінів, сапфірів отримують із застосуванням ВТ.

Дифузійне зварювання у вакуумі дозволяє створити нероз'ємні герметичні з'єднання матеріалів із дуже різними температурами плавлення. Таким чином з'єднують кераміку з металом, сталь з алюмінієм тощо. Високоякісне з'єднання матеріалів з однорідними властивостями забезпечує променеве зварювання у вакуумі.

У хімічній промисловості використовують вакуумні сушильні апарати при виготовленні синтетичних волокон, поліамідів, амінопластів, поліетилену, органічних розчинників. Вакуум-фільтри використовуються при виробництві целюлози, паперу, мастил. У виробництві фарб і мінеральних добрив використовують вакуумні кристалізаційні апарати.

Вакуумні кристалізаційні та дистиляційні установки також використовуються для виробництва цукру, синтетичних гормонів, вітамінів, лікувальних сироваток і отримання багатьох цінних продуктів. Консервування харчових продуктів з збереженням їх смакових і поживних властивостей уже давно є сферою застосування ВТ. Отримання анатомічних і бактеріологічних препаратів неможливо без вакууму.

Не так давно з'явився новий термін — вакуумні та вакуумноплазмові технології. Спектр використання - від легкої промисловості (створення різноманітних покриттів), до оптичної (виготовлення дзеркал, фільтрів, лінз).

Природно значна роль належить ВТ у наукових дослідженнях. Без неї стає неможливим розвиток ядерної фізики, фізики плазми, матеріалознавства та інших галузей сучасної науки. З отриманням надвисокого вакууму в камерах імітації стало можливим вивчення різних аспектів поведінки космічних апаратів у земних умовах. Засоби вакуумної техніки в сучасній експериментальній фізиці забезпечують роботу електрофізичних приладів і установок, в яких здійснюється рух пучків заряджених частинок. Лише у надвисокому вакуумі можливі дослідження фізичних властивостей поверхонь твердих тіл, а також дослідження, що вимагають отримання газів високої чистоти. Вирішення багатьох складних проблем науки і техніки вимагає досягнення тиску 10^{-10} Па і нижче, а також контроль такого тиску. Для цього необхідні досконалі вимірювальні прилади, високочутливі методи перевірки герметичності і створення достатніх ущільнень в апаратурі для надвисокого вакууму, підготовка і очищення поверхонь відкачуваних об'ємів, яка виключає виділення цими поверхнями забруднювальних газів. Вакуум для фізиків дав майже все, що відомо про елементарні частинки і про поверхню твердого тіла. І дасть, напевно, ще багато потрібного і цікавого.

1.2. Історія вакуумної техніки

Вона починається з перших спроб людини отримати деяке розрідження газу. У першому сторіччі до н.е. з'явилися перші насоси, які були спроможні створювати невеличкі розрідження (шприц Герона, водяний насос Ктзебія). Але роботи по вивченню властивостей розрідження були заборонені

церковною владою. Наприклад, у рішенні Паризького Собору під головуванням абату Темп'є стверджувалося, що «порожнеча може бути створена тільки могутньою владою божою». До середини XVII сторіччя поняття «вакуум» використовувалося лише у філософії та теології. Давньогрецький філософ Демокрит вважав, що одним із «початків світу» є порожнеча. Пізніше Аристотель впроваджує поняття ефіру - невідчутного середовища, але спроможного передавати деякі фізичні впливи. Слід зауважити, що у цей час вакуум широко використовували у водопідйомних та пневматичних пристроях, але мабуть, цього на той час було досить.

Науковий етап у розвитку ВТ розпочав *Галілео Галілей*, який підрахував «силу боязні порожнечі» із факту неможливості підйому води на висоту більшу ніж 10 м незалежно від діаметра труби. У 1643 році учень Галілея *Еванджелісто Торрічеллі* відкрив, що атмосферне повітря створює тиск, який дорівнює тиску стовпа ртуті заввишки лише у 760 мм. Для отримання безповітряного простору Торрічеллі заповнив ртуттю тонку скляну трубку із запаяним кінцем, а потім опустил трубку відкритим кінцем униз в посудину, куди могла витекти ртуть. Як наслідок ртуть у трубці опустилася, а над нею утворився порожній простір. Простір над ртуттю, по уяві Торрічеллі, і був «абсолютною порожнечею». Тепер ми знаємо, що цей простір, заповнений паром ртуті, яка має при нормальній температурі тиск $1,6 \cdot 10^{-1}$ Па. Запропонований Торрічеллі принцип використовується у ртутних барометрах, оскільки рівень ртуті в трубці залишається таким, щоб зрівноважити атмосферний тиск.

Приблизно в цей же час *Отто Геріке* винайшов перший механічний повітряний насос (рис.1.1), та провів знаменитий дослід із Магдебурзькими півкулями (1650 р.).

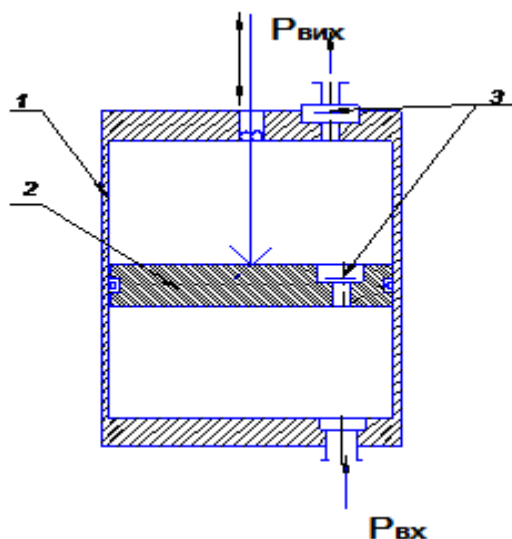


Рис.1.1. Перший (поршневий) вакуумний насос: 1-корпус; 2-поршень; 3-тарільчасті клапани.

Також Геріке вперше вияснив, що вакуум не проводить звуку і що горіння у ньому припиняється. Але слід зауважити, що до XIX сторіччя практичне використання вакууму обмежувалося лише пристроями для

відкачки води з колодязів. У XIX ст. була проведена низка досліджень, які заклали фізичний фундамент ВТ. Це, наприклад, дослід французького хіміка *Жана Батиста Дюма*, який досяг пониження тиску у посудині, заповнюючи її водяною парою, яку потім сконденсував охолодженням. Німецький хімік *Роберт Вільгельм Бунзен*, творець відомого «бунзенівського пальника», здійснив відкачку газу струменем рідини, яка швидко витікала. У 1850 р. *Август Теплер* винайшов ртутно-поршневий насос, у 1855 р. *Генріх Гайслер* отримав за допомогою ртутного насоса тиск 0,01 Торр, а у 1865 р. *Германн Шпренгель* створив насос, названий його іменем. Удосконалення конструкції насосів у середині XIX ст. відкрило шлях до створення вакуумних ламп. Але ці та інші досягнення вчених та інженерів були впроваджені лише у наукових дослідженнях, бо ще не існувало галузей виробництва, які б потребували використання ВТ.

У спеціальну дисципліну ВТ почала формуватися наприкінці XIX та на початку XX віків. У цей час винахід першої електричної лампи з вугільним електродом *О.Лодигінім* (1873 р.), відкриття термоелектронної емісії *Т.А.Едісоном* (1883 р.), відкриття *Г.Герцем* фотоелектричного ефекту не тільки збільшили знання у галузі використання розріджених газів, але призвели до стрімкого розвитку вакуумної техніки. На неї з'явилося соціальне замовлення. У 1884 році італієць *А.Малін'яні* вперше застосував у виробництві ламп накаливання зв'язування залишкових газів парою фосфору і тим самим поклав початок застосуванню різноманітних поглиначів, так званих *гетерів*. У 1904 році *Дж.Д'юар* розробив спосіб отримання вакууму шляхом поглинання газів активованим вугіллем, який охолоджувався рідким азотом (на цьому принципі побудовані сорбційні насоси).

Внесок у розвиток вакуумної техніки зробив *І.П.Пулюй*, оскільки вперше з'ясував роль сорбції газів у розряді: він виявив збільшення тиску за рахунок виділення газів електродами при збільшенні струму в розрядній трубці (принцип дегазації елементів вакуумної системи).

Історія розвитку механічних ("масляних") вакуумних насосів багато в чому зобов'язана німецькому інженеру *В.Геде*, який в 1911 році сконструював два типи механічних обертальних насосів (пластинчато-роторний і пластинчато-статорний). Ці пристрої стали великим кроком уперед. Вони дозволили отримувати граничний тиск біля 10^{-2} Па. Далі *В.Геде* розробив молекулярний (1912 р.) та ртутний дифузійний (1913 р.) насоси, які практично без істотних змін використовуються до теперішнього часу.

Паралельно з розробкою вакуумних насосів здійснювалося створення техніки вимірювання низького тиску. Вже у 1874 році *Г.Мак-Леодом* було розроблено компресійний манометр, який суттєво розширював нижню границю вимірювання тиску рідинними манометрами. У 1909 р. *М. Пірані* було створено тепловий, а у 1916 р. *О.Баклі* - іонізаційний манометри.

Успіхам розвитку ВТ сприяли чисельні теоретичні та експериментальні роботи. Особливо слід відзначити роботи, які проведені на початку XX сторіччя американськими вченими *І.Ленгмюром* та *С. Дешманом*, англійцем

Н.Кемпбелом і датським фізиком М.Кнудсенем. За радянських часів розвиток ВТ зв'язано з ім'ям академіка *С.Векишинського*, який організував в 1928 році у Ленінграді на електровакуумному заводі «Світлана» вакуумну лабораторію, а потім очолив науково-дослідний інститут у Москві.

Великий вклад в розвиток вакуумної техніки внесла група харківських учених під керівництвом *Б.Г.Лазарєва* та *К.Д.Синельникова*. Під керівництвом Лазарєва в 1945– 1950 рр. було створено перші в світі кріогенні насоси. Кріогенні насоси почали використовувати спочатку у наукових дослідженнях, а згодом у виробництві. Групою Синельникова в 1936–1941 рр. розроблені перші вітчизняні дифузійні паромасляні насоси.

Для отримання надвисокого вакууму винаходяться насоси, які працюють на інших фізичних принципах: турбомолекулярний (*В.Беккер*, 1958 р.), магніторозрядний (*Джепсен і Холанд*, 1959 р.). Надалі вдосконалюється техніка вимірювання низького тиску. Для цього почали використовувати аналізатори парціального тиску, за допомогою яких визначали не тільки тиск, а й склад та кількість кожної компоненти залишкового газу. Надвисоковакуумні системи вимагали для забезпечення їх надійного монтажу і експлуатації розробки чутливих методів визначення натікань у вакуумних системах. Були розроблені методи: мас-спектрометричний, галоїдний та ін. Для зниження газовиділення конструкційних матеріалів запропоновано прогрів усієї вакуумної установки.

Отже, до початку ХХ ст. ВТ використовувалася лише у наукових дослідженнях і тому її розвиток був повільним. Прискореними темпами вона почала розвиватися при появі відповідної потреби в промисловості. *Перший етап* розвитку ВТ започаткувало виробництво перших масових вакуумних приладів – електричних ламп. *Другий етап*, пов'язаний з початком ери електровакуумних приладів: електронних ламп, електронно-променевих трубок та ін. *Третій етап* обумовлений швидким розвитком мікроелектроніки. Активний розвиток високотехнологічних галузей сильно впливає на розвиток ВТ в наші дні. У червні 1958 р. у Бельгії відбувся перший Міжнародний конгрес із вакуумної техніки, рішенням якого було створення Міжнародної спільноти з вакуумної фізики і вакуумної техніки. Сьогодні вакуумна техніка постає відокремленою сферою людської діяльності, зі своєю академічною спільнотою, виробництвом, стандартами і ринками збуту вакуумної продукції і технологій, журналами, виставками та конференціями, термінологією тощо.

1.3. Теретичні основи вакуумної техніки

Стан газу, при якому його тиск нижчий від атмосферного, називається *вакуумом*. Будь-який стан газу характеризують тиском, температурою і об'ємом. Зміна будь-якого з цих параметрів відповідає новому стану газу.

Газ – це велика кількість молекул, які швидко і хаотично рухаються, постійно стикаючись одна з одною. Якщо газ не утримувати, то його молекули розлетяться. Гази, в яких не враховують іншу взаємодію між молекулами, ніж пружні зіткнення, називають ідеальними. Розріджені газы за своїми

властивостями практично не відрізняються від ідеального газу. Основні постулати, які використовуються у фізиці вакууму:

- існує сталий розподіл молекул за швидкостями, тобто одну й ту саму швидкість завжди має однакова кількість молекул;
- при русі молекул газу не існує ніяких переважних напрямків, тобто простір газових молекул ізотропний;
- температура газу є мірою середньої кінетичної енергії його молекул;
- при взаємодії з поверхнею твердого тіла молекула адсорбується.

З механіки відомо, що тиском називають відношення сили, яка діє перпендикулярно до поверхні, до значення площі цієї поверхні:

$$p = \frac{F}{S} . \quad (1.1)$$

Тиск газу на стінки посудини обумовлений ударами молекул. Чим більша кінетична енергія поступального руху кожної молекули, тим більша сила, яка виникає під час її удару об стінку. Крім того, чим більша концентрація молекул, тим частіше вони стикаються зі стінкою. Отже, тиск газу з позицій молекулярно-кінетичної теорії (МКТ) є середньою силою, яка внаслідок теплового руху передається ударами молекул газу за одиницю часу одиниці поверхні. Такий підхід дав можливість вивести основне рівняння МКТ (рівняння Больцмана) ідеального газу:

$$p = nkT, \quad (1.2)$$

де n – концентрація молекул; T – абсолютна температура газу; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана. Наслідком рівняння Больцмана є висновок, що молекулярна концентрація не залежить від природи газу. Другим наслідком є *закон Дальтона*: тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних (часткових)

тисків його компонент:

$$p = \sum_{i=1}^N p_i . \quad (1.3)$$

Одиницею тиску в СІ є Паскаль (Па), що чисельно дорівнює 1 Н/м^2 . На практиці використовують ще й інші одиниці тиску: технічна атмосфера (ат), фізична атмосфера (атм), міліметр ртутного стовпа (мм рт. ст. або Торр), бар. Вони пов'язані з Паскалем: $1 \text{ ат} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$; $1 \text{ атм} = 1,033 \text{ ат} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $1 \text{ мм рт. ст.} = 1 \text{ Торр} = 133 \text{ Па}$; $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$.

Наприклад, під тиском газу в 1 мм рт.ст. розуміється тиск, який створює стовпчик ртуті висотою 1 мм за умови, що густина ртуті дорівнює $\rho = 13595 \text{ кг/м}^3$, а прискорення вільного падіння $g = 9,80 \text{ м/с}^2$, тоді за формулою $p = \rho gh$ отримуємо рівність $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Н/м}^2$.

За означенням, вакууму відповідає тиск нижчий за 10^5 Па . Одержують такий вакуум за допомогою *вакуумних насосів*. При дуже малих тисках, які не можуть бути виміряні приладами, стан газу можна характеризувати кількістю молекул в одиниці об'єму - молекулярною концентрацією газу.

Нормальними умовами вважають тиск 10^5 Па і температуру 273 К . За цих умов 1 моль будь-якого газу займає об'єм $22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ (або 22,4 л), число молекул в одиниці об'єму становить $2,7 \cdot 10^{25} \text{ молекул/м}^3$ (*число Лошмідта*).

Відзначимо, що у ВТ доводиться мати справу не тільки з газами, але і з парою деяких речовин. Критерієм, за яким можемо судити, чи є речовина газом або парою, є його критична температура. *Критичною температурою* називається температура, вище якої речовина знаходиться тільки в газоподібному стані. Газом називається газоподібна речовина, якщо його температура вище критичної. Парою називається газоподібна речовина, якщо її температура нижче критичної. *Атмосферне повітря* - основна газова суміш, з якої має справу ВТ. Більшість складових повітря за нормальних умов є газами. При зниженні температури, наприклад до 77К (температура поверхні вакуумних уловлювачів, охолоджуваних азотом), значна частка складових повітря стає парою, і лише He, H₂ та Ne залишаються газами.

Газові закони. Якщо підставити в основне рівняння МКТ такі величини - $R=8,31$ Дж/моль К - універсальну газову сталу; m - маса газу; M -молярну масу, то отримаємо рівняння Менделєєва- Клапейрона:

$$pV = RT m/M. \quad (1.4)$$

Це рівняння стану ідеального газу і є першим наближенням до стану реального газу; воно добре описує реальні процеси, що відбуваються з газом при невеликих концентраціях речовини і досить високих температурах. Наслідком рівняння Менделєєва- Клапейрона є газові закони для ізопроцесів:

1. Ізотермічний процес відбувається при постійній температурі ($T = const$) і незмінній масі ($m = const$). У цьому випадку одержуємо рівняння ізотерми ідеального газу $pV=Const$. Це рівняння виражає *закон Бойля - Маріотта*.
2. Ізобарний процес здійснюється в системі при сталому тиску ($p = const$) і незмінній масі ($m=const$). Рівняння ізобари виражає *закон Гей-Люссака*, що має вигляд $V = Const \cdot T$
3. Ізохорний процес відбувається при сталому об'ємі ($V = const$) і незмінній масі ($m=const$). Експериментально було встановлено *закон Шарля*: $p = Const \cdot T$

Тиск атмосферного повітря суттєво залежить від висоти над рівнем моря. Ця залежність виражається *барометричною формулою*

$$p = p_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}, \quad (1.5)$$

де p - тиск на висоті h ; p_0 -тиск на поверхні Землі; m -маса молекули газу; g - прискорення вільного падіння; k -стала Больцмана; T - температура, яку вважають незмінною. Із (1.5) випливає, що тиск зменшується з висотою тим швидше, чим важчий газ і чим нижча температура. Тиск повітря на рівні моря, яке визначається висотою стовпа ртуті в барометрі, складає в середньому 760 мм рт. ст. Це так званий атмосферний тиск. На висоті 200 км тиск має порядок 10^{-6} Торр, на висоті 600 км – 10^{-9} Торр, а в космічному просторі тиск газів, пари і різних частинок оцінюється в 10^{-14} - 10^{-15} Торр.

Середня довжина вільного пробігу молекул. Для оцінки вакуумних умов потрібно знати середню довжину вільного пробігу молекул. Молекули газу постійно зіштовхуються та безперервно змінюють напрямок свого руху й величину швидкості. Крім зіткнень зі стінками посудини, молекули газу при

своєму хаотичному тепловому русі зіштовхуються одна з одною. Тому шлях, що проходить молекула, являє собою просторову ламану лінію, прямолінійні ділянки якої відповідають вільному шляху молекули. Оскільки рух молекул хаотичний, то ці прямолінійні ділянки шляху не однакові. Проте, завдяки наявності певного закону розподілу, можна запровадити поняття про середню довжину вільного пробігу молекул газу (СДВП) – тобто відстань, що проходить молекула між двома послідовними зіткненнями з іншою молекулою (але не з стінками посудини).

Так як молекули реальних газів мають кінцевий розмір, то середня довжина вільного шляху молекули повинна, очевидно, залежати від цих розмірів, а також від концентрації (молекулярної концентрації) газу. З кінетичної теорії СДВП виражається формулою:

$$\lambda_c = \frac{v_{aui}}{\nu} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi n d_m^2 (1 + C/T)}, \quad (1.6)$$

де v_{aui} - середня арифметична швидкість молекул; ν – число зіткнень молекули за одиницю часу; d_m – діаметр молекули; C – постійна величина, яка називається постійною Сезерленда, і дорівнює температурі, при якій (за умови $n = const$) СДВП молекул зменшується вдвічі порівняно зі значенням, що відповідає нескінченно високій температурі. Також при $T = const$ СДВП обернено пропорційна тиску (впливає з (1.2)).

Як видно з (1.6) λ_c обернено пропорційна молекулярній концентрації та ефективному поперечному перерізу молекули πd_m^2 . Множником $(1+C/T)$, отриманим експериментально, враховується зменшення ефективного діаметру молекули при підвищенні температури газу, у зв'язку з чим, середня довжина вільного шляху збільшується з підвищенням температури газу.

Позначивши через λ_{273} СДВП при 0°C (273K) можна отримати значення λ для будь-якої температури, якщо відома довжина вільного шляху для 0°C :

$$\lambda_T = \frac{\lambda_{273}(273+C)T}{(T+C)273}. \quad (1.7)$$

Значення λ_{273} і C – табличні (табл.1.1):

Табл.1.1.

Газ	λ_{273} (м) при 0°C та 760 мм рт. ст.	C
азот	$5.99 \cdot 10^{-8}$	102,7
аргон	$6.35 \cdot 10^{-8}$	147,8
водень	$11.23 \cdot 10^{-8}$	82,8
кисень	$6.47 \cdot 10^{-8}$	136
повітря	$6.08 \cdot 10^{-8}$	124

Ступені вакууму. Тепер, коли ми ввели поняття тиску та середньої довжини вільного пробігу можна ввести кількісні характеристики, що описують вакуум. Інтенсивність перебігу фізико-хімічних процесів у вакуумі залежить від співвідношення між числом зіткнень молекул газу зі стінками

посудини, що обмежують його, і числом взаємних зіткнень молекул. Тобто явища у газовому середовищі залежать від співвідношення між λ і d , де під d слід розуміти той характерний розмір посудини (об'єму), який відіграє *головну роль* в конкретному випадку, що розглядається.

Частота зіткнень між молекулами (згідно з (1.6)) обернено пропорційна середній довжині вільного пробігу i , відповідно, тиску. Зменшуючи тиск, можна досягти того моменту, коли λ стане порівняною, а потім і більше ніж характерна відстань d , наприклад, відстань між стінками посудини. Очевидно, що при $\lambda \gg d$ взаємні зіткнення між молекулами є зовсім незначними і тоді молекули по прямій лінії переміщуються від однієї стінки посудини до іншої. Зокрема, для труби безмежної довжини $d = D$, де D – діаметр труби; для двох нескінченних площин $d = 2D$, де D – відстань між площинами, а для сфери $d = 2/3D$, де D – діаметр сфери. В двохелектродній лампі d -це відстань між анодом і катодом.

У вакуумній техніці розрізняють три основні ступені вакууму:

1. $\lambda \ll d$, тобто СДВП молекул значно менше характерного розміру. У цьому випадку має місце низький вакуум. При цьому обмін енергією відбувається виключно між найближчими молекулами. Такі умови проявляються у вигляді в'язкості газу, а відповідні процеси називаються в'язкісними.
2. $\lambda \approx d$, тобто довжина вільного шляху молекули газу порівнянна з характерним розміром. У цьому випадку має місце середній вакуум і зіткнення молекул зі стінками і між собою рівновірогідні.
3. $\lambda \gg d$, тобто СДВП молекули перевищує характерний розмір. У цьому випадку має місце високий вакуум. Відстань d молекула долає без зіткнень.

Існує ще і четверта ступінь вакууму – надвисокий вакуум. В області високого та надвисокого вакууму середня довжина вільного шляху молекул багато більше розмірів вакуумного об'єму, і молекули переважно стикаються зі стінками посудини. У цьому випадку кожна молекула виступає індивідуально, а процеси у відповідних газах називається *молекулярними*.

Умови, в яких знаходиться газ визначають за відношенням $K_n = \lambda/d$, яке називається *критерієм Кнудсена*. Це співвідношення отримують із порівняння частоти зіткнення між молекулами газу з частотою зіткнення молекул газу зі стінкою. Якщо позначити через ν_M частоту зіткнень між молекулами газу, то, очевидно, вона дорівнює $\nu_M = v/\lambda$, де v – швидкість молекул, λ – середня довжина вільного шляху. Легко показати, що ν_C – частота зіткнень молекул із стінкою дорівнює $\nu_C = v/d$. Тоді $K_n = \nu_C/\nu_M = \lambda/d$. Відповідно, стан газу при низькому вакуумі буде мати місце, коли $K_n \ll 1$ ($\lambda_c < 47$ мкм), для середнього – $K_n \approx 1$ (47 мкм $< \lambda_c < 50$ мм), для високого – $K_n > 1$ (50 мм $< \lambda_c < 0,5$ км), для надвисокого – $K_n \gg 1$ ($0,5$ км $< \lambda_c \sim 50$ км).

Очевидно, що ступінь вакууму поняття відносне. Одному тиску можуть відповідати різноманітні ступені вакууму (в залежності від співвідношення λ/d). Наприклад, якщо газ проникає в посудину, лінійні розміри якої менше $6 \cdot 10^{-8}$ м, то в цій посудині газ навіть при атмосферному тиску буде поводитися, як при високому вакуумі (такий випадок реалізується коли газ проникає в пори

твердого тіла – цеоліти, активоване вугілля, силікагель).

Справедливо і наступне міркування: чим більше геометричні розміри посудини, у якій знаходиться газ, тим при більш низькому тиску настає стан високого вакууму. Можна зазначити приблизні чисельні значення тисків, які відповідають різноманітним ступеням вакууму, які приведено в таблиці 1.2.

Табл.1.2.

ступінь вакууму	низький	середній	високий	надвисокий
Па	$10^5 - 10^2$	100 - 0,1	$0,1 - 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
мм рт. ст.	> 1	$1 \dots 10^{-3}$	$10^{-3} \dots 10^{-7}$	10^{-7}

1.4. Явища переносу

Газ – як ціле може перетікати з одної частини простору до іншої, якщо характерні параметри газу в цих частинах відрізняються за величиною. Але і в самому газі можуть виникати відповідні явища, якщо в різних місцях посудини, де знаходиться газ, характерні параметри газу відрізняються за величиною. До явищ переносу відносяться такі властивості газів, як дифузія (перенос маси газу), теплопровідність (перенос тепла, тобто перенос енергії теплового руху молекул газу) і в'язкість або внутрішнє тертя (перенос кількості руху молекул газу). Усі ці явища істотно залежать від ступені вакууму, тобто від співвідношення λ / d .

Теплопровідність газів. Закон Фур'є. Якщо в газі створити області з різною температурою, тобто нагріти якусь окрему частину об'єму і більше не підтримувати нагрівання, то з часом у всьому об'ємі температура підвищиться і вирівняється до однієї у будь-якій області. Тепло від області з більшою температурою буде переходити до області з меншою температурою доти, поки температура не вирівняється. Даний процес здійснюється завдяки хаотичному руху молекул газу і є нестационарним. Якщо різниця температур постійно підтримується, то і перенос тепла буде відбуватися постійно, і такий процес називають стаціонарним.

Розглянемо стаціонарний процес переносу тепла в газі, що знаходиться між двома паралельними пластинами з різними температурами і будемо вважати, що тепло переноситься тільки уздовж осі x . Здатність газу переносити теплоту називається теплопровідністю газу. Кількість теплоти, яка переноситься газом за час Δt через поверхню ΔS , тобто потік тепла Q , визначається за законом Фур'є

$$Q = - \chi \frac{dT}{dx} \Delta S \cdot \Delta t, \quad (1.8)$$

де $\frac{dT}{dx}$ – градієнт температури в напрямі, перпендикулярному до поверхні ΔS , χ – коефіцієнт теплопровідності газу ($[\chi] = \text{Вт}/(\text{м К})$). Знак “мінус” показує, що теплота переноситься до області з меншою температурою.

За молекулярно-кінетичною теорією

$$\chi = \frac{1}{3} \rho \cdot v_{ca} \lambda_c c_V, \quad (1.9)$$

де ρ – густина газу ($\rho = m \cdot n$) а c_V – питома теплопровідність газу при постійному об'ємі, яка зв'язана з молярною теплопровідністю як $C_V = \mu \cdot c_V$.

Оскільки густина газу пропорційна тиску – $\rho \sim p$ (більше носіїв тепла), а з другого боку середня довжина вільного пробігу обернено пропорційна тиску – $\lambda_c \sim 1/p$ (більше тепла втрачається через зіткнення із зустрічними молекулами), то можна зробити висновок, що теплопровідність газу не залежить від його тиску. Це дійсно так, але для низького вакууму. При високому вакуумі число взаємних зіткнень молекул значно менше, ніж число зіткнень зі стінкою ємності, де знаходиться газ, тому втрати тепла нагрітого тіла розміщеного в газі, будуть незначним. Потік тепла між нагрітим і холодним тілами буде пропорційним тиску. При високому вакуумі теплопровідність зменшується пропорційно щільності речовини (тобто обернено пропорційно тиску в системі). Таким чином коефіцієнт теплопровідності вакууму тим ближче до нуля, чим глибше вакуум. Це пов'язано з низькою концентрацією у вакуумі матеріальних часток, здатних переносити тепло. Тим не менш, енергія у вакуумі передається за допомогою випромінювання. Тому, наприклад, для зменшення тепловтрат стінки термоса роблять подвійними та сріблять (така поверхня краще відбиває випромінювання), а повітря між ними відкачують.

Дифузія. Уявимо собі замкнений об'єм, поділений на дві частини непроникною перегородкою. Нехай в обох частинах цього обсягу при одному і тому ж тиску знаходяться два різних газу. Якщо перегородку прибрати, то внаслідок теплового руху молекул обидва газу будуть проникати (дифундувати) один в інший, так що врешті-решт утвориться суміш газів з однаковою концентрацією молекул обох газів у всьому обсязі.

Закон Фіка стверджує, що дифузійний потік маси газу пропорційний градієнту густини і протікає в протилежному градієнту напрямку. Коефіцієнт

дифузії
$$D = \frac{1}{3} \lambda_c v_{ca} \text{ [м}^2 \text{ с}^{-1}\text{]}, \quad (1.10)$$

обернено пропорційний тиску (оскільки $\lambda \sim 1/p$) і прямо пропорційний квадратному кореню з температури газу ($v_{ca} \sim \sqrt{T/\mu}$). D ще називають коефіцієнтом самодифузії, якщо дифузія відбувається в одному і тому ж газі.

Так як шлях, що проходить молекула при тепловому русі, складається з дуже великого числа відрізків між зіткненнями з іншими молекулами, то швидкість дифузії залежить від числа зіткнень між молекулами. Тому в умовах низького вакууму ($\lambda \ll d$) швидкість дифузії залежить від тиску газу і швидкості молекул. Чим вище тиск (або щільність газу) і чим нижче швидкість молекул (або температура газу), тим менше швидкість дифузії.

При високому вакуумі ($\lambda \gg d$) дифузія відбувається практично миттєво. Вона залежить лише від швидкості теплового руху та розмірів посудини, а не від СДВП.

Також важливо, що легший газ швидше дифундує за важчий. Це використовується при конструюванні дифузійних насосів.

В'язкість газів – це властивість, яке показує, що в газі є внутрішнє тертя. В'язкість проявляється у вирівнюванні швидкостей руху різних шарів газу. Сила тертя або імпульс, що переноситься, наприклад уздовж осі x за одиницю часу через одиницю поверхні, перпендикулярної до осі x , пропорційні градієнту швидкості:

$$F = -\eta \frac{dv}{dx}, \quad (1.11)$$

де η - коефіцієнт внутрішнього тертя, або ще його називають коефіцієнтом динамічної в'язкості, і є тангенціальною силою, що діє на одиницю площі в шарі газу, якщо зменшення швидкості в цьому напрямі дорівнює одиниці (тобто градієнт швидкості дорівнює одиниці), v - швидкість переміщення газу. Знак “мінус” показує, що перенесення імпульсу відбувається до області, де менша швидкість газу.

З причини внутрішнього тертя для забезпечення протікання газу через трубопровід необхідна різниця тисків, причому, чим більший коефіцієнт внутрішнього тертя, тим більшою має бути ця різниця.

В'язкість газів використовуються для вимірювання тиску в області середнього та високого вакууму. Однак в'язкісні вакуумметри не набули широкого поширення через тривалість реєстрації тиску. Набагато ширше в'язкість газів використовується в техніці отримання вакууму. На цьому принципі працюють струменеві, ежекторні насоси для отримання вакууму.

Режими течії газу. Маса газу, що знаходиться в даному об'ємі, незалежно від безперервного руху його молекул залишається нерухомою. Але газ, як ціле, можна переміщати. Наприклад, при течії через трубопровід маса газу переміщується відносно стінок. Течія газу відбувається за дії різних сил, а тому в залежності від параметрів газу і конструктивних розмірів вакуумпроводу має різний вид.

У вакуумній техніці описання течії газу поділяють на три режими залежно від величини числа Кнудсена. За великим тиском, коли середня довжина вільного пробігу молекул мала в порівнянні з діаметром трубопроводу (число Кнудсена мале), характер течії буде визначатися взаємодією між молекулами і газ можна розглядати як суцільне в'язке середовище, тому таку течію називають в'язкісною, а режим течії газу – *в'язкісним*. Число Кнудсена відповідає нерівності $K_n < 0,005$. Тобто у в'язкісному режимі течії середня довжина вільного пробігу молекул приблизно у тисячу разів менша за діаметр вакуумпроводу

За низьких тисків середня довжина вільного пробігу молекул велика в порівнянні з діаметром трубопроводу (число Кнудсена велике) і течію газу визначають взаємодією молекул зі стінками, тобто впливом стінок на вільний рух молекул. Вони рідко стикаються між собою і кожна молекула рухається незалежно від інших. Такий режим течії газу називають *молекулярним*. Число Кнудсена відповідає нерівності $K_n > 1,5$.

В обох режимах масова витрата газу пропорційна різниці тисків і обернено пропорційна довжині трубки. Відмінності між режимами :

- а) за в'язкісного режиму потік газу пропорційний радіусу трубки у четвертому степені, тоді як за молекулярного режиму – у третьому степені;
- б) залежність від середнього тиску спостерігається тільки за в'язкісного режиму, тобто потік газу за молекулярного режиму не залежить від середнього тиску в трубопроводі;
- в) залежність від молекулярної маси і температури газу більша за в'язкісного режиму, ніж за молекулярного.

Перехідний проміжок між в'язкісним і молекулярним режимом характеризується проміжними значеннями числа Кнудсена, при цьому обидва типи зіткнень впливають на характер течії, тому і режим називають *молекулярно - в'язкісним* ($0,005 < K_n < 1,5$).

Тестові завдання до розділу 1.

1. Вакуумна техніка вивчає проблеми створення і підтримки:
 - 1 – фізичного вакууму; 2 – технічного вакууму; 3 – абсолютного вакууму.
2. Визначення вакууму:
 - 1 – це пустота;
 - 2 – це стан газу, коли тиск менший від критичного значення;
 - 3 – це стан газу, тиск якого нижче атмосферного.
3. Вакуум – це:
 - 1 – стан газу; 2 – уявна реальність; 3 – відсутність повітря.
4. Чому фізичні дослідження та технологічні процеси проводяться у вакуумних умовах?
 - 1 – здешевлення досліджень;
 - 2 – забезпечення вільного руху частинок;
 - 3 – збільшення ресурсу устаткування.
5. Композитні елементи мікро і нанотехнологій виготовлять у вакуумі через:
 - 1 – збільшення швидкості напilenня шарів;
 - 2 – значне здешевлення технологічних процесів;
 - 3 – отримання більш чистої поверхні.
6. Вакуум високий у разі, коли:
 - 1 – вакуумпровід короткий; 2 – тиск низький;
 - 3 – насос потужний; 4 – тиск високий.
7. Класифікація вакууму:
 - 1 – низький, середній і високий;
 - 2 – більш високий ніж атмосферний, середній і надвисокий;
 - 3 – низький, середній, високий і надвисокий.
8. Вакуум вимірюється в:
 - 1 – $\text{м}^3/\text{с}$; 2 – $\text{кг}/\text{год}$; 3 – Па; 4 – Н/м.
9. Зв'язок між одиницями Па та Торр:
 - 1 – $1 \text{ Торр} = 133,3 \text{ Па}$; 2 – $1 \text{ Па} = 133,3 \text{ Торр}$; 3 – $1 \text{ Па} = 10^{-2} \text{ Торр}$.
10. Виберіть правильне співвідношення:
 - 1 – $1 \text{ Па} \approx 100 \text{ мм рт. ст.}$; 2 – $1 \text{ мм рт. ст.} \approx 100 \text{ Па}$; 3 – $1 \text{ ат} \approx 100 \text{ мм рт. ст.}$; 4 – $1 \text{ ат} \approx 1 \text{ Па}$.
11. Який тиск відповідає нормальним умовам:
 - 1 – 1 Па ; 2 – 10^5 Па ; 3 – 10^{-5} Па .
12. Який процес описує закон Бойля – Маріотта?
 - 1 – ізобарний; 2 – ізохорний; 3 – ізотермічний; 4 – всі названі.

13. Основне рівняння молекулярно-кінетичною теорії:

$$1 - p = p_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}; \quad 2 - pV = \frac{M}{\mu} RT; \quad 3 - p = nkT.$$

14. Як залежить від температури тиск ідеального газу?

1 – $P \sim T^{-1}$; 2 – $P \sim T^2$; 3 – $P \sim T$.

15. Які закони не можуть бути застосовані до насичених парів?

1 - Дальтона; 2 - Гей-Люссака; 3 - Шарля.

16. Азот має критичну температуру -147°C . Якщо азот матиме температуру вищу за -147°C , то він завжди буде:

1 – твердим тілом; 2 – газом; 3 – парою.

17. Які параметри визначають ступені вакууму?

1 – середня довжина вільного пробігу молекул; 2 – об'єм газу; 3- температура газу.

18. Вакуум низький, якщо:

1 - критерій Кнудсена $\ll 1$;

2 - критерій Кнудсена $= 1$;

3 - критерій Кнудсена $\gg 1$.

19. Діапазон тисків низького вакууму в одиницях Торр:

1- 10^{-2} - 10^{-5} ; 2 - 760 - 10^{-2} ; 3 - $<10^{-7}$.

20. Діапазон тисків високого вакууму в одиницях Торр:

1- 10^{-7} - 10^{-9} ; 2- 10^{-2} - 10^{-6} ; 3- 10^{-4} - 10^{-7} .

21. Який тиск розрідженого газу нижчий?

1 – 10^{-2} Н/м^2 ; 2 – 10 Торр; 3 – 10^{-5} бар.

22. Який вакуум називається надвисоким? Коли тиск газу:

1 – $P < 10^{-7}$ Торр; 2 – $P < 10^{-8}$ Торр; 3 – $P < 10^{-13}$ Торр.

23. Яким є тиск атмосфери у космосі на висоті 500 км і 1000 км?

1 – 10^{-8} і 10^{-11} Торр; 2 – 10^{-7} і 10^{-10} Торр; 3 – 10^{-10} і 10^{-13} Торр.

24. Яким є відношення середньої довжини вільного шляху молекул газу λ до максимальних лінійних розмірів вакуумної камери d для низького вакууму?

1 – $\lambda/d \ll 1$; 2 – $\lambda/d \approx 1$; 3 – $\lambda/d \gg 1$.

25. Яким є відношення середньої довжини вільного шляху молекул газу λ до максимальних лінійних розмірів вакуумної камери d для низького вакууму?

1 – $\lambda/d \ll 1$; 2 – $\lambda/d \approx 1$; 3 – $\lambda/d \gg 1$.

26. Яким є співвідношення середньої довжини вільного шляху молекул газу λ до максимальних лінійних розмірів вакуумної камери d у випадку середнього вакууму?

1 – $\lambda/d \ll 1$; 2 – $\lambda/d \approx 1$; 3 – $\lambda/d \gg 1$.

27. Середня довжина вільного пробігу молекул обернено пропорційна:

1 – тиску газу; 2 – об'єму; 3 – масі молекул, 4 – швидкості молекул.

28. Частота зіткнень молекул із стінкою прямо пропорційна:

1 – геометричним розмірам посудини; 2 – температурі; 3 – швидкості молекул.

29. Високий вакуум в мікроскопічних порах деяких кристалів досягається вже при атмосферному тиску, оскільки:

1 – діаметр пори є набагато меншим за довжину вільного пробігу молекули;

2 – діаметр пори є набагато більшим за довжину вільного пробігу молекули;

3 – діаметр пори є сумірним довжині вільного пробігу молекули.

30. Що визначає закон Фур'є ?

1 – кількість теплоти, яка переноситься газом;

2 – потік маси газу;

3 – перенос кількості руху молекул газу.

- 31.** Швидкість дифузії найбільша:
- 1 – при низькому вакуумі;
 - 2 – при високому вакуумі;
 - 3 – не залежить від ступеня вакууму.
- 32.** В'язкість газів використовуються для вимірювання тиску в області:
- 1 – надвисокого вакууму;
 - 2 – низького і середнього вакууму;
 - 3 – середнього і високого вакууму.
- 33.** Від чого залежить режими течії газу?
- 1 – від температури газу;
 - 2 – хімічного складу газу;
 - 3 – ступеня вакууму.
- 34.** Течія газу в умовах високого вакууму:
- 1 – молекулярна;
 - 2 – молекулярно-в'язкісна;
 - 3 – інерційно-в'язкісна.

2. ВАКУУМНІ НАСОСИ. СПОСОБИ ОДЕРЖАННЯ ПОПЕРЕДНЬОГО РОЗРІДЖЕННЯ

Основний шлях отримання вакууму - використання вакуумних насосів. Другий - використання пасток (п.6.1), які зазвичай служать для поліпшення вакууму, що створюється вакуумними насосами. *Вакуумним насосом* називають пристрій, що слугує для видалення газових молекул з будь-якого об'єму, тобто для відкачування газу. Деякі спеціальні вакуумні насоси призначені для перекачки газів з одного об'єму до іншого. Оскільки ступені вакууму дуже відрізняються за величиною тиску, то будова і принцип роботи насосів для отримання вакууму відповідного ступеня мають суттєві відмінності. Але головні параметри, що характеризують насоси, загальні.

2.1. Теоретичні основи процесу відкачування

Видалення газу, тобто відкачка здійснюється вакуумними насосами, що приєднуються за допомогою трубопроводів (вакуумпроводів) до приладу і разом з іншим необхідним устаткуванням складають вакуумну систему. Простіша вакуумна система для отримання вакууму (рис.2.1) складається не менше, ніж з трьох елементів: вакуумного насоса 1, вакуумпроводу - трубки 2, що з'єднує насос з вакуумною камерою 3 - об'ємом, що потребує відкачки. Вакуумний насос має впускний 4 і випускний 5 патрубков, через який газ видаляється в атмосферу. Зазначимо, що не всі насоси мають випускний клапан (фізико-хімічний принцип відкачки не потребує видалення газу).

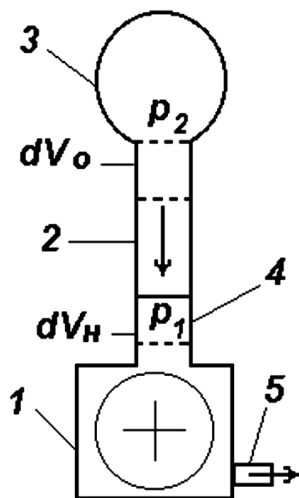


Рис.2.1. Схема найпростішої вакуумної системи.

До вмикання насоса газ у всій вакуумній системі знаходиться під одним тиском. При запуску насоса, робота якого складається з безперервного видалення газу з вакуумної системи через випускний патрубок до атмосфери, газ почне рухатися, безперервно потрапляючи з вакуумної камери до трубопроводу і з нього до насоса через впускний патрубок. В результаті кількість газу в системі буде безперервно зменшуватися. Оскільки V системи і T газу залишаються незмінними, то відповідно до (1.2) почне знижуватися тиск у вакуумній системі. Тиск біля входу в насос падає швидше, ніж в об'єкті,

який відкачується. Тобто створюється *рушійна різниця тисків* ($p_2 - p_1$), яка пов'язана з потоком газу Q провідністю трубопроводу U . Величина провідності залежить від режиму течії газу через трубопровід і його геометричних розмірів. *Провідністю елемента* вакуумної системи називається відношення кількості газу, що проходить через елемент за одиницю часу, до різниці тисків на його кінцях: $U = \frac{Q}{p_2 - p_1} \text{ [см}^3/\text{с]}$.

Для кількісної характеристики ступеня пониження тиску перед трубопроводом, тобто у вакуумній камері, а також після трубопроводу, тобто на впускному патрубку насоса використовують такі параметри, як *швидкодія відкачки об'єкта* (вакуумної камери) S_o і *швидкодія насоса* S_n .

Швидкодія насоса S_n визначається об'ємом газу, що відкачується насосом в одиницю часу при даному впускному тиску:

$$S_n = \left. \frac{dV_n}{dt} \right|_{p_1}. \quad (2.1)$$

Швидкодію відкачки об'єкта S_o визначають об'ємом газу, що потрапляє з вакуумної камери за одиницю часу до вакуумпроводу за тиском p_2 , що є в камері:

$$S_o = \left. \frac{dV_o}{dt} \right|_{p_2}. \quad (2.2)$$

Якщо виникає необхідність визначення швидкості відкачки газу за тиском p з системи в будь-якому поперечному перерізі вакуумпроводу, то вводять аналогічно величину

$$S = \left. \frac{dV}{dt} \right|_p, \quad (2.3)$$

що показує який об'єм газу, виміряний за тиском p , проходить через поперечний переріз вакуумпроводу за одиницю часу. Розмірність швидкості відкачки газу визначають в одиницях об'єму за одиницю часу: $\text{см}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{с}$, $\text{л}/\text{с}$.

Кількість газу, що проходить за одиницю часу через поперечний переріз вакуумпроводу, називають *потокм газу* в даному перерізі. Якщо в даному місці вакуумної системи тиск дорівнює p , а швидкість відкачки - S , то величина потоку газу в цьому місці:

$$pS = Q. \quad (2.4)$$

Потік газу вимірюється в одиницях $[pV/\text{с}]$. Якщо газ на впускному патрубку насоса має тиск p_1 , а швидкодія S_n , то потік газу, що проходить через впускний патрубок буде дорівнювати добутку $p_1 S_n$ і його називають *продуктивністю насоса* за впускним тиском.

Рушійна різниця тисків $p_2 - p_1$ виникає тому, що трубопровід надає опір потоку газу. По аналогії до закону Ома потік газу через переріз нерозгалуженого вакуумпроводу є сталим, якщо

$$pS = p_1 S_n = p_2 S_o = U(p_2 - p_1) = Q, \quad (2.5)$$

де U - пропускна здатність трубопроводу ($\sim$ аналогія з провідністю провідника). Це рівняння є умовою сталості газового потоку при відкачці вакуумної системи. З нього випливають важливі наслідки. Якщо відома величина потоку, то можливо визначити швидкість відкачки в будь-якому місці вакуумної системи за відомим тиском p в цьому місці

$$S = \frac{Q}{p}; \quad (2.6)$$

якщо відомий тиск на впускному патрубку насоса, то швидкість його дії за даним тиском дорівнюватиме $S_n = \frac{Q}{p_1}; \quad (2.7)$

якщо відомий тиск в камері відкачки, то швидкість відкачки об'єкта за даним тиском дорівнюватиме $S_o = \frac{Q}{p_2}. \quad (2.8)$

Наслідки з формул (2.6-2.8): коли насос приєднаний до об'єкта відкачки за допомогою вакуумпроводу, то швидкість відкачки об'єкта завжди менша швидкодії насоса ($S_n > S_o$), оскільки вакуумпровід здійснює опір відкачці ($p_1 < p_2$). Коли насос приєднаний безпосередньо до об'єкту, тобто $p_1 = p_2$, то $S_o = S_n$. Тоді швидкість відкачки об'єкта ще називають *ефективною швидкодією насоса* $S_{n,ef} = S_o$.

Швидкість відкачки об'єкта, провідність вакуумпроводу і швидкодія насоса змінюються відповідно до зміни тиску при відкачці вакуумної системи. Знайдемо залежність між цими величинами. Для цього визначимо з умови сталості потоку (2.5) швидкодію насоса і швидкість відкачки об'єкта через провідність вакуумпроводу і відповідні тиски:

$$S_n = U \frac{p_2 - p_1}{p_1}; \quad S_o = U \frac{p_2 - p_1}{p_2},$$

а потім виключимо з цих рівнянь величини тиску і отримаємо, що

$$\frac{1}{S_o} - \frac{1}{S_n} = \frac{1}{U}, \quad (2.9)$$

тобто $\frac{1}{S_o} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}$, або $S_o = \frac{S_n U}{S_n + U}. \quad (2.10)$

Отримане рівняння називають **головним рівнянням вакуумної техніки** і воно зв'язує швидкість відкачки об'єкта з швидкодією насоса і провідністю вакуумпроводу, що з'єднує насос з об'єктом відкачки. З рівняння (2.10) випливають наступні наслідки:

якщо провідність вакуумпроводу дуже велика, тобто $U \rightarrow \infty$, то $S_o \rightarrow S_n$;

якщо провідність вакуумпроводу дуже мала, тобто $U \rightarrow 0$, то $S_o \rightarrow 0$;

якщо $S_n = U$, то $S_o = 0,5 S_n$.

Для характеристики ефективності використання вакуумного насоса у ВТ вводять величину K , яка називається коефіцієнтом використання насоса:

$$K = \frac{S_o}{S_n}. \quad (2.11)$$

2.2. Основні параметри вакуумних насосів

Для ефективної і правильної експлуатації насосів необхідно знати їх головні параметри: *початковий тиск, швидкодію насоса, найбільший випускний тиск, граничний тиск, робочий тиск, продуктивність насоса.*

Початковим тиском насоса називають максимальний тиск на вхідному патрубку, при якому насос починає нормально працювати. Не всі насоси можуть починати роботу з атмосферного тиску; для деяких потрібне попереднє розрідження – "форвакуум". Початковий тиск ще називають *тиском запуску насоса* $P_{\text{зап}}$. Для більшості насосів він збігається з *найбільшим випускним тиском* $P_{\text{в}}$, - максимальним тиском випускного патрубку, при якому *ще* забезпечується нормальна робота насоса (паспортна швидкість відкачки). Якщо цей тиск перевищено, насоси припиняють роботу або можуть прийти в непридатність через окислення робочих деталей. Для відкачки об'єму треба видалити з нього молекули газу в оточуючу атмосферу, тобто перебороти протидію зовнішнього тиску. Деякі насоси можуть видаляти газ безпосередньо в атмосферу і їх називають *форвакуумними*, а інші не можуть створити протидію атмосферному тиску і для їхньої нормальної роботи створюють протитиск, який значно менший від атмосферного. Зазвичай такі насоси створюють високий вакуум, але не можуть працювати самостійно, тому вони приєднуються послідовно з форвакуумним. Усі прилади, в яких найбільший випускний тиск нижчий за атмосферний, повинні мати на виході форвакуумний насос, наприклад, насос об'ємної дії.

Параметри насосу показані на основній його характеристиці - залежності швидкодії від вхідного тиску (рис.2.2).

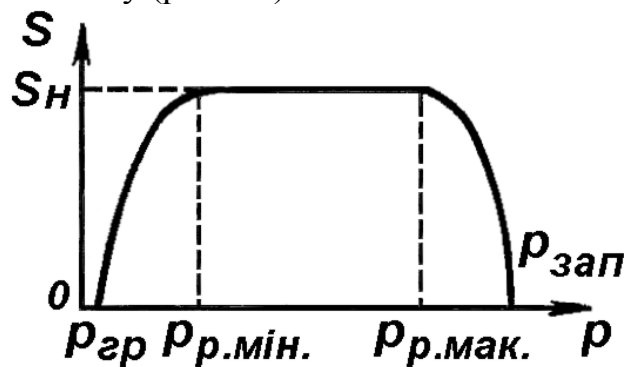


Рис.2.2. Залежність швидкодії вакуумного насоса від тиску.

Граничним тиском $P_{\text{гр}}$ називають *найменший тиск*, який може створити насос за тривалої роботи без навантаження. Неможливість безмежного пониження тиску обумовлена тим, що кожний реальний насос створює хоча б невелике натікання газів і пари на власний вхід (*обернений потік*). З пониженням тиску потік, що відкачується зменшується, а обернений потік є практично сталий. Тому настає момент коли ці потоки стають рівними і тиск на вході насоса перестає знижуватися. Це і є граничний або залишковий тиск,

тобто мінімальний тиск, створюваний насосом на входному патрубку при роботі «на себе» (при закритому впускному патрубку). Отже, при $P \rightarrow P_{cp}$ маємо, що $S_H \rightarrow 0$.

Робочий тиск насоса поділяють на найменший і найбільший. *Найменший робочий тиск* $P_{p.min}$ - це мінімальний тиск, за яким насос зберігає номінальну швидкість при тривалій роботі. Зазвичай, найменший робочий тиск приблизно на порядок більше граничного. Використання насоса для роботи при тисках між граничним та найменшим робочим економічно не вигідне через погіршення його питомих характеристик. *Найбільший робочий тиск* $P_{p.max}$ - це максимальний тиск, за яким насос зберігає номінальну (паспортну) швидкість при тривалій роботі. Він менший за тиск запуску і з економічних міркувань використання насоса найбільш вигідне при роботі в межах робочого тиску. Діапазон $P_{p.min} - P_{p.max}$ - це оптимальний діапазон робочих тисків насосу.

Швидкість насоса, як вже зазначалось, визначають завжди за відповідним тиском. Для значної частини насосів швидкість сильно залежить від тиску газу, що відкачується. Але існують насоси, швидкість яких незначно змінюється в області робочих тисків. Для них справедлива *формула Геде*, за допомогою якої можна розраховувати швидкість насоса за умови, що S_H майже не змінюється в інтервалі $(p_0 t_0) - (p_1 t_1)$:

$$S_H = \frac{V}{t_1 - t_0} \ln \frac{P_0}{P_1}. \quad (2.12)$$

Оскільки реальні насоси мають граничний тиск, що конструктивно обумовлений шкідливим простором і негерметичностями, то відлік тиску слід вести не від нуля, а від величини граничного тиску (рис.2.2). Тоді, після внесення поправки, формула (2.12) буде більш точнішою:

$$S_H = \frac{V}{t_1 - t_0} \ln \frac{P_0 - P_{cp}}{P_1 - P_{cp}}. \quad (2.13)$$

Обсяг газу, що видаляється, береться при тискові на вході біля впускного патрубку в розглянутий момент часу. Тиск в процесі відкачки поступово зменшується, то кількість газу, що відкачується насосом, прямо пропорційна $S_H P_{cp}$, безупинно зменшується.

Якщо перейдемо до експоненціальної функції, то отримаємо закон зменшення тиску в камері відкачки, що має об'єм V , за умови, що швидкість залишається сталою, а початковий тиск дорівнює p_0 :

$$P = (P_0 - P_{cp}) e^{-(S/V)t} + P_{cp}. \quad (2.14)$$

На рис.2.3 показана розрахована крива відкачки. Видно, що як би тривало не працював цей теоретичний насос, тиск на впускному патрубку його не зменшується до нуля, а наближається асимптотично до граничного.

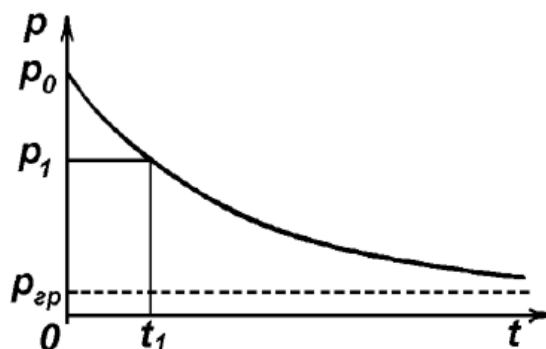


Рис.2.3. Зміна тиску від часу відкачки.

Існують два методи експериментального визначення швидкодії насоса: метод постійного об'єму і метод постійного тиску.

Метод постійного об'єму полягає в тому, що до насоса безпосередньо приєднують вакуумну камеру (рис.2.4(а)), об'єм якої V , і проводять відкачку при безперервному вимірюванні тиску манометром M для того, щоб побудувати криву відкачки, тобто залежність $p = f(t)$ (рис.2.3).

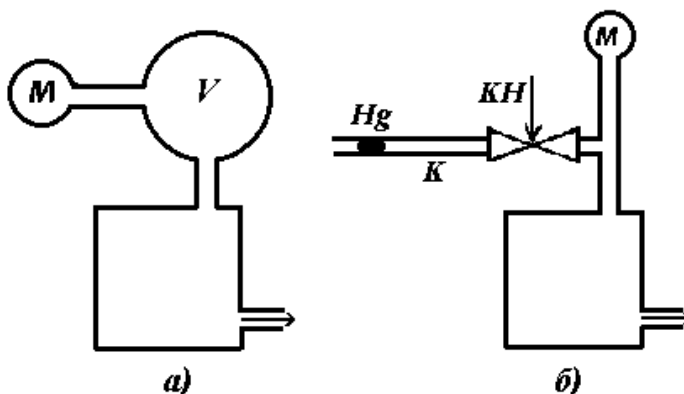


Рис.2.4. Методи визначення швидкодії насоса.

Метод постійного тиску полягає в тому, що до впускного патрубка насоса приєднують манометр M , а до нього через мікрометричний кран довгий скляний капіляр K , з відомим діаметром d . При працюючому насосі поступово регулюють мікрометричним краном (натікачем KH) газовий потік з атмосфери так, щоб встановився і залишався незмінним робочий тиск p , що покаже манометр M (рис.2.4(б)). Як тільки такий режим роботи стабілізується, у капіляр вводять краплю ртуті, і вимірюють проміжок часу t , за який крапля переміститься на певну довжину.

2.3. Класифікація вакуумних насосів

В основу отримання вакууму покладені два принципи: перший (механічний) – видалення газу з відкачуваної посудини за межі вакуумної системи, другий (фізико-хімічний) – зв'язування газу у вакуумній системі. Перший принцип реалізований у насосах із газовим переміщенням. Переміщення маси газу можна проводити періодично (окремими порціями) і безперервно. Для видалення порції газу необхідно ізолювати в робочій камері

насоса певний об'єм газу, перемістити його від вхідного патрубка насоса до вихідного, стиснути в процесі переміщення до тиску, більшого, ніж тиск у вихідному перерізі насоса, і виштовхнути газ за межі насоса. Вакуумні насоси, які відкачують газ окремими порціями в результаті періодичної зміни об'єму і положення робочої камери, називаються *об'ємними вакуумними насосами*. Об'ємними є лише механічні насоси, тобто такі, відкачування яких обумовлене переміщенням газу унаслідок механічного руху робочих частин насоса. Для безперервного видалення нейтральних молекул газу необхідно мати тіло, яке постійно захоплювало б і переміщало газ. Таким тілом може бути безперервно рухома тверда поверхня чи струмінь рідини, пари або газу. При зіткненні з рухомою твердою поверхнею і в результаті внутрішнього тертя молекули газу набувають переважного напрямку руху. Механічні насоси, відкачування яких базується на захопленні газу, що видаляється, безперервно рухомими твердими поверхнями, отримали назву *молекулярних*, оскільки рухомі деталі насоса впливають на окремі молекули.

Вакуумні насоси, в яких реалізується другий принцип, отримали назву *сорбційних* насосів. Газ у сорбційних насосах може зв'язуватися гетером (*гетер* — речовина, застосовувана для хемосорбції газів у вакуумних системах), а також сорбуватися (поглинатися) і конденсуватися на охолоджуваній поверхні. За Я.Грошковським насоси поділяються на дві основні групи: *проточні і сорбційні*. Перші видаляють газ з відкачуваного простору назовні, а другі - не видаляють газ із простору, який відкачується, але зв'язують його якимось чином усередині насосу. Проточні насоси мають вхід і вихід, а сорбційні - тільки вхід.

За класифікацією, що ґрунтується на використанні фізичних законів, покладених в основу роботи вакуумних насосів, їх поділяють на групи:

- насоси, робота яких ґрунтується на використанні закону Бойля–Маріотта (механічні насоси для об'ємного відкачування газів);
- насоси, робота яких базується на використанні явища внутрішнього тертя (деякі види струминних насосів);
- насоси, в яких використовується молекулярна течія газу - молекулярні (механічні та деякі види струминних насосів);
- насоси, принцип дії яких базується на явищі іонізації газів (іонні);
- насоси, дія яких базується на принципі фізико-хімічного зв'язування газів (іонно-сорбційні, магніторозрядні, сорбційні, конденсаційні (кріогенні)).

Залежно від ступеня отримання граничного вакууму є:

- форвакуумні насоси (10^5 – 10^2 Па);
- насоси середнього вакууму (10^2 – 10^{-1} Па);
- високовакуумні насоси (10^{-1} – 10^{-5} Па);
- надвисоковакуумні насоси ($P < 10^{-5}$ Па).

2.4.Об'ємне відкачування. Об'ємні насоси

Насоси, які працюють у діапазоні 760–1 Торр (10^5 – 10^2 Па) називають низьковакуумними або форвакуумними. До них належать об'ємні та деякі типи струминних і адсорбційних насосів. У процесі об'ємної відкачки

виконуються наступні операції: 1) всмоктування газу за рахунок розширення робочої камери насоса; 2) зменшення обсягу робочої камери і стиснення в ній газу; 3) видалення стисненого газу з робочої камери в атмосферу або насос попереднього розрідження. Залежно від конструктивної схеми об'ємні насоси діляться на поршневі, рідинно-кільцеві і ротаційні (обертальні).

Ротаційні насоси характеризується наявністю в їх конструкції пластин, які в одному типі насосів обертаються разом із ротором (пластинчато-роторні та багатопластинчаті насоси), а в іншому типі розміщені в статорі (пластинчато-статорні та золотникові (плунжерні) насоси).

2.4.1.Пластинчато-роторні насоси. Конструкція таких насосів (рис.2.5) містить циліндричний корпус 7 з впускним 4 і випускним 3 патрубками і ексцентрично розташований ротор 6, в пазах якого встановлені пластини 5. Під дією відцентрової сили пластини притискаються до корпусу, забезпечуючи зміну обсягу робочої камери.

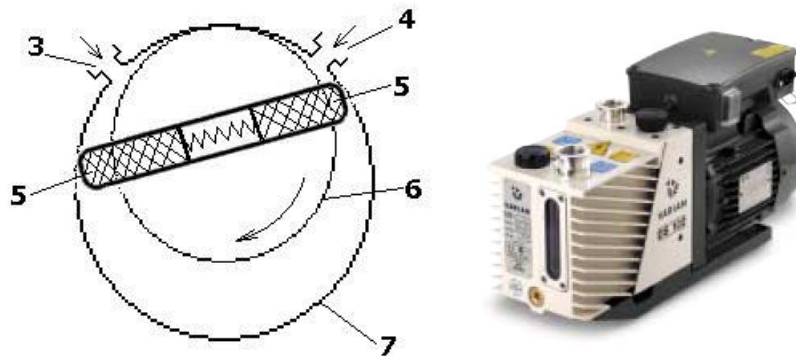


Рис.2.5. Схема пластинчато-роторного насоса.

Випускний патрубок 3 має клапан (кульку, притиснуту до поверхні отвору сталеву пружиною). Він знаходиться під рівнем оливи, щоб в насос не потрапляло атмосферне повітря.

Для зменшення тертя, яке виникає між щільно притиснутими рухливими деталями, а також для ущільнення зазорів, з метою запобігання перетікання газу, в насос вводять певну кількість вакуумної оливи. А для охолодження при роботі його корпус занурюють і закріплюють в бак з вакуумною оливою. З цієї причини у відкачуваних об'ємах буде присутня насичена пара вакуумного масла, яка впливатиме, таким чином, на граничний тиск. Слід зауважити, що на граничний тиск буде впливати ще й об'єм шкідливого простору (V на рис.2.6), який є як біля випускного отвору, так і біля впускного, де тиск різниться за величиною. Різниця тисків може викликати витік газу через місце дотикання ротора до статора за твірною і також може привести до порушення герметичності ущільнення, якщо насос зупинити. Щоб зменшити об'єм шкідливого простору, його заповнюють невеликою кількістю вакуумної оливи, яка на випускному отворі клапана знижує середній тиск у випускній порожнині і зменшує загрозу проходження газу через спільну твірну.

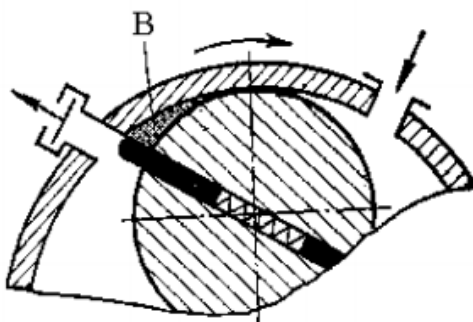


Рис.2.6.Шкідливий простір.

Граничний вакуум для одноступеневих насосів $P_{gp}=10-1$ Па. Насоси малих розмірів мають швидкодію 0,6 л/с. Великі насоси за таким же тиском мають швидкодію до 600 л/с. Ефективним способом зменшення граничного тиску є здвоювання насосів. На рис.2.7 показано схему роботи двоступеневого пластинчато-роторного насоса. Два ступені з'єднано послідовно і виготовляються в одному блоці. $P_{gp}=10^{-1}$ Па для двоступеневих пластинчато-роторних насосів.

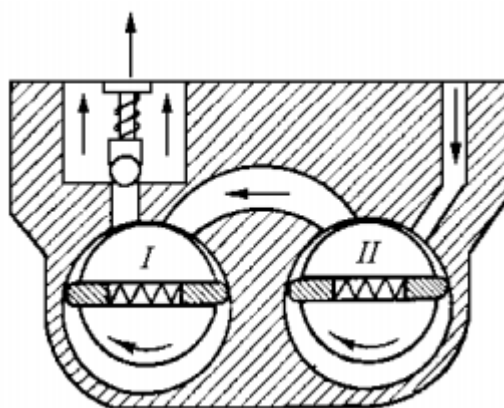


Рис.2.7. Двоступеневий пластинчато-роторний насос.

Недоліки пластинчато-роторних насосів: граничний вакуум залежить від тиску насиченої пари оливи, а також від конструктивних особливостей насоса (ступеня тиску пружини впускного клапану, об'єму шкідливого простору). Марки насосів цього типу: НВР5D~ 5 л/с, НВР1D~ 1 л/с, НВР16D~ 16 л/с, DS-102 фірми Varian ~14 л/с, швидкість обертання ротора 1200 об/хв.

2.4.2. Пластинчато-статорні насоси. З метою зменшення шкідливого простору і областей тертя (там, де може виникати негерметичність) були розроблені насоси, що мають рухому пластину, розміщену в циліндричному статорі. Це *пластинчато-статорні насоси*. Типовий насос такого типу складається з наступних основних елементів (рис.2.8): корпусу 1, ексцентричного ротора 2, випускного патрубку 3, пластини 5, пружини 4, вхідного патрубку 6. При обертанні за годинниковою стрілкою за перший оберт ротора газ всмоктується з відкачуваного об'єкта, а за другий відбувається стиснення і вихлоп газу. Пластина під дією пружини герметично розділяє області всмоктування і стиснення відкачуваного газу. Конструкція

даного насоса відрізняється від конструкції попереднього тим, що пластина 5 закріплена на статорі. Зміна обсягу відбувається за рахунок ексцентрично розташованого ротора. Герметичність досягається за рахунок пластини, контакт якої з ротором забезпечується жорсткістю пружини.

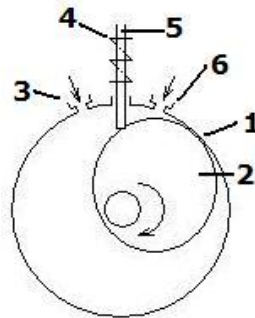


Рис.2.8. Пластинчато-статорний насос.

Граничний вакуум одноступеневого пластинчато-статорного насоса $P_{сп}=10^{-1}$ Па, двоступеневого може досягати $P_{сп}=10^{-2}$ Па. Найбільш поширені насоси цього типу: ВН461~ 0,86 л/с; 540 об/хв., РВН20~ 3,3 л/с; 400 об/хв.

2.4.3. Золотникові насоси. В обхід патентів Геде американський інженер Кенней запатентував золотниковий насос, застосувавши замість пластини золотник, що охоплює ротор. Схема сучасного золотникового насоса наведена на рис.2.9. Він складається з корпусу 1, ексцентрично встановленого ротора 2, золотника 6, випускного патрубку і зворотного клапана 3, шарніра 7 і вхідного патрубку 4. Газ з відкачуваного обсягу через вхідний патрубок і отвори 5 в золотнику надходить в камеру всмоктування А, яка збільшується при обертанні ротора за годинниковою стрілкою. В цей же час обсяг камери В зменшується, і газ, що в ній знаходиться, стискається і виштовхується через вихлопний патрубок. Як і пластинчато-статорні золотникові насоси працюють в масляній ванні. Характеристики їх приблизно однакові, але останні мають великі швидкості відкачки, завдяки попередньому розрідженню в камері впуску. Швидкодія золотникових насосів – до 100 л/с. Граничні тиски одноступінчатих насосів - 10 Па, двоступневих - 0,1 Па. Тиск запуску і випускний тиск рівні атмосферному.

Деякі найпоширеніші марки золотникових насосів: АВ320 -20 л/с, АВ3300- 300 л/с, АВ3500- 500 л/с.

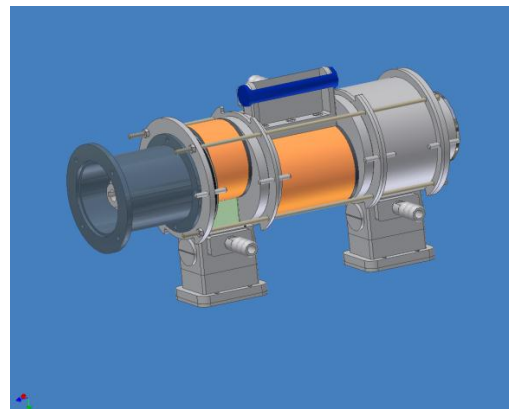
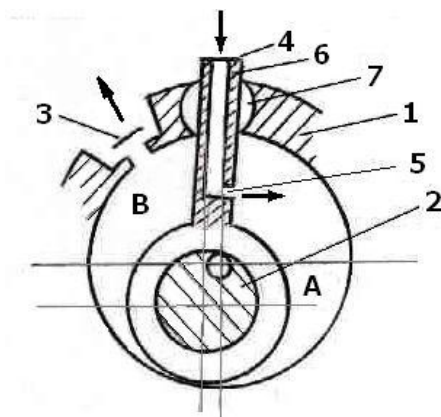


Рис.2.9.Схема і зовнішній вигляд золотникового (плунжерного) насоса.

2.4.4. Обертові газобаластні насоси. Звичайні обертові масляні насоси створюють вакуум на основі закону Бойля-Маріотта і для ефективної відкачки об'ємів, в яких знаходиться або виділяється значна кількість водяної пари, вони непридатні. Пара при стисканні конденсується у воду, яка змішується з маслом, створюючи емульсію. У результаті тиск газу, що створюється в випускному об'ємі, буде недостатнім для відкривання випускного клапана і насос буде працювати вхолосту. Водяні крапельки разом з маслом, що зменшують тертя рухомих частин, будуть проникати з випускного простору до впускного з низьким тиском, де швидко випарюються і водяна пара знову потрапляє до вакуумної системи. Для відкачки водяної пари з вакуумних систем створені *газобаластні насоси*.

Дія таких насосів оснований на введенні через спеціальний отвір у статорі відповідної кількості атмосферного повітря (баластного газу) до робочого простору працюючого насоса, коли він ізольований від впускного і випускного отворів. У результаті суміш пари і повітря матиме атмосферний тиск і клапан на випускному отворі відкриється раніше, ніж розпочнеться конденсація водяної пари, тому вона практично вся вийде через випускний отвір і масло, що циркулює в робочому просторі, не буде забруднюватися.

2.4.5. Об'ємні безмасляні насоси. Сучасні механічні об'ємні насоси здійснюють безмасляне відкачування і працюють за рахунок періодичної зміни обсягу робочої камери насоса. Вони можуть бути мембранними та спіральними. На рис.2.10а наведена схема мембранного насоса. Мембрана з еластомеру 1 переміщається вгору і вниз за допомогою поршня 4. При русі мембрани вниз, камера всмоктування розширюється, внаслідок чого газ потрапляє всередину камери через впускний клапан. При русі вгору мембрана викидає газ через випускний клапан за межі головки насоса 2. Камера насоса герметично ізольована від привідного механізму за допомогою мембрани. Таким чином, мембранний насос переміщує, відкачує і стискає середовище, що перекачується, без використання масла. Мембранні безмасляні вакуумні насоси практичні і багатофункціональні. До їх основних переваг можна віднести повну відсутність масла, довгий термін служби, малошумну роботу, малі габарити, простоту у використанні.

Спіральні вакуумні насоси передбачені для безмасляного отримання вакууму на виробництві та в лабораторіях. Вони можуть використовуватися як окремо, так і в комбінації з іншими насосами. Процес відкачування в них здійснюється двома згорнутими спіралями, одна з яких нерухома, а інша коливається через ексцентрик на валу електродвигуна. З огляду на те, що робочі елементи цих насосів рухаються з низькими лінійними швидкостями і стикаються мінімально між собою, вони надійні в роботі, споживають мало енергії і мають низький рівень шуму.

Для роботи з великою швидкістю відкачки при малих ступенях стиснення застосовують ротаційні вакуумні насоси із спеціальними профілями. У цьому типі насосів зміна об'єму камери досягається завдяки обертальному руху роторів певної форми. Принцип роботи показано на

рис.2.10б на прикладі двороторного насоса (*насоса Рутса*). Насоси Рутса широко використовуються для відкачування великих об'ємів газів в області низького та середнього вакууму. Частота обертання роторів становить 1500-4000 об/хв., або $n = 25-70 \text{ с}^{-1}$. Насоси не потребують змащення, оскільки в них відсутні поверхні тертя. Між роторами (1) і корпусом (2) існує невеликий повітряний зазор. Цим зумовлений недолік: відбувається натікання газу через зазор із випускної зони *В* у зону відкачування *А*. Кількість газу, що натікає, тим більша, чим вищий тиск на виході порівняно із відкачуванням, тобто чим більше стискається газ. Тому для зниження зовнішнього тиску, а відповідно і зменшення натікання газу з випускної зони *В* у зону відкачування *А*, на виході цього насоса розміщують насос для попереднього відкачування.

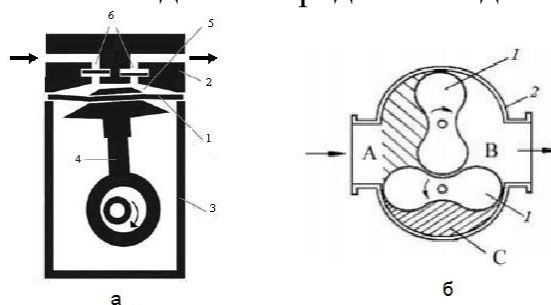


Рис.2.10. Схеми безмасляних механічних насосів : (а) - мембранного, де 1 - мембрана; 2 - головка насоса; 3 - камера насоса; 4 - поршень; 5 - камера всмоктування; 6 - впускний і випускний клапани; (б) - двороторного насоса Рутса, де 1 - ротор; 2 - корпус.

За один оберт ротора видаляється об'єм газу, що дорівнює подвоєному об'єму камери *С*, утвореному впадиною між ротором і корпусом. Сучасні двороторні насоси Рутса характеризуються високою швидкістю $S_n = 5-5000 \text{ л/с}$ в області середнього вакууму, яка зберігає постійне значення тисків від 10^2 до 10^{-1} Па . Швидкість цих насосів значно перевищує швидкість відкачки пластинчатих і золотникових насосів. Граничний вакуум досягає 10^{-3} Па .

2.5. Рідинно - кільцеві насоси

Спочатку цей тип насосів використовувався для відкачування повітря і газів з шахт. Зараз вони використовуються як вакуумні механічні насоси. Особливістю їх є статор, сформований з рідини. Схема типового рідинно-кільцевого насоса показана на рис.2.11. Робоча рідина обертається в корпусі насоса за допомогою крильчатого ротора (імпелера) і утворює статор, що герметично ущільнює лопатки ротора. Утворена між статором і ротором серпоподібна порожнина (розділена на частини лопатками) використовується для переміщення відкачуваного газу. Переваги насоса: безмасляний вакуум, велика (до $100 \text{ м}^3/\text{с}$) швидкість відкачування. Основний недолік: можливість отримання тільки низького вакууму, обмеженого тиском насиченої пари води ($\sim 2.5 \cdot 10^3 \text{ Па}$) або іншої робочої рідини (метанол, етанол), велика питома витрата потужності $\sim 200 \text{ Вт/(л/с)}$ через необхідність переміщення рідини, що перебуває в насосі. Питома маса насосів близько 10 кг/(л/с) .

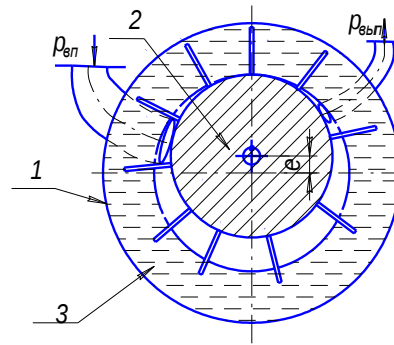


Рис.2.11. Рідинно-кільцевий насос: 1-статор; 2-ротор; 3-вода, яка утримується відцентровою силою.

2.6. Поршневі насоси

У цих насосах відкачування здійснюється за рахунок періодичної зміни робочого об'єму камери циліндричного типу. Циліндри можуть бути простої або подвійної дії із водяним або повітряним охолодженням. Швидкість руху поршня не перевищує 1 м/с. Принцип роботи поршневого насоса ілюструється рис.2.12.

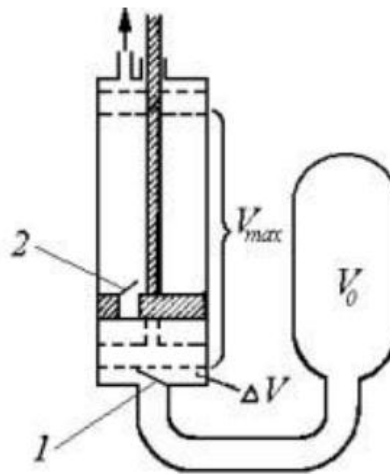


Рис.2.12. Принцип роботи поршневого насоса:
1 – вхідний клапан; 2 – вихідний клапан.

Під час руху поршня вгору вхідний клапан 1 відкривається, і відкачуваний об'єм камери V_0 з'єднується з робочим об'ємом насоса, який збільшується від ΔV до V_{max} . Відповідно до закону Бойля – Маріотта початковий тиск P_0 знизиться до величини P_1 . Під час руху поршня вниз відбувається стиснення газу, що приводить до закривання вхідного клапана 1 та відкривання клапана 2, через який газ виходить в атмосферу. Теоретично при досить великій кількості циклів відкачування граничний тиск P_{gr} поршневого насоса повинен прямувати до нуля. Однак навіть у випадку ідеального ущільнення поверхні між поршнем і стінкою насоса слід мати на увазі кінцеве значення пружності пари ущільнювального мастила та наявність паразитного простору ΔV , з якого газ у нижньому положенні поршня не

видаляється. У цьому випадку тиск у шкідливому просторі буде дорівнювати атмосферному.

Граничний тиск поршневих насосів P_{gr} коливається в інтервалі 10^2 – 10 Па. Швидкість дії сучасних поршневих насосів становить від 10 до 4000 л/с. Вони починають свою роботу з атмосферного тиску. Недоліки насосів: нерівномірність процесу відкачування газів; значні втрати на тертя ~ 200 Вт/(на л/с швидкодії); велика питома маса від 10 до 20 кг/(на л/с швидкодії).

Процес розвитку ВТ привів до повернення поршневих насосів на новому щаблі. В 80-х рр. XX ст. фахівцями ВАТ "Вакууммаш" в Казані і ISLAND SCIENTIFIC LTD Vacuum Equipment був створений безмасляний вакуумний механічний насос на основі полімерів (рис.2.13). Спочатку він використовувався для генерації атмосфери в робочих приміщеннях орбітальних станцій. Зараз використовується як перспективний безмасляний вакуумний механічний насос з $P_{gr}=3$ Па.

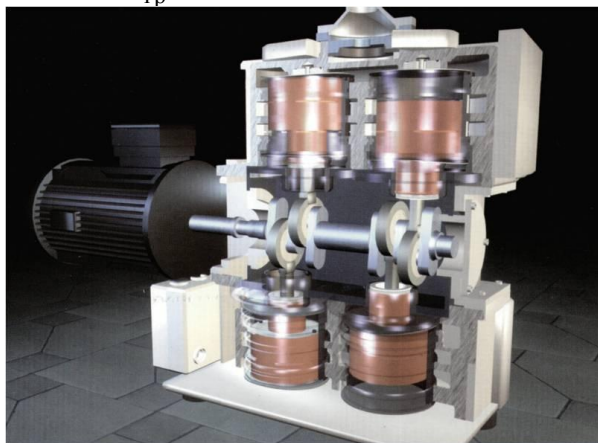


Рис.2.13. Вигляд сучасного поршневого насоса.

2.7. Вакуумна олива для обертових насосів

Вакуумну оливу в обертових насосах використовують для охолодження працюючого агрегата, а також для зменшення тертя і підтримання відповідної герметичності між об'ємами з різними тисками. За цієї причини вона має задовольняти дві протилежні вимоги: 1) мати якомога менший тиск насиченої пари, 2) мати відповідну в'язкість.

Щоб у вакуумної оливи був низький тиск насиченої пари, в ній не повинно бути легких фракцій. В'язкість масла впливає як на роботу насоса, так і на граничний тиск. Якщо вона буде дуже великою, то і герметичність буде надійною, але рух ротора буде утруднений і олива буде перегріватись. Якщо в'язкість буде дуже малою, то вакуумне ущільнення буде ненадійним.

Відомо, що в'язкість вакуумної оливи залежить від температури нагрівання, тому це потрібно враховувати при роботі насосів у літні чи зимові часи. Крім цього, від в'язкості ще залежить властивість вакуумних олив осмолюватись і накопичуватись на стінках вакуумних об'ємів насоса, що утруднює їх роботу, навіть призводить до повної зупинки. На швидкість осмолення впливають відкачувані гази такі як: хлор, фтор або пара кислот, до складу яких входять ці елементи. Оскільки вакуумна олива ще потрібна для

охолодження нагрітих частин насоса, то її має бути не менше відповідної кількості для даного насоса. За місцевого перегріву пара оливи може спалахнути. Чим нижчий тиск насиченої пари оливи, тим вищою буде температура спалаху. Для вакуумних олив обертових насосів температура спалаху має бути вищою за 200°C. Тому для заливки обертових насосів найчастіше застосовують спеціальну вакуумну оливу ВМ-4 з тиском насиченої пари $\sim 10^{-3}$ Па, що цілком задовільно для обертових насосів. Також використовуються марки: ВМ-1 ($P_{нас} \sim 3 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$ Па), ВМ-3 ($P_{нас} \sim 10^{-1}$ Па), ВМ-5 ($P_{нас} \sim 10^{-4}$ Па), ВМ-7 ($P_{нас} \sim 10^{-4}$ Па). З часом роботи насоса олива не тільки забруднюється паром рідин, які можуть бути у відкачуваному об'ємі, а й змінює свій склад з причин місцевих перегрівів і в ній з'являються легкі летючі фракції (виникає крекінг). Тому необхідно у відповідні терміни повністю замінювати відпрацьовану оливу.

Мінеральні вакуумні масла являють собою складні суміші парафінових, ароматичних і ненасичених вуглеводнів. При розробці нових сортів і марок олив одним з основних є вимога до їх теплофізичних і фізико-хімічних властивостей. Виявлення закономірностей зміни цих властивостей від складу та умов експлуатації є основним завданням при дослідженні реальних сумішей вакуумних робочих олив.

В обертових насосах вакуумну оливу заливають у бак, в якому розміщено насос, в кількості, щоб його випускний клапан був занурений в ній і олива, хоча й в невеликій кількості була б присутня в робочому об'ємі.

Перед вмиканням електродвигуна необхідно спочатку подати водяне охолодження (якщо воно передбачене), а потім рукою повернути 2-3 рази ротор насоса за напрямом червоної стрілки. Якщо попереднє повертання не проводити, то вакуумна олива, що проникла в робочі об'єми насоса за час його зупинки, може завадити електродвигуну привести в обертання ротор насоса або навіть викликати його поломку.

Вакуумна олива викидається з випускного патрубка у вигляді бризок (крапель) і як оливний туман.

При відкачці кисню необхідно користуватися негорючими маслами або іншими незаймистими рідинами, наприклад фосфатними ефірами. Для радіаційно небезпечних приміщень розроблені масла, стійкі до радіації.

Тестові завдання до розділу 2.

1. Які два основні способи одержання вакууму?
 - 1 – криогенний та електричний (іонний);
 - 2 – за допомогою поглиначів та газорозрядних насосів;
 - 3 – за допомогою вакуумних насосів та з використанням поглиначів.
2. Вакуумний насос – це пристрій, що слугує для:
 - 1 – видалення газових молекул з будь-якого об'єму;
 - 2 – руйнування газових молекул в об'ємі;
 - 3 – напуску повітря в об'єм з газами.

3. Швидкодія насосу визначається об'ємом газу, що потрапляє за одиницю часу до працюючого насоса при тиску:
 - 1 – на впускному патрубку; 2 – на випускному патрубку; 3 – в камері, яка відкачується.
4. Граничний тиск насоса:
 - 1 – найбільший тиск, який може створити насос при тривалій роботі;
 - 2 – найменший тиск, який може створити насос при тривалій роботі;
 - 3 – найменший тиск, який створюється у вакуумній камері при тривалій відкачці.
5. Найменший робочий тиск насоса:
 - 1 – більше граничного; 2 – близький до граничного; 3 – менше граничного.
6. Умова сталості газового потоку при відкачці вакуумної системи:
 - 1 – $pS = p_1S_n = p_2S_o = U(p_2 - p_1) = Q$;
 - 2 – $S_{н.эф.} = S_o$;
 - 3 – $S_n = U \frac{p_2 - p_1}{p_1}$.
7. Головне рівняння вакуумної техніки:
 - 1 – $pS = p_1S_n = p_2S_o = U(p_2 - p_1) = Q$;
 - 2 – $\frac{1}{S_o} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}$
 - 3 – $p = (p_o - p_{zp})e^{-(S/V) \cdot t} + p_{zp}$
8. Коефіцієнт використання вакуумного насоса пропорційний:
 - 1 – швидкості відкачки об'єкта;
 - 2 – граничному тиску;
 - 3 – швидкодії насоса.
9. Основні параметри вакуумних насосів:
 - 1 – вага, лінійні розміри та швидкість відкачки;
 - 2 – граничний вакуум, найбільший випускний тиск та швидкодія насосу;
 - 3 – швидкодія насоса та потужність що споживається насосом.
10. Чим обумовлений граничний тиск?
 - 1 – розмірами об'єкта, що відкачується, і розмірами насоса;
 - 2 – перепадом тисків;
 - 3 – газовиділенням матеріалів насоса.
11. Одиниці вимірювання швидкості відкачки газу за даним тиском:
 - 1 – см/с; 2 – л/с; 3 – см³/хв.
12. Для чого слугують насоси попереднього розрідження?
 - 1 – щоб надійніше працював високо-вакуумний насос;
 - 2 – щоб забезпечити мінімальне розрідження газу, що відповідає максимальному випускному тиску високовакуумного насоса;
 - 3 – щоб не допустити перегрівання високовакуумного насосу.
13. Які насоси попереднього розрідження є найбільш поширеними?
 - 1 – пластинчато-роторний; 2 – пластинчато-статорний; 3 – золотниковий.
14. Який тиск забезпечують найбільш поширені у використанні обертові насоси попереднього розрідження?
 - 1 – 10⁻¹Торр; 2 – 10⁻³Торр; 3 – 10⁻⁵Торр.
15. В яких межах дозволяють отримати граничний тиск форвакуумні насоси?
 - 1 – 10⁻⁵ – 1 Па; 2 – 1 – 10⁻² Па; 3 – 10⁻³ – 10⁻⁵ Па.
16. До насосів, в яких використовується молекулярна течія газу, відносяться:
 - 1 – пароструминні ежекторні насоси;
 - 2 – механічні молекулярні насоси;
 - 3 – поршневі насоси.

17. До насосів, в яких використовується закон Бойля-Маріотта, відносяться:
1 – дифузійні насоси;
2 – молекулярні насоси;
3 – пластинчаті й золотникові насоси.
18. Об'ємними вакуумними насосами є:
1 – іонно-сорбційні;
2 – пароструминні ежекторні;
3 – механічні.
19. Граничний вакуум одноступеневих пластинчато-роторних насосів $P_{гр}$:
1 – 10^{-3} мм рт.ст.; 2 – 10^{-5} мм рт.ст.; 3 – 1 мм рт.ст.
20. Яку швидкодію можуть досягати золотникові насоси?
1 – 1000 л/с; 2 – 50 л/с; 3 – 100 л/с.
21. Як конструктивно можна знизити граничний тиск пластинчато-роторного насоса?
1 – з'єднати послідовно два насоси;
2 – корпус насоса розмістити в ємності з вакуумним маслом;
3 – збільшити потужність електродвигуна.
22. Які насоси використовуються для відкачки водяної пари з вакуумних систем?
1 – двороторні насоси Рутса;
2 – пластинчато-статорні насоси;
3 – газобаластні насоси.
23. Чому висока летучість олії для насосів попереднього розрідження є її недоліком?
1 – великі витрати олії;
2 – олія є дорогою за ціною;
3 – погіршує граничний вакуум насоса.
24. За якою температурою спалаху пари оливи для насосів попереднього розрідження визначається допустима її летучість?
1 – 100°C ; 2 – 200°C ; 3 – 300°C .
25. Чому занадто густа олива не придатна для насосів попереднього розрідження?
1 – вона є дорогою кошовною;
2 – не використовуються можливості насоса щодо отримання граничного вакууму;
3 – утруднює запуск насоса, викликає його перегрівання та знижує число обертів двигуна.
26. До яких наслідків призводить використання у насосах попередньої дії оливи недостатньої в'язкості?
1 – до виходу з ладу насоса;
2 – до забруднення приміщення де знаходиться насос;
3 – до не одержання достатнього ущільнення й граничного розрідження.
27. Яка допустима температура нагріву корпусу обертових насосів при тривалій їх роботі?
1 – 100°C ; 2 – 75°C ; 3 – 50°C .

3. МОЛЕКУЛЯРНІ ВАКУУМНІ НАСОСИ

3.1. Принцип молекулярної відкачки

Робота обертових насосів для отримання попереднього (низького) вакууму базується на використанні закону Бойля–Маріотта. Граничний тиск таких насосів не менший 10^{-2} Па. Причина цього є наявність шкідливого простору та ущільнень між пластинами насосів. Якщо ж необхідно отримати розрідження з меншим тиском, то використовують вакуумні насоси, робота яких ґрунтується на інших фізичних явищах, таких як внутрішнє тертя (в'язкість) або дифузія газів (п.1.4). У відповідності з МКТ ці явища обумовлені передачею імпульсу від молекул, що знаходяться в більш рухливому шарі потоку, молекулам шару, який рухається повільніше, а тепловий рух призводить до змішування молекул сусідніх шарів. Насоси, принцип відкачки яких ґрунтується на вказаних явищах, називаються *молекулярними*.

Молекулярний насос сконструйовано в 1911 р. інженером Геде для поліпшення вакууму, який створювався механічним масляним насосом. Головна ідея молекулярного насоса не змінилась - надання всім молекулам відкачуваного газу, які рухаються в довільних напрямках, додаткової складової швидкості в напрямку до випускного патрубку.

Молекулярні вакуумні насоси являють собою різновид швидкісних вакуумних насосів. Вони працюють в області молекулярного режиму течії газу, забезпечуючи значні відношення тисків (до $10^6 - 10^7$) при відносно невеликій швидкодії 0,1 – 100 л/с. За конструктивним виконанням розрізняють *механічні* й *струминні* молекулярні насоси.

В механічних молекулярних насосах окремі молекули газу направляються до випускного отвору в результаті отримання імпульсу від поверхні твердого тіла, яка швидко обертається. Молекули газу, що рухаються хаотично, при зіткненні з поверхнею на деякий час затримуються на ній через дію міжмолекулярних сил, після чого випаровується з неї у випадковому напрямі незалежно від кута, під яким виникло зіткнення. Видалення газу з вакуумної системи за допомогою рухомих поверхонь є *молекулярною відкачкою*. Існують дві схеми молекулярної відкачки. Перша - відкачка через канал, одна зі стінок якого здійснює відносне переміщення зі швидкістю v_p паралельно осі каналу. Молекули газу в каналі, які зазнають зіткнень з рухомою поверхнею, отримують приріст кількості руху. При цьому створюється перепад тисків. Максимальна швидкодія пропорційна швидкості стінки v_n . Друга - використовує для видалення газів залежність провідності похилого каналу, що рухається перпендикулярно газовому потоку зі швидкістю v_n від напрямку течії газу. Відповідно до цих схем насоси поділяють на молекулярні обертові та турбомолекулярні.

3.2. Молекулярний обертовий насос

Конструктивно молекулярні обертові насоси розділяються на три групи: циліндричного типу з кільцевими каналами на роторі (насос Геде), циліндричного типу зі спіральним каналом уздовж поверхні статора (насос

Гельвека), дискового типу зі спіральним каналом від зовнішнього діаметра до центру диска (насос Зігбана). Канали утворюються між поверхнями нерухомого корпусу і паза, виточеного в роторі, або ротора і паза, виточеного в корпусі. У першому випадку з газом взаємодіє відносно велика рушійна поверхня, ніж у другому.

Будову і принцип дії молекулярного насоса ілюструє рис.3.1. Усередині циліндричної порожнини статора 1 знаходиться ротор 2. Статор має таку конфігурацію, що на ділянці 3 – 4 зазор між ним і ротором дуже малий і створює порівняно великий опір потоку, через що рух газу буде переважно до випускного патрубка. На іншій ж ділянці 3 – 5 – 4 довжиною l між ротором і статором утворюється камера шириною h , де і відбувається процес відкачування. Молекули газу, що потрапляють у вхідний отвір насоса і вдаряються у поверхню ротора, залишаються на ній деякий час, а потім відриваються з певною швидкістю, що залежить від температури ротора. Якщо швидкість обертання ротора дорівнює або більша за швидкість теплового руху молекул газу, то молекули будуть рухатися в напрямку обертання. В області молекулярного режиму течії газу насос працює ефективно, так як швидкість обертання ротора велика ($v_n=1000$ об/хв.), і при кожному другому зіткненні молекули газу отримують додаткову складову імпульсу в напрямку відкачування. При збільшенні тиску газу ефективність падає, тому що зменшується ймовірність ударів молекул газу у поверхню ротора. Для збільшення ефективності відкачки необхідно, щоб середня довжина вільного пробігу молекул була більшою за висоту каналу, тобто для запуску молекулярних насосів потрібно здійснювати попереднє розрідження.

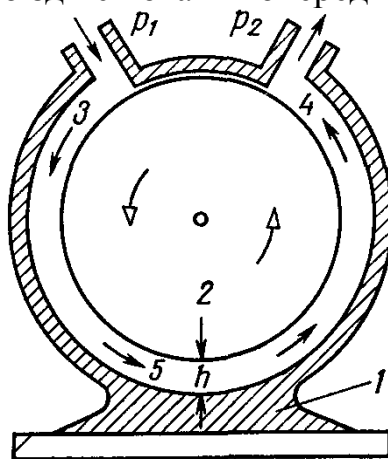


Рис.3.1.Молекулярний насос Геде.

Молекули, що володіють швидкостями, дотичними до поверхні, після багатьох відбивань від стінок наближаються до виходу насоса, де газ накопичується і його концентрація зростає, внаслідок чого він витікає в форвакуум, створений біля виходу насоса. Зазор 3 – 4, що має великий опір, ускладнює перетікання газу з боку виходу до входу (обмежує зворотний потік). Проте такий потік існує і в напрямку 4 – 5 – 3, так що ефективний потік, що відкачується, являє собою основний потік за вирахуванням двох зворотних потоків (у напрямках 4 – 5 – 3 і 4 – 3).

Где визначив, що за низьких тисків відношення тисків на випускному до тиску на впускному отворах дорівнює: $P_2 / P_1 = e^{av}$, де a - коефіцієнт, що залежить від природи газу й від провідності каналу в статорі; v - лінійна швидкість обертання ротора. Відношення P_2/P_1 називається *коефіцієнтом компресії (стиснення)*. Чим вище коефіцієнт компресії, тим ефективніше працює насос. Коефіцієнт компресії залежно від конструкції насоса і швидкості обертання ротора може коливатися в межах 10^5 - 10^7 , тобто граничний тиск буде за порядком 10^{-6} Торр, якщо попередній вакуум забезпечити в 1 Торр.

Для збільшення довжини l виготовляють статори з каналами. Спіральний паз 1 на поверхні статора 2 і циліндрична поверхня ротора 3 утворюють робочий канал, що демонструє рис.3.2. Реально конструкція молекулярного насоса складається з декількох пластин ротора і статора.

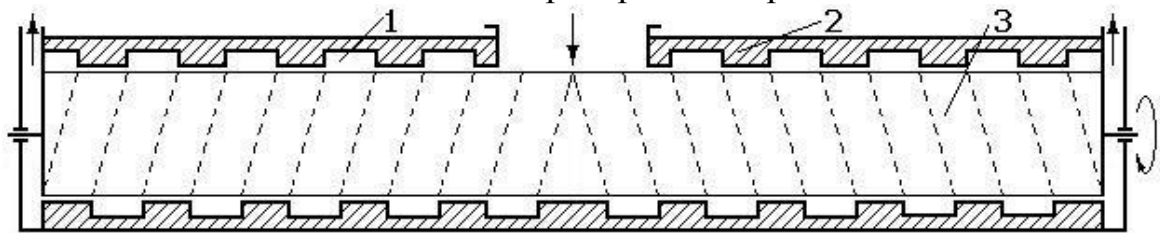


Рис.3.2.Робочий канал молекулярних насосів.

Зазвичай молекулярні насоси починають працювати при форвакуумі ~ 1 Па. Такий форвакуум необхідний для забезпечення досить великої довжини вільного пробігу ($\lambda \gg h$). Молекулярні насоси мають частоти обертання роторів у десятки тисяч об/хв. Діаметри роторів зазвичай декілька десятків см, а зазори становлять декілька сотих мм, що створює серйозні конструктивні труднощі. Швидкість відкачування сучасних молекулярних насосів досягає декількох десятків л/с. Вони забезпечують $P_{сп} \sim 10^{-4}$ Па.

Основною перевагою механічних молекулярних насосів є отримання високого вакууму в робочій камері без використання робочих рідин (олів).

Недоліки механічних молекулярних насосів:

- висока точність у виготовленні зазорів значно збільшує вартість насоса;
- насоси дуже чутливі до забруднень, і від потрапляння в них металевих або скляних частинок втрачають функціональні можливості;
- мають селективність у роботі; найкраще відкачуються молекули із великою масою, тому що швидкодія молекулярного насоса змінюється пропорційно квадратному кореню з молекулярної маси. Але цю особливість можна використовувати для розділення ізотопів (збагачення елементів).

3.3. Турбомолекулярні насоси.

Основний недолік попередніх насосів, а саме малий зазор між ротором і статором, значною мірою усунуто в турбомолекулярних насосах, які набули широкого застосування. В них потік відкачуваного газу і зворотний потік рухаються у перпендикулярних напрямках. Конструктивно такий насос нагадує турбіну (рис.3.3а). Він складається з циліндричної камери, в якій нерухомо

закріплені елементи статора у вигляді тонких дисків 1, що мають товщину декілька мм. Ряд таких же дисків 2 паралельно розміщено на валі ротора, причому як між кожними паралельними поверхнями роторних і статорних дисків, так і в радіальному напрямі між статором і ротором існує зазор в 1 мм. Такий достатньо широкий зазор дозволяє надати значну швидкість обертанню ротора без заїдання. Усі диски мають спрямовані під кутом радіальні прорізи, розміщені таким чином, що прорізи статорних дисків являють немовби дзеркальне відображення роторних (рис.3.3б), завдяки чому між косими поверхнями прорізів будь-якого і сусіднього дисків створюються клиноподібні канали. Таких каналів може бути до 40, а в кожній системі можна розмістити до 19 пар статорних і роторних дисків.

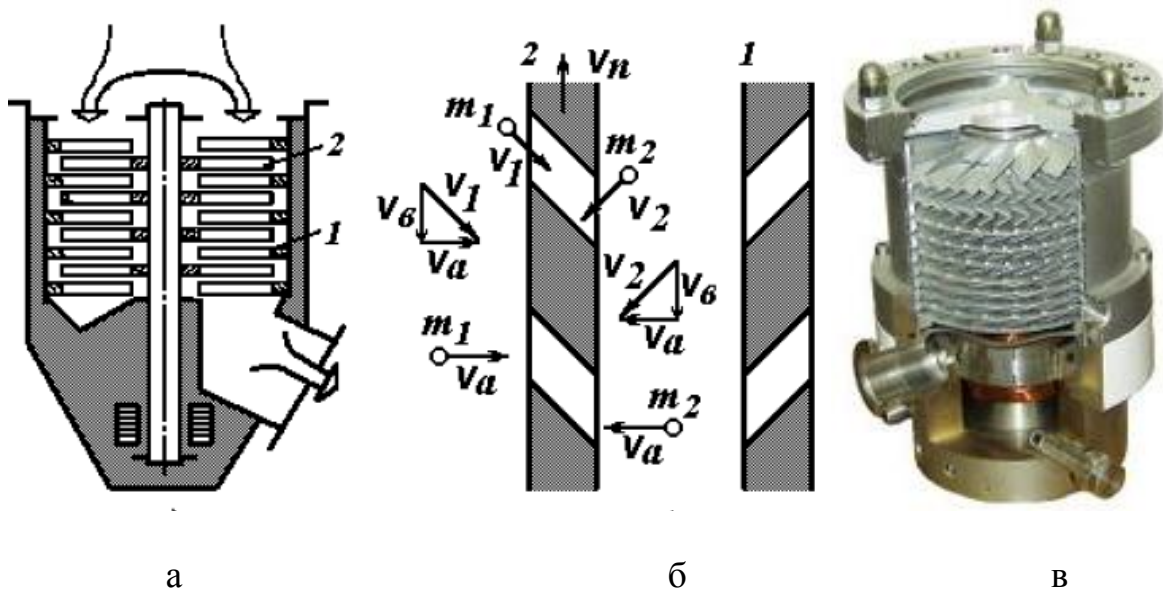


Рис.3.3. Турбомолеклярний насос: а-схематичний розріз; б - утворення каналів; в- загальний вигляд.

Молекулярна відкачка відбувається завдяки залежності провідності похилого каналу, що рухається зі швидкістю v_n перпендикулярно до газового потоку. У результаті теплового руху молекули газу з середньоарифметичною швидкістю v_a будуть бомбардувати з обох боків пластини з похилими каналами (рис.3.3б). Можна вважати, що за обертання ротора рух каналу роторної пластини зі швидкістю v_n відносно умовно нерухомої молекули – це такий же рух молекули (наприклад m_1) зі швидкістю $v_a = v_n$ відносно умовно нерухомого каналу. Після векторного додавання складових швидкостей молекули m_1 отримаємо, що напрям її руху зміниться і вона з результируючою швидкістю v_1 буде рухатися паралельно осі каналу (рис.3.3б). У сукупності з іншими подібними молекулами створиться газовий потік, тобто примусове перетікання газу через рухомий канал на інший бік пластини 2. Таке перетікання газу створить підвищений тиск на одному боці нерухомої статорної пластини 1, тоді як перетікання газу через канали наступної роторної пластини створить понижений тиск на другому боці пластини 1. Різниця тисків викличе потік газу через канали нерухомих статорних пластин 1 у напрямі до

випускного отвору. Одночасно потік молекул через канали рухомої пластини 2 у зворотному напрямі, наприклад, молекул, подібних до m_2 , буде спрямовано перпендикулярно до поздовжньої осі рухомого каналу, тобто перетікання газу на інший бік пластини 2 буде утруднено. Отже, за роботи насоса виникає молекулярна відкачка газу від впускного отвору до випускного через похилі канали – отвори в пластинах.

Турбомолекулярні насоси здатні створювати граничний тиск до 10^{-8} Па і забезпечити стабільну швидкість відкачування 100-1000 л/с ($0,1-1 \text{ м}^3\text{с}^{-1}$) в діапазоні впускних тисків $10^{-1} - 5 \cdot 10^{-6}$ Па. Ці насоси добре пристосовані до відкачування великих потоків газів, у тому числі агресивних, що робить їх незамінними в багатьох галузях. Найбільший випускний тиск 10 Па. Краще вони відкачують тяжкі гази, а гелій і водень гірше. До переваг можна віднести широкий діапазон робочих тисків, високу швидкодію, швидкий запуск. Найбільш поширені марки: ТМН-100, 200, 300, 500, ТВН-200, 500. Останнім часом створені насоси зі швидкостями відкачки до 10000 л/с при частоті обертання 10000 об/хв., що забезпечують $P_{\text{гр}} < 5 \cdot 10^{-9}$ Па.

Недоліком ТМН є швидке зношування підшипників складної конструкції високошвидкісного ротору (ремонт лише в заводських умовах). В якості альтернативи опор на кулькових підшипниках можуть служити магнітні опори (насос «Турбовак 550 М»). Ефективна робота турбомолекулярних насосів можлива лише при молекулярному режимі течії газу в каналах дисків, тому вони вимагають зниженого тиску на виході і використовуються лише з послідовно приєднаними ротаційними насосами з масляним ущільненням або насосами інших типів. Серйозною проблемою при розробці ТМН є зменшення зворотного потоку вуглеводневих сполук, джерелами яких є змащувані маслом підшипники і форвакуумні насоси.

Сучасна мікро і наноелектроніка стимулювала створення мініатюрних турбомолекулярних насосів (рис.3.4), здатних при невисокій швидкості відкачування створювати надвисокий вакуум.



а



б

Рис.3.4. Вид сучасних надмініатюрних турбомолекулярних насосів:
а-Varian Turbo-V 70 (діаметр 95мм, висота 134мм, $S_n=68$ л/с, $P_{\text{зр}}=10^{-9}$ Па);
б-Alcatel ATH 31(діаметр 97мм, висота 113мм, $S_n=30$ л/с, $P_{\text{зр}}=10^{-9}$ Па).

3.4. Струминні насоси

3.4.1. Типи струминних насосів. В струминних насосах частинки газу набувають швидкість від струменя рідкого або газоподібного робочого тіла. Залежно від фазового стану робочого тіла розрізняють: 1) рідинні насоси, в яких робочим тілом є струмінь рідини (зазвичай вода); 2) газові насоси, в яких робочим тілом є струмінь газу (зазвичай повітря); 3) пароструминні насоси, в яких робочим тілом є струмінь водяної, ртутної або масляної пари. В свою чергу пароструминні насоси за режимом течії газу, що відкачується, та режимом течії струменю пари поділяють на *ежекторні та дифузійні*. До насосів, в яких використовують в'язкість газу, відносяться *пароструминні ежекторні насоси* (робочий тиск 10^5 -1 Па): при низькому вакуумі молекули, що знаходяться в шарі, який межує з паровим струменем, за рахунок внутрішнього тертя захоплюють інші шари газу. До насосів, в яких використовують молекулярну течію газу, відносять *пароструминні дифузійні насоси* ($P_{\text{роб.}} > 10^{-2}$ Па): через різницю концентрацій газу над струменем пари і в самому струмені (дуже мала) відбувається дифузія газу в струмінь.

Слід мати на увазі, що пароструминні насоси не можуть працювати самостійно, а завжди входять до вакуумної системи з насосом попереднього вакууму. В якості насосів попереднього розрідження використовують обертові насоси, які впускним патрубком приєднують до випускного патрубка пароструминного насоса так, щоб його випускний тиск хоча й незначно, але перевищував впускний тиск обертового насоса.

Ежекторний насос часто використовується в якості першого ступеню (п.3.4.3) дифузійного насоса. Насоси з ежекторним ступенем іноді називають *бустерами*. Як ежекторні насоси, так і бустери, є проміжними між дифузійними і форвакуумними насосами. На виході дифузійних насосів (особливо одноступеневих) тиск повинен мати порядок десятих і навіть сотих часток Торр. Створити такий форвакуум оливними ротаційними насосами важко, так як в цій області тисків вони мають спадаючу характеристику $S=f(P)$, що вимагає застосування ротаційних насосів з більшою номінальною швидкістю відкачування (тобто великих розмірів). Цю прогалину якраз і заповнюють допоміжні бустерні насоси (останнім часом також насоси Рутса).

Загальними елементами пароструминних насосів є: 1) сопло; 2) робоча рідина; 3) нагрівач; 4) охолоджувач. Конфігурація сопла в насосі має принципове значення, так як в ньому відбувається перетворення енергії тиску пари в кінетичну енергію струменя. Від форми сопла залежать механізм проникнення молекул газу в струмінь пари, швидкість, щільність і ступінь розсіювання струменя.

Принцип захоплення молекул відкачуваного газу струменем окрім форми сопла залежить і від форми камери, а також від області робочих тисків. Сопла в сучасних насосах бувають двох типів: ежекторні і дифузійні. *Ежектор* – пристрій, в якому відбувається передача кінетичної енергії від одного середовища, що рухається з *надзвуковою швидкістю* до іншого. Ежектор, працюючи за законом Бернуллі, створює у вузькому перетині

знижений тиск пари, що викликає підсмоктування в потік газу, який потім переноситься і віддається від місця всмоктування енергією струменя пари. Надзвуковий рух струменя створює турбулентності, де відбувається змішування молекул струменя і газу, який відкачують. Принцип роботи ежекторного (а) і дифузійного (б) пароструминних сопел показано на рис.3.5, де: 1 - сопло; 2 - "межа" струменю пари; 3 - теплоізольована зона змішування (перенесення); 4 - частина робочої камери, що охолоджується (конденсатор).

Дія ежекторного сопла (рис.3.5 (а)) полягає в тому, що струмінь пари при виході з сопла з великою швидкістю, захоплює за собою частки газу по межі зіткнення за рахунок в'язкості. Це явище має місце при впускних тисках 1Па. При зниженні тиску відкачуваних газів механізм дії сопла змінюється. У зв'язку із зростанням СДВП молекул газу може відбуватися дифузія частинок газу на значну глибину у струмінь пари (рис.3.5 (б)). При цьому струмінь має бути менш щільним, ніж у першому випадку. Дифузія газу відбувається під дією різниці його парціальних тисків у просторі біля і в самому струмені. Це відбувається при тисках нижче 0,1Па. У сучасних насосах частіше застосовується зонтичні (звернені) конструкції дифузійних сопел, деякі з них показано на рис.3.6. Ефективність дії дифузійного сопла визначається швидкістю руху струменя пари, його спрямованістю щодо охолодженої стінки, площею мінімального перетину кільцевого зазору між стінкою насоса і соплом, а також повнотою конденсації пари.

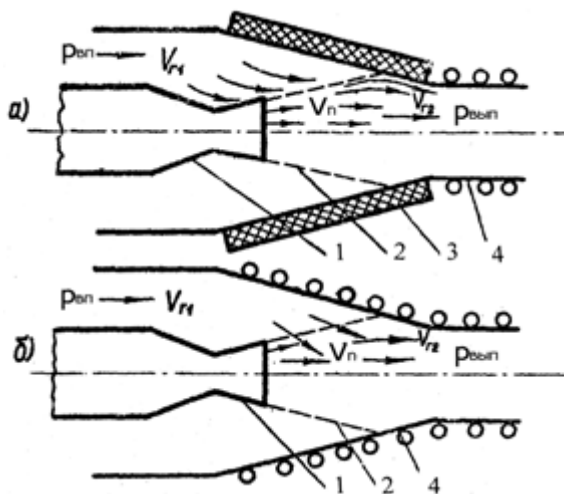


Рис.3.5. Пароструминні сопла.

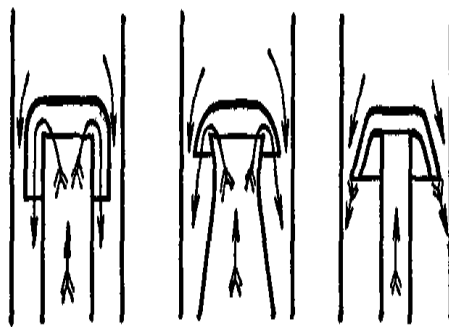


Рис.3.6. Зонтичні сопла.

Отже, механізм захоплення газу в ежекторних (10^5 – 10 Па), бустерних (10 – 10^{-2} Па) і дифузійних (10^{-2} – 10^{-5} Па) насосах різний. Чим вищий тиск газу на вході насоса, тим більшою повинна бути щільність пари у струмені. При великих швидкостях пари захоплення газу відбувається в результаті турбулентно-в'язкісного перемішування вихорів пари із частинками газу (ежекторні насоси). Зі зниженням тиску і зменшенням витрати пари зростає роль в'язкісного захоплення в ламінарний струмінь (бустерні насоси). При дуже низькому тиску, коли вільний пробіг молекул газу порядку діаметра насоса, працює тільки дифузійний механізм проникнення молекул газу у струмінь пари. В цьому випадку щільність струменя має бути низькою, а

швидкість струменя – високою для ефективної передачі імпульсу молекулам газу. При випадковому зіткненні молекул газу із струменем молекули можуть як відбитися, так і дифундувати у струмінь через різницю вхідного тиску і парціального тиску газу в струмені.

Конструктивно ежекторні і дифузійні насоси подібні. Але в ежекторних насосах струмінь пари не повинен конденсуватися на стінці відразу після її торкання, тобто стінка насоса навколо ежекторного сопла не охолоджується (рис.3.5а). Насоси з ежектором мають велику швидкодію (50 –100 л/с) в межах тиску 10 - 1 Па, тобто в області, де обертові пластинчаті насоси мають граничний тиск. Для отримання ще меншого тиску їх роблять багатоступінчастими, тоді граничний тиск знижується до 10^{-1} - 10^{-2} Па. До недоліків слід віднести залежність швидкодії насоса від тиску газу.

Корпуси пароструминних насосів виготовляють зі скла (робоча рідина – ртуть) і металу. До достоїнств скляних насосів відносять простоту виготовлення і надійну герметичність; до недоліків - слабку стійкість скла до механічних і термічних дій.

Важливою перевагою струминних насосів є відсутність в них рухомих частин, вони більш довговічні і, як правило, характеризуються високою продуктивністю, менш чутливі до вмісту в відкачуваних газах водяної пари.

3.4.2. Дифузійні вакуумні насоси. Схема найпростішого дифузійного пароструминного насоса показана на рис.3.7. Робоча рідина, що заливається в корпус насоса, нагрівається в кип'ятильнику (випарнику) 1, надходить через паропровід в сопло 2 і виходить з нього у вигляді струменя з надзвуковою швидкістю. Молекули відкачуваного газу через патрубок 3 захоплюються в кільцевий затвор між соплом і корпусом і переносяться цим струменем до випускного патрубка 5. Суміш робочого пара з газом надходить на охолоджувану стінку холодильника 4, при цьому пара конденсується на ній, а молекули відкачуваного газу продовжують свій рух у бік випускного патрубка 5, звідки видаляються форвакуумним насосом. Конденсат робочої рідини із стінок холодильника стікає вниз в кип'ятильник 1 і знову включається в робочий цикл: робоча рідина знову випаровується (у першу чергу легкі фракції масла), піднімається паропроводом до сопла, де знову утворюється струмінь пари і т. д. Здійснюється безперервний кругообіг.

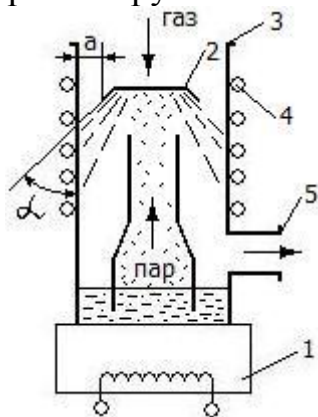


Рис.3.7.Схема роботи пароструминного насоса.

Струмінь пари розділяє області низького вхідного тиску $P_{вх}$ (високий вакуум над струменем) і вищого вихідного тиску $P_{вих}$ (низький - під струменем). Тому одночасно з дифузією газу зверху, у струмінь відбувається шкідлива дифузія газу знизу. Газ, що дифундував у струмінь знизу, з області вищого вихідного тиску, не виноситься вгору, а захоплюється струменем вниз і при конденсації пари виділяється назад в область $P_{вих}$. Тому важливим є малий кут нахилу α струменя до стінки. Найбільш сприятливий кут нахилу направляючої тарелі сопла знаходиться в діапазоні $60-90^\circ$. Збільшення відстані a (тобто мінімального перетину, який відокремлює простір високого вакууму від діафрагми) сприяє збільшенню швидкості відкачки, однак тільки до певного рівня, після чого швидкість відкачування різко зменшується. Тому замість однієї діафрагми з великою поверхнею часто створюють кілька діафрагм за допомогою соплової решітки. Розміри сопла залежать від кількості та тиску парів робочої рідини, які в свою чергу визначаються продуктивністю насоса, теплотою випаровування і температурою кипіння.

Швидкість дії дифузійного насоса значною мірою визначається площею вхідного отвору і родом відкачуваного газу. Знаючи швидкість відкачування дифузійного насоса для повітря S_p , можна орієнтовно визначити швидкість відкачування для газу X за формулою $S_x = s_x S_p$, де s_x - коефіцієнт, значення якого для деяких газів наведені в табл. 3.1.

Табл.3.1.

Газ X	H ₂	He	Ar, H ₂ O	Ne	N ₂ , CO	O ₂	CO ₂	Kr
s_x	1.8	1.6	1.2	1.1	1	0.95	0.85	0.7

Основною характеристикою пароструминних насосів є залежність швидкодії від тиску на вході в насос (рис.3.8а). У середній області робочого тиску швидкість відкачки постійна і максимальна (S_{max}). *Швидкодія дифузійного насоса не залежить від тиску газу на випускному патрубку – це головна перевага.* При наближенні робочого тиску до $P_{зр}$ вона наближається до нуля через наявність зворотного потоку газів і пари з насоса у відкачуваний об'єм. При надмірному збільшенні впускного тиску підвищується і випускний тиск насоса, який лімітується швидкодією форвакуумного насоса. Якщо останній має недостатню продуктивність, то відбуваються прорив газу з області форвакууму в область високого вакууму і різке падіння швидкодії дифузійного насоса. Збільшуючи потужність підігріву, можна дещо збільшити величину допустимого тиску на виході з дифузійного насоса, втрачаючи при цьому в швидкодії (рис.3.8в). При збільшенні робочого тиску за верхню межу молекулярного режиму течії швидкодія зменшується у зв'язку із зниженням швидкості дифузії молекул газу в струмінь пари і при максимальному вхідному тиску P_e наближається до нуля. Отже, зменшення швидкодії при високому тиску пов'язано з відривом струменя від стінок насоса, що супроводжується перетіканням газу від випускного патрубка до камери.

Граничний тиск насоса $P_{зр}$ при низькому тиску на вихідному патрубку P_e (рис.3.8б) слабо залежить від зміни останнього.

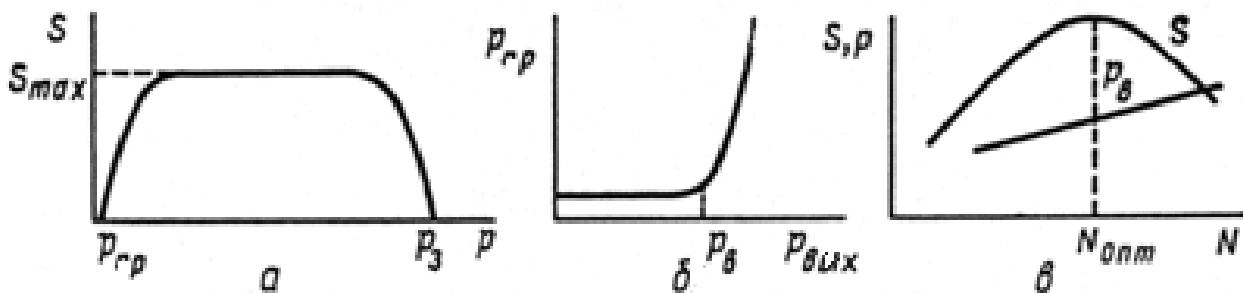


Рис.3.8. Характеристики пароструминних насосів.

При збільшенні потужності N нагрівача за рахунок збільшення швидкості парового струменя швидкодія спочатку зростає (рис.3.8в), досягає максимуму при N_{opt} , а потім зменшується через збільшення густини парового струменя. Максимальний випускний тиск насоса P_e при збільшенні потужності підігріву безперервно зростає. Збільшення швидкості витікання пари за рахунок підвищення температури випаровування приводить до зайвого збільшення теплових швидкостей частинок газу. В результаті цього зворотний потік пари зростає і олива проникає у область високого вакууму.

3.4.3. Багатоступеневі пароструминні насоси. Дифузійні насоси, подібно обертовим, можуть включатися послідовно, тобто вихід одного насоса з'єднується зі входом другого і т. д. Це дозволяє підвищити граничний вакуум або використовувати насоси з менш жорсткими вимогами щодо форвакууму. Багатоступеневий дифузійний насос є реалізацією послідовного з'єднання кількох дифузійних насосів у загальному корпусі. У такому насосі зазвичай застосовуються загальний випарник і загальний паропровід для окремих ступенів. Швидкість відкачки насосів визначається швидкістю відкачування першого ступеня з боку входу в насос.

Ефективна робота ступенів насосу залежить від правильного розподілу пари між соплами. Це досягається шляхом підбору розмірів отворів сопел і забезпечення відповідного розподілу температури. В залежності від призначення пароструминних насосів у них застосовуються дифузійні або ежекторні сопла, нерідко одночасно обидва. Зазвичай перший ступінь насоса є ежекторним; це означає, що замість сопла (наприклад, зонтичного), яке утворює конічну поглинальну діафрагму з великою поверхнею, застосовується сопло (або кілька сопел) малого діаметра, які дають короткий, але щільний струмінь пари. Ежекторна щабель дозволяє обмежуватися більш високим тиском форвакууму. На рис.3.9а показано насос НС-86 у зібраному та розібраному станах: I — ежекторний ступінь; II, III — дифузійні ступені. На рис.3.9б показано зовнішній вигляд насоса HS-2 (Varian Co). Для нормальної роботи пароструминного насосу стінки його корпусу необхідно охолоджувати. Найчастіше застосовують два способи охолодження: за допомогою водяної сорочки корпусу і за допомогою змійовика з мідної трубки, напаяного на корпус (рис.3.9). Система охолодження конструюється так, щоб підтримати в робочому стані температуру стінок істотно менше температури конденсації робочої рідини. Для масляних насосів ця температура не повинна

перевищувати 28-30°C. При збільшенні T стінок в результаті недостатнього охолодження насоса відбувається перегрів масла, збільшується швидкість його розкладання (*крекінг*), швидкість дифузії масляних парів в об'єм, який відкачується, і як наслідок, погіршується вакуум. З рис.3.9а видно, що нижня частина насоса (ежекторне сопло) не охолоджується.

Вдосконаленим багатоступеневим масляним насосом є дифузійний насос з фракціонуванням оливи. Під час роботи дифузійного насоса через високу температуру і контакт масла з металами і газами, відбуваються деструкція і часткове розкладання його молекул. Внаслідок цього в насосі утворюються летючі фракції масла, що мають більш високий тиск пари, що погіршує граничний вакуум. Щоб уникнути занадто частої заміни або дистиляції масла процес відділення більш легких фракцій можна проводити в самому насосі. Для цього в насосах з фракціонуванням кожне сопло має окремий паропровід. Причому сопло останнього ступеня, що створює граничний вакуум, масло для якого повинно мати якомога менше летючих компонентів, живиться з центральної частини випарника. Це обумовлено тим, що сконденсована олива проходить до цієї частини випарника найдовший шлях - від конденсатора через всі лабіринти паропроводів. Тому в сопла останніх ступенів, потрапляють більш легкі фракції з високим тиском насичених парів. Граничний тиск в насосі з фракціонуванням на 1-2 порядки нижче, ніж в звичайному дифузійному насосі, і може становити 10^{-5} - 10^{-7} Па.

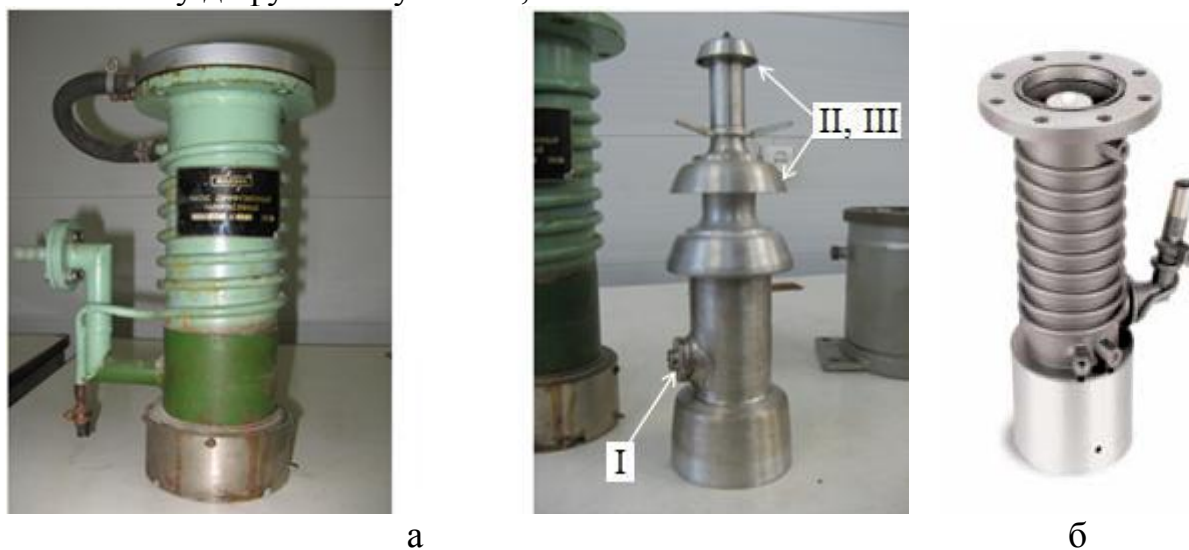


Рис. 3.9. Багатоступеневі паро струменеві насоси.

На рис. 3.10а, показана схема триступеневого насоса, для якого перший ступінь є вхідний, а третій ступінь - вихідний. Будова насоса така, що при нагріванні виникає *розгонка оливи*, тобто відокремлення пари легких фракцій оливи. Вхідний ступінь визначає граничний тиск і швидкість дії насоса. Щільність струменю пари в першому ступені повинна бути малою для забезпечення великої швидкості дифузії газу в струмінь. Для вихідного ступеня, що визначає найбільший випускний тиск насоса, тиск пари робочої рідини має бути великим для отримання струменя високої густини.

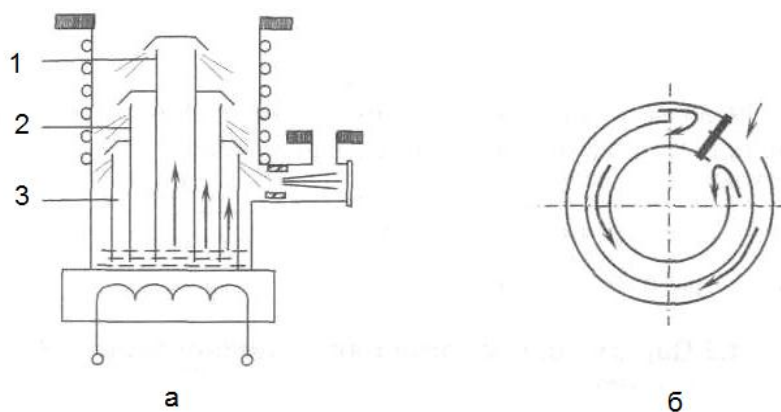


Рис.3.10. Треступневий паромасляний дифузійний насос:
а - розташування паропроводів; б - система фракціонування.

Фракціонування оливи, що стікає в кип'ятильник по стінці корпусу, здійснюється за допомогою лабіринтових кілець (рис. 3.10б), які подовжують шлях масла до надходження в центральну зону кип'ятильника. При цьому легкі фракції, що мають низьку T кипіння, випаровуються в зовнішньому кільці лабіринту і надходять в паропровід 3 (рис.3.10а). Важкі фракції, мають більшу T кипіння, випаровуються у внутрішньому кільці і направляються у високо вакуумний ступінь 1. Важкі фракції забезпечують низький граничний тиск на вході насоса. Для поліпшення граничного вакууму нижня частина насоса не охолоджується, цим самим досягається додаткове знегажування масла.

Промисловістю випускається дифузійні насоси різної продуктивності (характеристики деяких приведено в табл.3.2), які в поєднанні з механічними насосами утворюють високовакуумні відкачувальні агрегати.

Табл.3.2.

Основні характеристики	Марка насоса				
	Н-100/350	Н-160/700	Н-250/ /2500	Н-400/ /7000	Н-630/ /18000
Діапазон роб. тисків, Па	$10^{-3} - 10^{-1}$	$10^{-3} - 10^{-1}$	$10^{-3} - 10^{-1}$	$10^{-3} - 10^{-1}$	$10^{-3} - 10^{-1}$
Швидкість відкачки, $\text{м}^3/\text{с}$	0,25	0,640	1,8	4,9	15,5
Граничний тиск, Па	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Найбільший тиск на вих, Па	27	33	27	27	27
Маса, кг	6,5	16	31	80	280

3.4.4. Робочі рідини для пароструминних насосів. Технічні характеристики пароструминних насосів залежать в першу чергу від їх робочої рідини. До робочих рідин пароструминних насосів висуваються такі вимоги: 1) мінімальна пружність пари при кімнатній температурі і максимальна – при робочій температурі в кип'ятильнику; 2) стійкість до розкладання при

нагріванні; 3) мінімальна здатність розчиняти гази; 4) хімічна стійкість щодо відкачуваних газів і щодо матеріалів насоса; 5) мала теплота пароутворення.

Мінімальна пружність пари при кімнатній температурі потрібна для отримання найменшого граничного тиску насоса. Максимальний тиск пари при робочій температурі кип'ятильника збільшує випускний тиск насоса і зменшує необхідну потужність підігрівача. Стійкість до розкладання робочої рідини при нагріванні впливає на тривалість служби робочої рідини і максимальний випускний тиск. Розчинність газів у робочій рідині приводить до збільшення зворотного потоку газів через сопло разом із паровим струменем. Хімічна стійкість визначає термін служби робочої рідини і накладає обмеження на вибір конструкційних матеріалів насосів. При малій теплоті пароутворення потрібна менша потужність підігрівача насоса.

В якості робочих рідин пароструминних насосів застосовуються *ртуть, мінеральні масла, складні ефіри органічних спиртів і кислот, кремнійорганічні сполуки*. Ртуть (Р-1, Р-2) має такі переваги: не окислюється повітрям, однорідна за складом і не розкладається при робочих температурах насоса, розчиняє малу кількість газів і має високу пружність пари при робочій температурі в кип'ятильнику. Недоліки ртуті: токсичність, хімічна активність щодо кольорових металів, висока пружність пари при кімнатній температурі (10^{-1} Па). Окрім цього, щоб пара ртуті не потрапляла до вакуумної системи, необхідно додатково використовувати виморожуючі пастки (п.6.1), які відокремлюють насос від камери.

Довготривалі пошуки заміни ртуті привели до розробки спеціальної вакуумної оливи. На відміну від ртуті вона не однорідна, а є сумішшю великої кількості фракцій, які мають як різні температури кипіння, тиск насиченої пари. У зв'язку з цим ці оливи за нагрівання розкладаються на легкі та важкі фракції. Утворення легких фракцій збільшує пружність пари і якщо їх не видаляти, то зростає тиск. Для їх видалення слугують пастки.

Мінеральні масла для пароструминних насосів (ВМ-1, ВМ-5) отримують шляхом вакуумної дистиляції продуктів переробки нафти. Вони характеризуються низькою пружністю пари при кімнатній температурі (10^{-6} Па), задовільною термостійкістю, але мають невисоку термоокислювальну стійкість і утворюють смолянисті нальоти на внутрішніх деталях насоса.

Ефіри є продуктами синтезу фталевої й себацінової кислот із спиртами: октоїлі ОФ і ОС. Поліфенілові ефіри (ПФЕ), що складаються з бензольних радикалів, мають дуже низький тиск пари при кімнатній температурі (10^{-9} Па) і високу окислювальну стійкість.

Кремнійорганічні рідини для пароструминних насосів (ВКЖ-94, ПФМС-2) – це полісилоксанові полімерні сполуки, що складаються з функціональних груп $(\text{CH}_3)_2\text{SiO}$. Вони мають високу термоокислювальну стійкість і низьку пружність пари при кімнатних температурах (10^{-5} Па).

Зауваження до роботи з пароструминними насосами.

Пароструминні насоси широко використовують для отримання високого вакууму, тому за вибору того чи іншого насоса слід враховувати наступні практичні зауваження. Парортутні насоси використовуються:

- а) для відкачки приладів, в яких застосовують ртутну пару, наприклад таких, як люмінесцентні лампи, ртутні випрямлячі змінного струму і т.п.;
- б) для відкачки пари, що хімічно діє на органічні рідини;
- в) для відкачки приладів з емітерами, які мають високу емісійну стабільність, тобто фото- або вторинно-емітуючі поверхні;
- г) для відкачування приладів, що призначені для аналізу газів, тобто коли виникає загроза, що пари органічних речовин або продукти їх розкладу можуть затемнити результати аналізу.

Парооливні насоси можна використовувати:

- а) для відкачування вакуумних систем, що призначені для нанесення тонких покриттів;
- б) для відкачки приладів, присутність пари олив з низьким тиском в яких не викликає загрози їх роботі, наприклад електронно-променевих трубок, електронних ламп тощо.;
- в) для вакуумних печей, в яких проводять знегаження, плавлення тощо.

Найчастіше у насосах використовують мінеральні масла. Це економічно вигідно. Кремнійорганічні рідини застосовуються в системах із частим напуском атмосферного повітря. Ефіри, вартість яких ще велика, застосовуються для систем, де потрібно отримання надвисокого вакууму.

3.5. Іонні насоси

Розробка іонних насосів була викликана бажанням отримувати високий вакуум, в якому була б відсутня пара робочої рідини, що завжди присутня за використання парооливних насосів. Якщо молекули газу, що за визначенням є електрично-нейтральними частинками речовини, перетворити в додатні іони за допомогою, наприклад, ударної іонізації, то під впливом прикладеного зовнішнього електричного поля їх можна спрямувати до випускного патрубку, де вони створять збільшену, ніж на впускному патрубку, концентрацію. Якщо на випускному патрубку такого насоса створити необхідний попередній вакуум механічним або пароструминним насосом, то отримаємо іонну відкачку.

Отже, направлений рух попередньо заряджених молекул газу під дією електричного поля є основою роботи іонних насосів. Для передачі молекулам імпульсу в напрямку насоса попереднього розрідження використовується вплив постійного електричного поля. Нейтральні молекули іонізуються α -, β -, і γ -випромінюванням. Найбільш ефективно застосування електронів. Газ, що надходить в насос (рис.3.11), іонізується в просторі іонізації 1, а потім за допомогою прискорювальних електродів 2, до яких прикладена різниця потенціалів U (В), направляється до вихідного патрубку насоса. Тут іони нейтралізуються і відкачуються насосом попереднього вакууму.

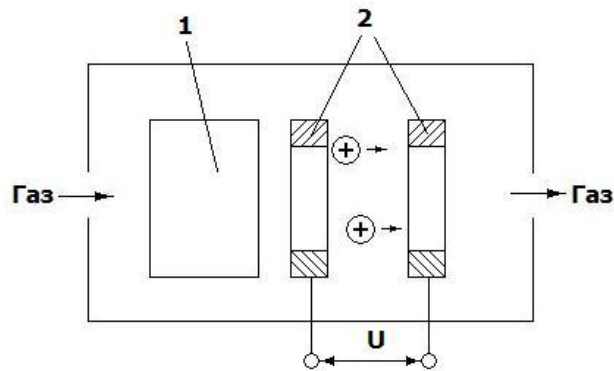


Рис.3.11. Схема іонного насоса.

Швидкодія металевих іонних насосів може досягати 7000 л/с, а створений вакуум має тиск $(0,8 - 6) \cdot 10^{-4}$ Па при умові, що насосом попереднього розрідження підтримується тиск $(3 - 5) \cdot 10^{-2}$ Па. Через труднощі іонізації газів при низькому тиску насоси отримали мале поширення. Також нагрівання катода викликає випаровування вольфраму і катод швидко руйнується. Тому більш широке практичне застосування отримали іонно-сорбційні насоси, про які мова піде далі.

Тестові завдання до розділу 3.

1. На якому принципі працюють молекулярні насоси?
 - 1 – на стисканні та переміщенні об'єму газу;
 - 2 – на передачі імпульсу молекулам газу обертових частин насоса;
 - 3 – на поглинанні молекул газу тонким шаром осажденного метала.
2. Основна перевага механічних молекулярних насосів:
 - 1 – отримання вакууму без використання робочих рідин;
 - 2 – селективність до природи газу;
 - 3 – велика швидкодія.
3. Основні елементи турбомолекулярного насоса:
 - 1 – корпус, диски на роторі, що обертаються;
 - 2 – корпус до якого пришліфовані рухомі пластини.
 - 3 – корпус, диски статора між якими обертаються диски що укріплені на роторі.
4. Насос ТМН-500 складається з:
 - 1 – ротора і статора у вигляді дисків;
 - 2 – камери і поршня;
 - 3 – ротора у вигляді полірованого диска і статора у вигляді спіралей.
5. Які основні недоліки турбомолекулярних надвисоковакуумних насосів?
 - 1 – громіздкість;
 - 2 – тривалий час запуску;
 - 3 – легко виходять з ладу і неможливий ремонт в лабораторних умовах.
6. Граничний тиск турбомолекулярних насосів:
 - 1- 10^{-10} Па; 2- 10^{-6} Па; 3- 10^{-8} Па.
7. Який ступінь розрідження газу з боку форвакууму потребують ТМН?
 - 1 – 10^{-4} мм рт. ст.; 2 – 10^{-2} мм рт. ст.; 3 – 10 мм рт. ст.
8. На чому заснована дія пароструминного високовакуумного насоса?
 - 1 – на передачі енергії молекулам газу що відкачується.

- 2 – на звуженні об'єму газу що перебуває в насосі.
 3 – на дифузії газу у струмінь пари, що приводить до переміщення молекул газу до вихідного патрубка насосу.
9. Необхідні елементи пароструминних насосів:
 1 – робоча рідина; нагрівач; охолоджувач.
 2 – сопло; робоча рідина; нагрівач; охолоджувач.
 3 – іонізатор; нагрівач; охолоджувач, сопло.
10. Які переваги турбомолекулярного насосу над пароструминними насосами?
 1 – відсутність оливи;
 2 – одержання граничного вакууму 10^{-10} Торр;
 3 – стабільність роботи при відсутності оливи для її струменя.
11. Як зменшити потік зворотної дифузії з парооливного насосу у вакуумну камеру?
 1 – застосуванням пасток;
 2 – вибором певної оливи для насосу;
 3 – тривалою відкачкою.
12. Який тип течії газу використовується в дифузійних пароструминних насосах?
 1 – в'язкісний; 2 – молекулярно-в'язкісний; 3 – молекулярний.
13. Яким чином приєднують обертовий механічний насос до пароструминного?
 1 – впускним патрубком пароструминного до випускного патрубка обертового;
 2 – впускним патрубком обертового до випускного патрубка пароструминного;
 3 – паралельно один одному (обидва впускним патрубком до камери).
14. Як залежить швидкодія вакуумного дифузійного насосу від тиску газу?
 1 – лінійно; 2 – за квадратичним законом; 3 – не залежить.
15. Максимальний випускний тиск пароструминного насоса P_v при збільшенні потужності підігріву:
 1 – зростає; 2 – не змінюється; 3 – спадає.
16. Механізм захоплення газу в ежекторних насосах:
 1 – турбулентно-в'язкісний;
 2 – в'язкісний;
 3 – дифузійний.
17. Який граничний вакуум створюють пароструминні насоси?
 1 – 10^{-3} Па; 2 – 10^{-5} Па; 3 – 10^{-8} Па.
18. Чим відрізняється розгончний від простого парооливного насоса?
 1 – збільшенням кінетичної енергії струмені парів оливи;
 2 – зменшенням маси легких фракцій оливи і покращенням граничного вакууму;
 3 – автоматичним розділенням важких від легких фракцій оливи з метою забезпечення участі у створенні високого граничного вакууму важкими фракціями.
19. Що називається крекінгом оливи?
 1 – видалення легких фракцій оливи;
 2 – збагачення оливи на важкі фракції;
 3 – утворення легких і важких фракцій.
20. Які є способи розділу олив на легкі і важкі фракції в пароструминних насосах?
 1 – в рідкій фазі;
 2 – в газоподібній фазі;
 3 – в охолодженому стані.
21. Недолік робочої оливи ВМ-5 для пароструминних насосів:
 1 – низька термостійкість; 2 – токсичність; 3 – невисока термоокислювальна стійкість.
22. Парорутні насоси можна використовувати:
 1 – для відкачки пари, що хімічно діє на органічні рідини;
 2 – для вакуумних печей, в яких проводять знегаження, плавлення або спікання;
 3 – для відкачки приладів з емітерами, які мають високу емісійну стабільність.
23. Стійкість до розкладання робочої рідини при нагріванні впливає:

- 1 – на максимальний випускний тиск; 2 – на потужність підігрівача; 3 – швидкодію.
- 24. Який механізм захоплення газу в бустерних насосах?**
- 1 – в результаті турбулентно-в'язкісного перемішування вихорів пари із частинками газу;
2 – в'язкісне захоплення в ламінарний струмінь;
3 – дифузійний механізм проникнення молекул газу в струмінь.
- 25. Переваги іонного насоса:**
- 1 – відсутність попереднього розрідження;
2 – відсутність робочої рідини;
3 – низький граничний тиск.
- 26. Іонний насос відноситься до:**
- 1 – електророзрядних; 2 – дифузійних; 3 – молекулярних.
- 27. Для чого потрібна мінімальна пружність пари при кімнатній температурі?**
- 1 – для отримання найменшого граничного тиску насоса;
2 – для збільшення випускного тиску насоса;
3 – для меншої потужності підігрівача насоса.
- 28. Яка має бути залежність вхідного тиску і густини пари в пароструминному насосі?**
- 1 – чим менший тиск газу на вході насоса, тим більшою повинна бути щільність пари у струмені;
2 – чим вищий тиск газу на вході насоса, тим більшою повинна бути щільність пари у струмені;
3 – чим вищий тиск газу на вході насоса, тим меншою повинна бути щільність пари у струмені.

4. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ МЕТОДИ ОТРИМАННЯ ВАКУУМУ. НАСОСИ ДЛЯ ВИСОКОГО І НАДВИСОКОГО ВАКУУМУ

Фізико-хімічні методи отримання розрідження дозволяють для роботи в області високого і надвисокого вакууму створювати насоси з кращими, ніж у механічних, техніко-економічними показниками. Суттєва перевага фізико-хімічних насосів полягає в можливості усунення забруднення камери, що відкачується, парами робочих рідин, які присутні в багатьох механічних насосах для змащення і герметизації. Тому вивчення явищ, які відбуваються на межі газ – тверде тіло, мають для ВТ дуже важливе значення.

4.1. Сорбція і її види

Сорбцією називають процес поглинання газів або пари твердими тілами чи рідиною. Відомо, що тверді тіла поглинають значну кількість газу. Сорбційні явища суттєво впливають на технологічні операції особливо у вакуумі. Їх розділяють на три такі види, як *фізична адсорбція, хемосорбція або хімічна адсорбція і абсорбція газів металами*. У зв'язку з цим речовину, яка поглинає газ, називають *сорбентом, адсорбентом або абсорбентом*, а речовину, яка поглинається - *сорбітом, адсорбітом або абсорбітом*.

4.2. Фізична адсорбція і її головні закономірності

Фізичною адсорбцією називають явище поглинання газу у вигляді дуже тонкої плівки, яка створюється на поверхні твердого тіла. Фізична адсорбція проявляється в такому досліді. Розщепимо листок слюди на дві частини. Якщо одразу складемо знову частини, то вони з'єднаються в одне ціле. Але з'єднання не виникне, якщо частини залишити в повітрі на декілька хвилин, через утворення на їх поверхні адсорбованих шарів азоту і кисню.

Фізична адсорбція газу твердим тілом відбувається внаслідок взаємодії між молекулами (атомами) газу та активними адсорбційними центрами, які створюються поверхневим полем твердого тіла. Сили цієї взаємодії можна ототожнити із силами Ван-дер-Ваальса, природа яких зводиться до взаємодії між молекулярними диполями. Фізична адсорбція це утримання молекул газу електричним полем поверхні. При фізичній адсорбції маса поглинутого газу пропорційна площі поверхні тіла, а не його об'єму. Пористі тіла мають дійсну площу поверхні значно більшу, за таку, що здається. З цієї причини високу адсорбційну властивість мають порошкоподібні або подрібнені речовини. У них більше адсорбційних центрів.

Адсорбція є явищем екзотермічним з наявністю газової фази, а тому протікає дуже швидко. Адсорбція *зростає з підвищенням тиску або зниженням температури*. При нагріванні тіла з одночасним зниженням тиску поглинутий газ легко видаляється. Отже, адсорбція є зворотним явищем, якщо створені відповідні умови. Адсорбовані молекули безперервно залишають поверхню тіла, але також безперервно інші молекули газу знову адсорбуються. Виникає динамічна рівновага, за якою відповідна кількість молекул завжди залишається на поверхні тіла. Зворотне виділення речовиною адсорбованого газу називають *десорбцією або газовіддачею*. Звідси впливає практичний висновок: щоб рівноважний стан відповідав найбільшій можливій кількості

адсорбованого газу, необхідно знижувати температуру адсорбенту, і навпаки, для видалення адсорбованого шару - підвищувати.

Між молекулами речовини і молекулами газу при адсорбції існує спорідненість. Для відповідного тіла адсорбція залежить від природи газу, причому він не змінюється хімічно. Фізична адсорбція з часом досягає насичення. Після покриття всієї поверхні тіла плівкою адсорбованого газу (зазвичай товщиною один моносар) адсорбція припиняється. У зв'язку з цим перед використанням адсорбенти потребують *активації*, тобто очищення.

4.3. Хімічна адсорбція

При поглинанні газу поверхнею тіла іноді між ними виникає взаємодія у вигляді хімічної реакції, тобто вступають в дію сили хімічного зв'язку, які відрізняються від сил Ван-дер-Ваальса і перевищують їх. У цьому разі молекула при адсорбції віддає або отримує від поверхні електрон, розщеплюється на атоми або радикали, які зв'язуються із поверхнею окремо. Явище поглинання газів поверхнею тіл в результаті хімічного реагування між молекулами тіла і молекулами газу називають *хімічною адсорбцією* ("*хемосорбцією*"). Хемосорбція відбувається з поглинанням тепла, тому для неї потрібно надати молекулам газу додаткової енергії. Звідси виходить і принципова відмінність між фізичною і хімічною адсорбцією. Хемосорбція при недостатньо високих температурах зовсім не виникає і, навпаки, швидко зростає при збільшенні температури, тоді як фізична адсорбція ефективніше проявляється при низьких температурах. Хемосорбція, як правило, *не зворотній процес* і для видалення поглинутих газів потребує нагрівання до більш високих температур. Хімічний склад десорбованого (виділеного) газу може відрізнятися від адсорбованого. У результаті хімічної адсорбції можуть виникнути зміни властивостей поверхні тіла. Наприклад, O_2 , що адсорбується на W , в результаті хемосорбції знижує емісію електронів у сотні разів і для його видалення необхідно нагріти метал до $1700^{\circ}C$.

Адсорбція і десорбція відбуваються одночасно. При практичній роботі доводиться, як правило, мати справу із сумішшю різних газів та матеріалами, які мають різні сорбційні властивості. Причому адсорбція – це перший і необхідний крок до проникнення газу всередину твердого тіла.

4.4. Абсорбція газів металами

При поглинанні газів металом молекули газу можуть проникати всередину між його атомами і приймати участь в тепловому руху адсорбента. Так виникає твердий розчин. Розчинність газів металом називають *абсорбцією*. При абсорбції виникає поглинання газу повним об'ємом металу. Отже, *абсорбція – це об'ємне поглинання газів*.

Кількість абсорбованого газу зростає пропорційно об'єму тіла, залежить від природи металу і збільшується при зростанні його пористості. Подібно до фізичної адсорбції абсорбція газів металами з часом досягає насичення. За відповідних умов метал може поглинати гази в кількості за об'ємом, що в сотні разів перевищує його власний. Метали можна назвати губкою для газів. Наприклад, паладій за нормальних умов ($20^{\circ}C$ і 760 Торр) поглинає до 900

об'ємів водню, цирконій - 1500, а титан - до 1800. Останні два метали використовують в якості *газопоглиначів* і за необхідності розміщують у середині електровакуумних приладів. Але такі метали, як золото, цинк і кадмій не абсорбують водень. У той же час кисень поглинається більшою частиною металів з виникненням окислів. Так, з міддю кисень утворює суцільні зерна окислу, які при відпалюванні міді в атмосфері водню або у вакуумі відновлюються, що призводить до виникнення пористості й крихкості металу. Ось чому для електровакуумної промисловості дуже важливе використання безкисневої міді з високою провідністю, яку отримують плавкою у вакуумі.

Абсорбція газів металами потребує значно більше часу, ніж фізична адсорбція. Досягнення насичення при абсорбції виникає за час від декількох хвилин і годин при нагріванні або навіть до декількох днів у холодному стані, тоді як при адсорбції достатньо хвилини. Така різниця пояснюється тим, що адсорбція відбувається на поверхні тіла, тоді як абсорбція газів металами відбувається шляхом їх дифузії між атомами в середину металу.

Об'єм газу, що абсорбується за нормальних умов при досягненні насичення грамом або кілограмом металу, називають *розчинністю*. При абсорбції газів металами можуть виникати два види поглинання: *поглинання з утворенням твердого розчину і поглинання з утворенням нової хімічної сполуки*. При утворенні твердого розчину молекули газу проникають у кристалічну ґратку твердого тіла та залежно від того, дисоціюють вони на атоми чи ні, розчинність газу пропорційна або квадратному кореню з тиску, або прямо пропорційна. В неметалах молекули газу при розчиненні не дисоціюють на атоми і розчинність при сталій T пропорційна тиску. Розчинність може підвищуватися або знижуватися зі збільшенням T . При достатньо великій амплітуді теплових коливань молекули розчиненого газу зриваються із зайнятих місць і дифундують на нові (у бік своєї меншої концентрації). Взагалі однозначної залежності розчинності газів від T для різних металів немає. Наприклад, розчинність водню із підвищенням T в металах групи A (Ni, Fe, Al, Ag, Mo, W, Pt) зростає, а металах групи B (Ti, V, Zr, Hf, Th, Ta) – падає. Матеріали групи A застосовуються в якості конструкційних у вакуумній техніці, групи B – це активні адсорбенти.

Залишковий газ може вступати у хімічну реакцію з твердим тілом. Реакція закінчується (в залежності від T і P) коли настає рівновага між кількістю газу, який реагує, і кількістю газу, який виділяється зворотно через дисоціацію хімічної сполуки, яку утворив газ. Нова хімічна сполука входить до складу твердого тіла, розчиняючись у ньому, або ж у вигляді плівки на поверхні (окисли).

4.5. Закони десорбції

Дослідним шляхом встановлені наступні закономірності газовиділення.

1) Десорбція зростає з пониженням тиску, але навіть при дуже низькому тиску в твердому тілі ще залишається помітна кількість розчиненого газу.

2) Десорбція зростає з підвищенням температури тіла, якщо одночасно з нагріванням здійснюють зниження тиску. Дійсно, підвищення температури

збільшує тепловий рух атомів матеріалу і молекул розчиненого газу, що полегшує їх відрив і буде наближати розподіл молекул до рівноваги з тиском газу в оточуючому вакуумному середовищі.

3) На десорбцію впливає природа металу і газу (спорідненість їх молекул). Мала молекулярна маса водню сприяє легкості його дифузії і видалення з металу. У зв'язку з цим метали перед введенням в електровакуумний прилад спочатку прожарюють в атмосфері H_2 при $900^\circ C$ протягом 15-20 хв. Водень відновлює окисли, витісняє абсорбовані гази, які важко видаляються. Далі водень займає їх місця в металі, а потім легко видаляється у процесі відкачки.

4.6. Знегажування і газопоглиначі

У ВТ для виготовлення трубопроводів, кранів, пасток, корпусів приладів, насосів, манометрів, ізоляторів електричних введень широко застосовується скло марок С-47, С-87. Дослідом установлено, що скло утримує ряд газів і це утримання здійснюється головним чином на поверхні завдяки фізичній адсорбції. Серед адсорбованих газів завжди є водяна пара, вуглекислий газ (в невеликих кількостях кисень), азот і окис вуглецю. Тому створення вакууму в будь-якому скляному електровакуумному приладі має починатися із *знегажування* – операції вивільнення скла від газів. Чим більше у склі лугів, тим більше в ньому міститься двоокису вуглецю і води. Пара останньої негативно впливає на розжарені металеві деталі. Знегажування є кращим, коли буде вища температура нагрівання. Але скло стає м'яким вже при порівняно низькій температурі. Тому ще *І.Ленгмюр* запропонував прогрівання виконувати в певній послідовності. Спочатку знегажування виконують при T_1 , що на $50^\circ C$ менша від T м'якості скла, щоб краще видалялися гази з глибинних шарів скла. Потім продовжують процес при T_2 на $100^\circ C$ менше від першої, щоб більш ретельно гази видалялися з поверхні. Оскільки T_1 наближена до температури, коли скло стає м'яким, то до T_2 наближаються повільно, щоб швидке охолодження не викликало виникнення напружень, а потім і тріщин.

Велика кількість газів міститься в металах, куди вони потрапляють в результаті поглинання при виплавленні, розливі й обробці металів. Такі метали, як мідь, вольфрам, нікель, залізо, титан тощо активно поглинають H_2 , N , CO , CO_2 , O_2 (у складі окислів), а в міді присутній ще й сірчаний газ. Кількість газів, яку містять метали, розраховують відповідно до 100 г металу і наводять в $см^3$. Ця величина для Mo і W не перевищує $0,5 - 1$ $см^3 / 0,1$ кг; для Ni - 10 $см^3 / 0,1$ кг, а для гірших зразків Fe вона може досягати декількох сотень $см^3$ на 100 г металу. Знегажування металів здійснюють нагріванням у вакуумі або в атмосфері водню. З підвищенням T швидкість виділення газів різко зростає. Чим краще газ розчиняється в металі при поглинанні, тим швидше він може бути видалений при десорбції. Швидкість газовиділення залежить від гранично допустимої температури знегажування відповідного металу. Оскільки видалити з металу всі поглинуті гази неможливо, то знегажування вважають задовільним, якщо в металевих деталях вакуумних приладів

залишкова кількість газів не перевищує $1 \text{ см}^3 / 0,1 \text{ кг}$. Повністю звільнити від газів метали і інші матеріали ВТ, або які досліджуються у вакуумі, неможливо. Тому, наприклад, в електровакуумних приладах, слід чекати, що із часом тиск зросте через виділення газів деталями і стінками об'єму. У зв'язку з цим виникає необхідність використовувати спеціальні матеріали, які називаються *газопоглиначами* або *гетерами*. Гетери при розміщенні їх усередині вакуумного приладу підвищують вакуум, створений за відкачки, і поглинають гази, які виділяються при роботі приладу. Поглинанню газів твердим тілом сприяють три фактори: *поверхня гетера, його температура, тиск газу*.

Якщо речовина піддається випаровуванню у вакуумі, то в пароподібному стані вона стає дуже ефективним поглиначем. Утворений на стінках свіжий, чистий шар речовини - активний поглинач (особливо, якщо його відновлювати). Гетери – це здебільшого метали, які поділяються на такі, що *випаровуються і не випаровуються*. Газопоглиначі, що випаровуються, виготовляють у вигляді маленьких клаптиків металу, який можна легко випарити. Їх розігрівають після відкачування так, щоб після випарювання і конденсації на стінці об'єму створювався наліт (плівка) у вигляді дзеркальця, але не осідав би на електродах і не погіршував ізоляційні властивості у середині приладу. Ці газопоглиначі повинні мати високу поглинальну здатність, особливо щодо O_2 при Т, починаючи від 20°C і до 200°C , а також малу пружність пари ($<10^{-5} \text{ Па}$). Відповідним вимогам до таких гетерів задовольняє невелика кількість металів. Це у першу чергу Mg, Ba, Al. Найкращим з них є Ва, незважаючи на низьку хімічну стійкість.

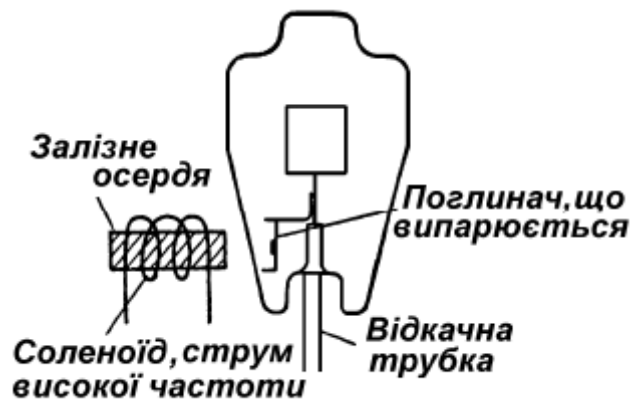


Рис.4.1. Гетер у електровакуумному приладі.

Технологія випарювання зображена на рис.4.1. Розпилення металу виконують місцевим нагріванням струмом високої частоти, який підводять через соленоїд. Утримувач газопоглинача доводять до червоного розжарення, метал газопоглинача випарюється і одразу конденсується на протилежній ділянці стінки колби, утворюючи там дзеркальний наліт. Його можна спостерігати на поверхні скляних радіоламп або манометричних ламп. Ця плівка і є гетер, який адсорбує гази. Залежно від тиску змінюється колір плівки, з'являться плями і розводи. Якщо гетер стає білого кольору, значить він окислився (розгерметизація). Барій поглинає всі гази, окрім інертних.

Використовується Ва у сполуках з Th, Ti, Al. Також застосовується Mg (світла плівка, а у Ва – темна), хоча він поглинає тільки кисень.

Якщо випарювання є небажаним при побоюванні забруднення або зниження ізоляційних якостей електровакуумного приладу, використовують газопоглиначі, що не випарюються: листовий Ta, Ti або Zr порошковий, з яких виготовляється функціональний елемент приладу, наприклад, анод. Ще використовують спеціальний сплав церію і торію - *цето*, який проявляє свої властивості в холодному стані, на відміну від перших, робоча температура яких $T=400-800^{\circ}\text{C}$. Ефективним поглиначем є сплав *циал*, що містить 84% Zr і 16% Al. Циал добре поглинає і утримує все газу в діапазоні $T=400-600^{\circ}\text{C}$. Швидкість поглинання азоту цим матеріалом в кілька десятків разів перевищує швидкість поглинання азоту чистим цирконієм.

4.7. Сорбційні вакуумні насоси

Вище ми побачили, що при взаємодії газів з твердими тілами може відбуватися 2 ефекти - це поглинання і виділення газу. Поглинання газу можна використовувати для відкачування; виділення - для знегажування. Насоси, що працюють на фізико-хімічному зв'язуванні газів діляться на *сорбційні*, в яких використовуються різні види поглинання газів, і *конденсаційні (криогенні)*, в основу роботи яких покладена конденсація газів на охолоджених до наднизьких температур (20 K і нижче) поверхнях.

Дія сорбційних насосів заснована на зв'язуванні газів і пари на поверхнях і всередині матеріалів, спеціально для цього підготовлених. Електрофізичні насоси всіх типів є накопичувальними, тобто газу, що відкачується поглинається в насосі у вигляді хемосорбційних шарів, хімічних сполук і «замурованих» атомів. У таких насосах випускний патрубок відсутній. Хімічно активна поверхня, яка поглинає газу, може бути організована формуванням пористої структури з високорозвиненою поверхнею, одноразовим або періодичним нанесенням плівки поглинаючого металу, безперервним відновленням поверхні.

Поглинання газів хімічно активними металами може відбуватися в результаті хімічної взаємодії і фізичної сорбції. До газобирачів, призначених для отримання низьких тисків, висувають такі основні вимоги:

- універсальність хемосорбційних властивостей по відношенню до максимальної кількості газів;
- максимальна поглинальна здатність, тобто максимальний обсяг газів, утримуваних поглиначем;
- малий тиск пари матеріалів гетерів і тиск дисоціації продуктів реакції;
- стійкість матеріалу поглинача на повітрі після прогріву в вакуумі і висока хімічна активність;
- легке знегажування, тобто поглинач повинен містити невелику кількість газів, які легко виділяються при нагріванні в вакуумі.

Видно, що вибір металів для гетерів в насосах залежить від багатьох, факторів, серед яких одним з найважливіших є їх хімічна активність.

Матеріалами для гетерів в насосах промислового виробництва служать тугоплавкі метали, такі, як молібден, тантал, цирконій і титан, оскільки виготовлені з них нитки або стрічки можуть розжарюватися безперервно і протягом тривалого часу (до тих пір, поки не перегорять) випаровувати з поверхні метал. Для деяких металів, найбільш широко вживаних в якості гетерів, в табл.4.1 наведені їх сорбційні ємності. Відзначимо, що значення сорбційної ємності представлено лише для демонстрації можливостей гетерів, оскільки ці дані дуже суперечливі і істотно залежать від умов експерименту: способу нанесення плівки, температури випаровування, температури насоса під час відкачування і навіть від способу вимірювання. Серед наведених металів найкращим для використання в насосах є титан. Швидкість відкачування насоса визначається головним чином площею активної титанової плівки. Таким чином, швидкість відкачування залежить від швидкості осадження плівки титану, і для того щоб вона залишалася постійною в міру зв'язування відкачуваного газу і витратами плівки, необхідно випаровувати відповідну кількість гетера.

Табл.4.1.

Сорбційна ємність деяких металів-гетерів, Па м³ г⁻¹ (Па м³ м⁻²)

	CO		CO ₂		H ₂		N ₂		O ₂	
Плівка Ва	0.95	0.95	0.8	0.8	6.0	6.0	0.43	0.43	6.6	
Брусок Се			0.3- 6.0		6.0- 8.5		0.43- 2.1		2.8- 6.7	
Плівка Мо		0.2				0.07		0.07		0.7
Плівка Та		0.1				0.7		0.13		1.3
Брусок Ті			6.6				21.3		12.0	
Плівка Ті		0.19- 0.86		0.013 -0.93		0.29- 8.6		0.01- 0.45		0.93
Брусок Zr	0.48		0.4		1.8		0.2		0.26	

Частинка відкачуваного газу, яка взаємодіє з сорбуючою поверхнею, може піддаватися пружному або непружному розсіюванню, імплантуватися всередину або сорбуватися на поверхні. У загальному випадку взаємодії, що відбуваються при цьому, визначаються видом частинки (нейтральний атом або заряджений іон) і її енергією, а також енергетичним станом і природою активної поверхні. Тому механізми відкачки сорбційними насосами поділяються на наступні: *сорбцію, іонну відкачку і «замуровування» іонів*. Фізично сорбуються тільки молекули інертних газів. При відкачці активних газів переважає механізм утворення хімічних сполук (оксидів, нітридів, гідридів). Ці хімічні сполуки мають досить низькі тиски парів і дисоціюють лише при дуже високих температурах.

Іонна відкачка - поглинання іонізованих молекул газу в результаті впровадження прискорених електричним полем іонів в матеріал гетера з подальшою дифузією. Іони хімічно активних газів можуть утворювати хімічні з'єднання, а іони інертних газів утримуються в кристалічній решітці фізичними

зв'язками. Інертні гази при нормальній температурі на відміну від хімічно активних газів впроваджуються в поверхню твердого тіла тільки в *іонізованому* стані при певній енергії. При безперервному іонному бомбардуванні гетера частина раніше захоплених іонів газу в результаті катодного розпорошення може повертатися в об'єм, який відкачується. При поглинанні гетером іонів суміші різних газів можливе заміщення одного газу іншим. Енергія зв'язку іонів з поверхнею близька до енергії зв'язку молекул при хемосорбції. При постійній швидкості іонів кількість поглиненого газу прямо пропорційна силі розрядного струму і часу його проходження.

«Замуровування» частинок грає істотну роль при відкачці інертних газів, хоча і не впливає на загальну швидкість відкачування насоса. При нормальній температурі час сорбції молекул інертного газу занадто малий, щоб цей механізм відкачування міг бути помітним. Падаючий на поверхню атом, знаходиться на поверхні значний час, достатній для «замуровування» його шарами гетера, який розпорошується. При збільшенні негативного потенціалу поверхні сорбента та швидкості розпорошення гетера цей ефект стає більш значним і швидкість відкачування зростає.

Ефективність роботи насосів визначається:

- 1) правильністю вибору форми насоса, що забезпечує підведення газу до поверхні гетера;
- 2) кількістю гетера і ступенем його корисного використання.

За способами взаємодії гетера і газів розрізняють *випарні, іонно-сорбційні і магнітні електророзрядні (магніторозрядні)* насоси. В першому випадку гетер випаровується при нагріванні (*випарні або сублімаційні насоси*). В другому випадку для посилення як поглинання, так і розпилення активного металу, використовується іонізація газів - *іонно-сорбційні (іонно-гетерні) насоси*. В *магніторозрядних* насосах гетер розпорошується під дією швидких іонів утворених в електромагнітному полі. Сорбційні насоси, в яких поглиначем є речовина, яка здатна ефективно поглинати гази шляхом лише фізичної адсорбції (цеоліти, активоване вугілля) називаються *адсорбційними*.

Конденсаційні насоси різняться за родом використовуваних зріджених газів, які застосовуються для охолодження поверхні - водневі, гелієві, азотні.

Основні параметри насосів, що працюють на принципі сорбції газів:

- випарні гетерні ($P_{гп}=10^{-7}-10^{-11}$ Па; $S_{н}=2-20000$ л/с)
- іонно-гетерні ($P_{гп}=10^{-7}-10^{-11}$ Па; $S_{н}=2-50000$ л/с)
- магнітні електророзрядні ($P_{гп}=10^{-7}-10^{-9}$ Па; $S_{н}=2-10000$ л/с)
- адсорбційні ($P_{гп}=10^{-1}-10^{-3}$ Па; $S_{н}=1-10$ л/с)
- конденсаційні (криогенні) ($P_{гп}=10^{-10}-10^{-13}$ Па; $S_{н}=50-100000$ л/с)

Можна побачити, що окрім адсорбційних насосів, усі інші створюють високий і надвисокий вакуум. У своїй переважній більшості електрофізичні насоси досить прості в конструктивному вирішенні (відсутність мікронної точності виготовлення деталей) та експлуатації, вони безшумні, надійні, довговічні, не потребують неперервного форвакуумного відкачування. Нижче розглянемо їх конструктивні особливості.

4.7.1. Випарні насоси. Вони працюють на принципах фізичної адсорбції, хемосорбції, хімічних реакцій і розчинення у твердій фазі гетера. В них гетер нагрівають до високих температур, що забезпечує достатню швидкість його сублімації. Типова схема випарного насоса показана на рис.4.2. Насос складається з корпусу 4, в якому розташовується випарник 5. Атоми активного металу (титан, барій, тантал, молібден, цирконій) що емітуються з випарника, конденсуються на екранах 2 (в деяких моделях і на стінках корпусу) і забезпечують відкачку хімічно активних газів за рахунок фізичної, хімічної адсорбції, хімічних реакцій і розчинення в твердій фазі. Екран 3 захищає об'єкт, що відкачується від проникнення парів матеріалу випарника. Екрани 2 для підвищення швидкості відкачки можуть охолоджуватися рідким азотом. Граничний тиск у випарних насосах 10^{-7} Па, а при охолодженні рідким азотом 10^{-11} Па. Верхня межа робочих тисків 0,01 Па. Максимальна швидкість дії при відкачці водню досягає 20000 л/с.

Застосування насосів випарного типу неефективно при відкачці продуктів органічного походження. А мале значення теплоти сорбції інертних газів, яке характерне для гетерних матеріалів, унеможливує ефективну відкачку цих газів випарними насосами. Тому за необхідністю застосовують іонізацію інертних газів електронним пучком.

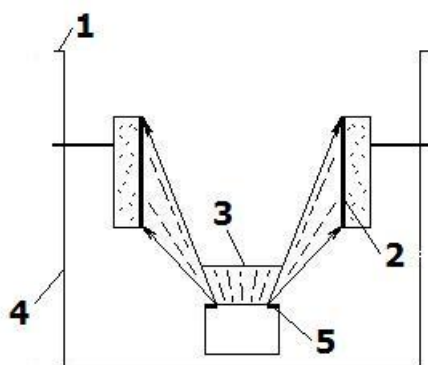


Рис.4.2. Схема випарного насоса.

Конструкція випарних насосів в основному визначається типом випарника 5. Випарники бувають прямого розжарення, з опосередкованим підігрівом, електронно-променеві та дугові. Найчастіше використовується субліматор – вольфрамовий стрижень з намотаним титановим дротом.

Перевагами випарних насосів є їх безшумність в роботі, відсутність вібрації, можливість для більшості конструкцій працювати за будь-якої просторової орієнтації, їх не виводить з ладу аварійне відключення. Вони особливо ефективні при відкачуванні великої кількості активних газів. Титан хімічно зв'язує O_2 , N, H_2O , утворюючи окисли, нітриди, які мають дуже малий тиск пари. Оскільки швидкість покриття поверхні металу газом пропорційна P , то для запобігання швидких витрат Ti іонно-сорбційні насоси включають при $P=10^{-3}$ Па (необхідно створювати попереднє розрідження).

Параметри сучасних сублімаційних насосів (АВТО-20М, НІБ) дозволяють їх використати для відкачування прискорювачів і установок ТЯР, де ефективно виділяється водень (швидкодія за воднем досягає 500000 л/с).

4.7.2. Іонно-сорбційні насоси (іонно-гетерні). Це вакуумні насоси, в яких хімічно активні гази видаляються за рахунок сорбції їх гетером, а інертні гази – за механізмом іонного відкачування. В сучасних насосах суміщені іонні і хемосорбційні способи відкачування. Вони здатні створювати розрідження $10^{-7} \div 10^{-11}$ Па.

Іонно-сорбційні насоси розрізняються за типом розпилення гетера:

1) насоси із незалежним розпиленням активного матеріалу (з гарячими електродами); 2) – насоси із саморегульованим розпиленням активного матеріалу (з холодними електродами).

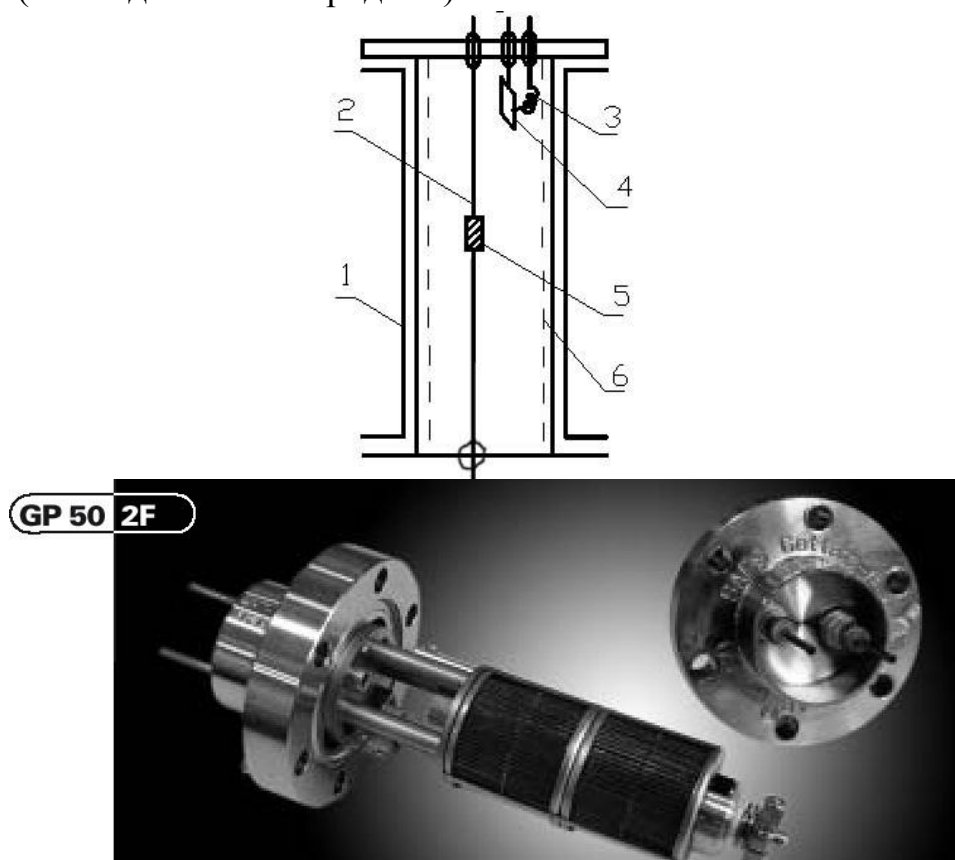


Рис. 4.3. Схема іонно-сорбційного насоса орбітронного типу: 1 – корпус; 2 – анод; 3 – катод; 4 – захисна екранна пластина; 5 – титан (титановий випарник); 6 – сітка.

Орбітронний іонно-сорбційний насос (орбітрон)- приклад насосу із незалежним розпиленням гетера. В орбітроні (рис.4.3) один і той же пучок електронів використовується для іонізації газів та випаровування титану з твердої фази. Принцип роботи і конструкція насосу наступні. Анод 2 (виготовлений з вольфрамового дроту) разом із корпусом 1 утворюють циліндричний конденсатор з симетричним електростатичним полем. Між корпусом та анодом подається напруга від 2 до 7 кВ. На катод 3 (тонка нитка з W) подається невеликий додатній потенціал від 50 до 200В. Катод

закривається екранною пластиною 4 (для екранування анода і запобігання прямолінійному руху електронів), на яку подається потенціал зміщення, внаслідок чого електрони, що вилітають із катода, мають осьову, радіальну й тангенціальну складові швидкості (рухаються по спіральній траєкторії). Малі розміри анода, додатний потенціал на катоді, наявність пластини 4 змушують електрон, що вийшов із розігрітого катода 3, внаслідок термоелектронної емісії, досить довго рухатися у напрямку анода по траєкторіях різноманітних конфігурацій. На своєму шляху (декілька м) електрон стикається з атомами та молекулами залишкової атмосфери та іонізує їх. Іони спрямовані до корпусу (колектору) й осідають на ньому, а електрони, змінивши імпульс, рухаються до анода, розбиваючи молекули на електрони й іони. Одночасно частина швидких електронів нагріває анод і випарник 5 до температури 1160°C . Титан випаровується й створює плівку на корпусі насоса, за рахунок якої відбувається хемосорбційне відкачування активних газів.

Поглинання інертних газів обумовлено іншим механізмом. У результаті взаємодії з електронами молекули газів іонізуються, прискорюються і з великими швидкостями вдаряються в корпус, де вони впроваджуються вглиб напорошеного шару титану і замуруються черговими шарами металу.

В конструкції насосів передбачена сітка 6, на яку подається напруга до 1кВ. Призначення сітки - обмежити відрив іонів від корпусу. Швидкість випаровування титану можна змінювати зміною струму емісії катода. Швидкодія орбітронного насоса становить близько 500 л/с. Граничний тиск - до $P_{gp}=10^{-10}$ Па. Для його покращення використовується азот (замість охолодження водою). Граничний тиск при цьому зменшується до 10^{-11} Па.

Конструктивні недоліки насоса: обмежений строк служби термokatodu, відсутність саморегульованої швидкості випаровування Ті.

Електророзрядні насоси з холодними електродами представлені конструкцією *магніторозрядного насоса*. На відміну від іонно-сорбційних насосів з гарячим катодом в магніторозрядних насосах для отримання активних плівок титану використовується газовий розряд в магнітному полі. Таким чином в магніторозрядних насосах усунутий такий істотний недолік, властивий насосам з термокато́дом, як наявність розжарених елементів електродної системи. Крім того, розпорошення титану за допомогою газового розряду дозволяє здійснити авторегулювання швидкості розпилення і різко збільшити термін служби насоса. Значне поширення магніторозрядних насосів обумовлено їх високими технічними характеристиками, простотою експлуатації й обслуговування, високою надійністю і великим ресурсом роботи (до 150 тис. годин). На рис.4.4а показано зовнішній вигляд магніторозрядного насосу НОРД-250 (насос орбітронний, розрядний, діодний, $S=250$ л/с).

Відкачування газів магніторозрядними насосами здійснюється в результаті хемосорбції газів постійно поновлюваною плівкою титану, яка утворюється при розпорошенні катода іонами газу. Конструктивно робота таких насосів заснована на принципі так званої «комірки Пеннінга», яка

складається з двох паралельних пластинок (катода) і розташованого між ними циліндричного анода (з отворами) (рис.4.4б). Ця електродна система міститься в магнітному полі (56000 А/м), перпендикулярному площині катодів. Роль магнітного поля – збільшити ефективність іонізації залишкових газів. Для виникнення розряду досить випадкової наявності в розрядному проміжку (між катодом і анодом - одиниці кВ) декількох електронів. Електрони в комірці коливаються ніби в пастці, іонізуючи газ. Швидкість однієї комірки ≈ 1 л/с. Для отримання більшої швидкості відкачування в насосах з'єднують паралельно велике число комірок в блоки (їх кількість 1-8). Під дією сильного магнітного й електричного полів електрони рухаються по спіралі навколо осі розрядної комірки. На своєму шляху електрони здійснюють іонізацію газу. Позитивні іони, що утворюються в розряді при зіткненні молекул газу з електронами, бомбардують катод і розпилюють із катодних пластин титан, який осаджується на стінках і аноді.

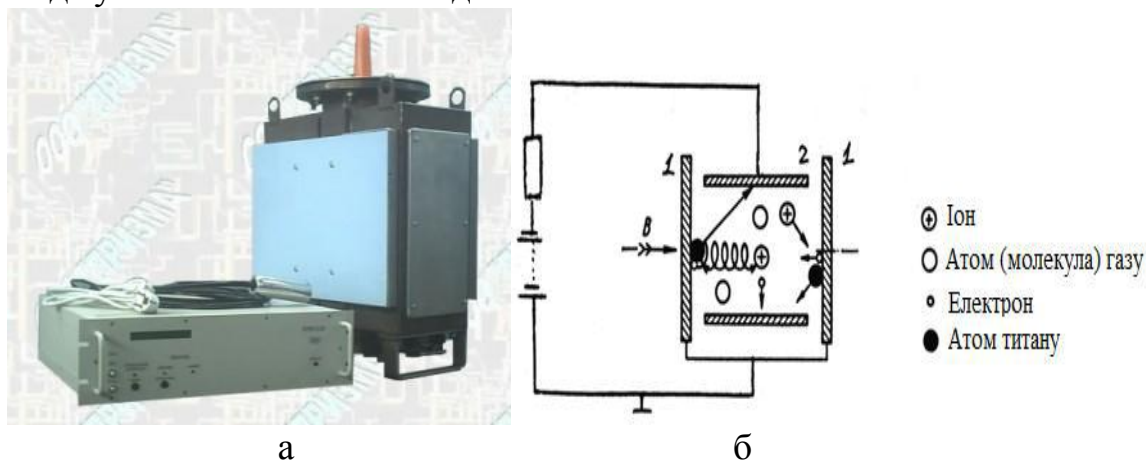


Рис.4.4.Діодний магніторозрядний насос: а) зовнішній вигляд; б) схема: 1 – два катода з Ті; 2 – циліндричний анод; B – індукція магнітного поля.

Оскільки основна частина титану, що розпилюється, є нейтральними атомами і молекулами, то вони осідають на всій поверхні електродів, але переважно на аноді. Активні гази, потрапляючи на безперервно поновлювану свіжу плівку титану, хемосорбуються нею. Катоди також поглинають гази, але через постійне розпорошення більшої частини поверхні їх внесок у процес відкачування активних газів незначний. Основний механізм відкачки активних газів – це їх хемосорбція плівкою Ті на аноді. Складні гази, вода, вуглецеві сполуки дисоціюють у розряді і їх уламки розпорошують катод.

Кількість металу, що розпилюється, приблизно пропорційна розрядному струму (відповідно тиску газу). Тому розпилення Ті саморегулюється залежно від стану вакууму, згідно $I=kP$.

Коефіцієнт розпорошення Ті іонами H^+ і He^+ малий (легкі іони), тому хемосорбція H_2 і He слабо виражена. Якщо ці гази відкачуються разом з іншими, то хемосорбція вже відіграє помітну роль. В магніторозрядних насосах має місце проникнення іонів легких газів H_2 і He всередину катода. Якщо видаляти лише їх, то дифузія H_2 і He всередину катода - основний

механізм відкачки. Зазначимо, що водень, взаємодіючи з Ti, утворює велику молекулу TiH, що може привести до деформації катода (*блістер ефект*).

Відкачування важких інертних газів здійснюється в основному через адсорбцію на катодах. Дифузія усередину Ti відсутня через великі розміри іонів інертних газів. Але катода весь час розпорошуються, і іони звільняються, проте деякі залишається на периферійних ділянках катодів, які не зазнали розпорошення, а також на аноді. З часом вони замуруються розпорошеними іонами Ti. Такий механізм не створює великої швидкодії і є основним при відкачуванні інертних газів магніторозрядним насосом.

Особливо багато турбот при відкачці магніторозрядними насосами завдає аргон (1% у повітрі). Швидкість його відкачки в 100 разів менше, ніж повітря, і в насосі його завжди багато. Аргон видаляється замуруванням в катод до моменту насичення. Після чого іони Ar^+ , які бомбардують поверхню катода, завдяки великій масі починають вивільняти замуровані раніше іони і підвищується тиск. Далі – зростання розпорошення Ti і знову відкачка аргону. Це є явищем аргонної нестабільності.

Оскільки хімічна активність різних газів та ефективність розпилення титану їх іонами різні, то як наслідок швидкодія розглянутих насосів істотно залежить від роду відкачуваного газу. Цей недолік меншою мірою властивий *тріодному магніторозрядному насосу*, схема якого показана на рис.4.5. Тут катод відіграє лише роль джерела Ti, а сорбуючими поверхнями є стінки насоса. Електродний блок утворюють анод, що розміщується всередині, і два катода. Між анодом і катодом підтримується розряд. Колектором є корпус насоса. Катоди тріодного насоса мають комірчасту і ребристу структуру, через що позитивні іони, що утворюються в розряді під час роботи тріодного насоса, бомбардують катод не лише під прямим кутом, як у діодному насосі, а під гострим. Крім того, бомбардується не лише поверхня, а й внутрішній об'єм катоду. Все це істотно збільшує ефективність розпорошення Ti, який рівномірно осідає на корпусі насоса. Завдяки тріодній схемі і комірчастій структурі катодів частина іонів, що рухаються з області анода, досягає колектора (корпусу), де нейтралізується і адсорбується. Іони, що досягли колектора, мають малу енергію (пройшли крізь катод і загальмувалися) і не можуть викликати вторинного розпилювання Ti з колектора. Завдяки тріодній схемі насос має підвищену швидкодію (на порядок) щодо інертних газів. Так, для Ar вона становить 1/3 від швидкодії щодо повітря.

До недоліків магніторозрядних насосів можна віднести підвищений знос катоду, нагрів при роботі, велику масу. Для отримання високого вакууму насоси треба прогрівати до $T=400^{\circ}C$ при 0,5 від їх потужності. Верхня межа робочих тисків визначається перегрівом електродів насоса. При тисках більше 10^{-3} Па тривала робота можлива лише при додатковому охолодженні електродів. Наявність забруднень на електродах насоса, особливо органічних, зменшує швидкодію і погіршує граничний тиск, тому попередня відкачка повинна забезпечуватися безмасляними засобами.

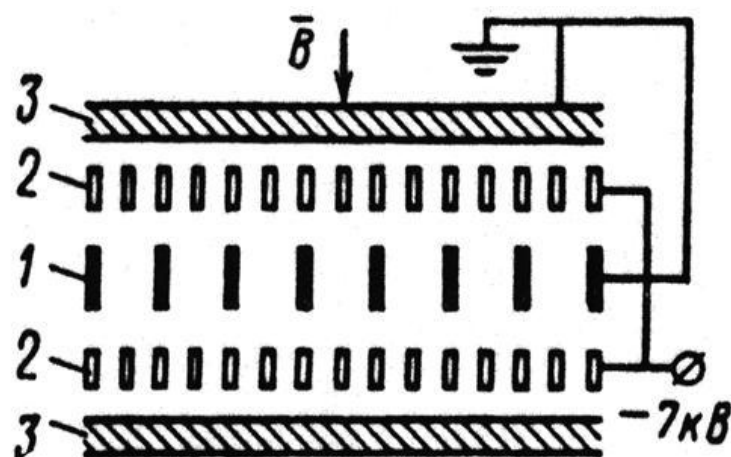


Рис.4.5. Схема тріодного магніторозрядного насоса: 1 – анод; 2 – катоди; 3 – колектор (корпус насоса); $\vec{B}$ – вектор напруженості магнітного поля.

Найбільш популярні насоси НМД, НМТО, НЕМ, НОРД-100, НОРД-250, ТРІОН-150 використовуються у надвисоковакуумних системах (напр., у просвічувальному електронному мікроскопі ПЕМ-125К – рис.4.6а).



Рис.4.6а. Вакуумна система електронного мікроскопа ПЕМ-125К та надвисоковакуумної установки.

На рис.4.6б показано сучасні мініатюрні магніторозрядні насоси.

Позитивні властивості магніторозрядних насосів:

- 1) можливість створення високого і надвисокого вакууму без загрози забруднення вакуумної камери будь-якою конденсованою парою;
- 2) відсутність рухомих і гарячих елементів;
- 3) з ростом розрідження розрядний струм і відповідно потужність, яку споживає насос, автоматично зменшуються;
- 4) залежність $I=kP$ можна використовувати для оцінки ступеню вакууму;
- 5) великий ресурс роботи.



Рис. 4.66. Магніторозрядні насоси: справа - Thermionics AIP-0,2T (розміри 94×64×35 мм); $S_n=0,2\text{ л/с}$; $P_{\text{гр}}=10^{-9}\text{ Па}$. Зліва - Varian Vaculon Mini (розміри 63×54×54 мм); $S_n=0,4\text{ л/с}$; $P_{\text{гр}}=10^{-5}\text{ Па}$.

4.7.3. Адсорбційні насоси. Певні тверді матеріали, такі як цеоліти, активоване вугілля, силікагелі, мають здатність сорбувати велику кількість газів. Це явище знайшло широке застосування для відкачування газів з вакуумних систем. Причиною тому є такі позитивні якості даного методу, як «чистота» вакууму, мінімальні парціальні тиски висококиплячих компонентів повітря, простота пристрою, що дозволяє експлуатувати адсорбційні насоси практично без обслуговуючого персоналу.

Більшість промислових адсорбентів мають складну внутрішню структуру, що включає пори різного розміру. При цьому вирішальний вплив на адсорбційну здатність і швидкість поглинання дає вміст дрібних пор в одиниці об'єму адсорбенту. Залежно від розмірів пори поділяються на три типи: мікро- і макропори, перехідні пори. Мікропори мають радіуси від 5 до 15 Å, тобто сумірні з розмірами адсорбованих молекул. Сумарний обсяг мікропор промислових адсорбентів зазвичай не перевищує 0,5 см³/г. Характерною рисою поглинання газів в мікропорах є підвищення в середньому в 1,6 рази енергії адсорбції в порівнянні з адсорбцією в більших порах. Це призводить до суттєвого зростання адсорбційної здатності мікропористих адсорбентів в області малих рівноважних тисків, що особливо важливо для кріовакуумної техніки. Ефективні радіуси більш крупних перехідних пор багато більше розмірів адсорбованих молекул, вони коливаються від 15 до 1000-2000 Å. Тому поглинання молекул газу здійснюється в цих порах шляхом послідовного утворення на їх поверхні адсорбованих шарів, що завершується капілярною конденсацією. Питома поверхня може бути в межах від 10 до 400 м²/г. Перехідні пори, так само як і макропори, що мають ефективні радіуси більше 1000-2000 Å, є основними транспортними артеріями, за якими здійснюється підведення адсорбованих молекул до мікропор.

Активоване, або активне, вугілля - це адсорбент органічного походження. Наприклад, вугілля марки АГ отримують на основі викопного вугілля; вугілля СКТ-2 - з торфу; саранове вугілля - шляхом розкладання полівініліденхлориду. Характерною особливістю пористої структури активного вугілля є його полідисперсність з широким діапазоном розподілу

пор за розмірами. Всі види вугілля практично не адсорбують воду, тому їх можна регенерувати при порівняно низьких значеннях температури.

Синтетичні цеоліти - це кристалічні алюмосилікати, найчастіше натрію або кальцію, з виключно однорідними за розмірами порами і каналами («вікнами»), що з'єднують пори між собою і з поверхнею. Пори цеолітів типу А і Х є практично сферичні порожнини з діаметром 11,4 Å для цеолітів А і діаметром близько 11,9 Å для цеолітів Х. Ефективні діаметри вікон істотно розрізняються для кожного типу цеоліту. Так, для цеоліту типу А в натрієвій формі (марка NaA) діаметр вікон близький до 4 Å, а для кальцієвої форми цього цеоліту (марка CaA) він дорівнює ~ 5 Å. Для цеоліту марки CaX ефективний діаметр вікон наближається до 8 Å і, відповідно, для цеоліту марки NaX він близький до 9 Å. Таким чином, основна відмінність між цеолітами типів А і Х полягає в розмірах вікон.

Для зручності застосування в техніці цеоліти випускаються у вигляді гранул, таблеток, кульок тощо, в яких кристалічний порошок скріплений різними сполучними речовинами, зазвичай глинами. В пори можуть потрапляти лише ті гази, діаметр молекул яких менше розміру пор. Тому добре поглинаються молекули O_2, N_2, CO_2 , розміри яких ~ 3 Å.

Найбільш широко використовуються цеолітові насоси (рис.4.7). Насос є балоном, заповнений цеолітом, і пристосований для охолодження рідким азотом. Балон утворений зовнішнім металевим циліндром 1, внутрішнім циліндром 2 і закритий нижнім кільцевим днищем 3 і двома верхніми сферичними днищами 4 і 5, до верхнього краю внутрішнього циліндра 2 засипаний цеоліт, як правило, марки 5A. У насос ЦВН-1-2 поміщається 1 кг цеоліту. Патрубком 6 балон з'єднується із фланцем 7, яким насос приєднується до вакуумної системи. Балон насоса поміщається в посудину Д'юара 10. При заповненні посудини Д'юара рідким азотом і охолодженні цеоліту він сорбує газ. Патрубок 11 запобігає утворенню газової пробки у внутрішній порожнині, що сприяє ефективному охолодженню цеоліту. Насос комплектується пічкою (на рис.4.7 не показана), яка встановлюється на місце посудини Д'юара для регенерації цеоліту.

При закритому клапані, що з'єднує насос із вакуумною системою, проводять регенерацію, тобто відновлення сорбційної активності цеоліту. Регенерація цеоліту відбувається прогріванням його при температурі $500^{\circ}C$ упродовж 3 годин. Після регенерації насос охолоджується до температури $-196^{\circ}C$. Після чого насосом можна проводити відкачування. При насиченні цеоліту відкачуванням газом проводять його повторну регенерацію, для чого насос заздалегідь відділяється клапаном від відкачуваної ємності. Цеолітові вакуумні насоси серійного виробництва призначені для попереднього відкачування від атмосферного тиску до 10^{-2} Па систем із магніторозрядними або гетеро-іонними високовакуумними насосами, а також для самостійного низьковакуумного відкачування систем, в яких не допускається наявність пари робочої рідини насосів. Водень і гелій вони зовсім не відкачують через низьку точку кипіння. Часто відкачувана камера забезпечується двома цеолітовими

насосами. Це забезпечує безперервність відкачки: один із насосів відкачує об'єм, в іншому проводиться регенерація.

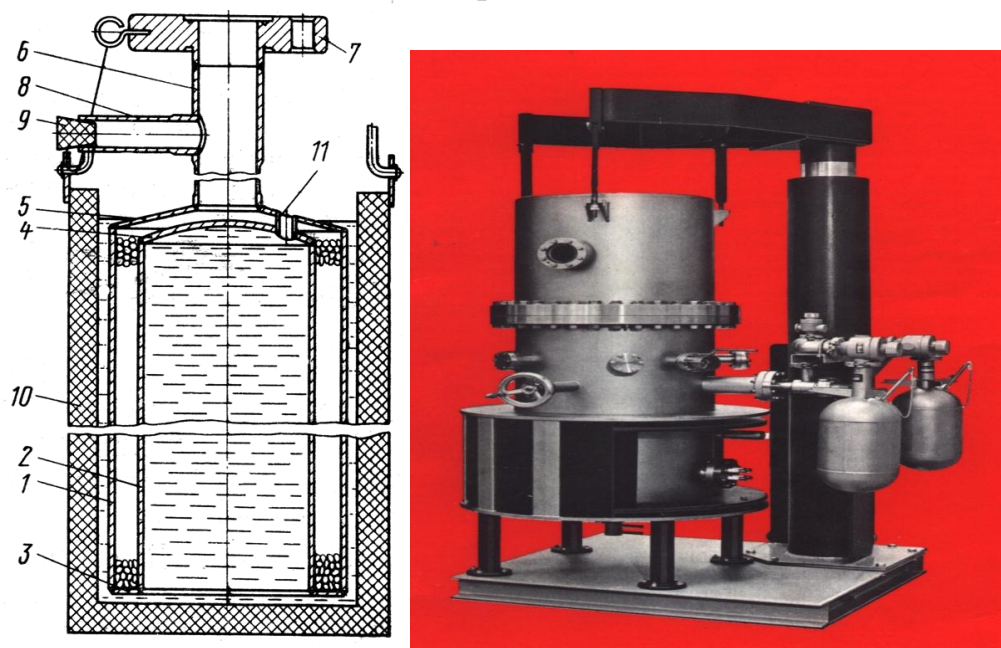


Рис.4.7. Цеолітовий вакуумний насос ЦВН-1-2: 1 – зовнішній циліндр; 2 – внутрішній циліндр; 3 – днище; 4, 5 – верхнє днище; 6, 8, 11 – патрубки; 7 – фланець; 8 – патрубок; 9 – пробка; 10 – посудина Д'юара.

4.8. Кріогенні насоси

Кріогенні вакуумні насоси є ідеальним засобом для застосувань, що вимагають одночасно глибокого безмасляного вакууму і великих швидкостей відкачування. Дія кріогенних насосів основана на адсорбції і конденсації газів і пари на поверхні, температура якої значно нижче температури навколишнього середовища. Молекули, вдаряючись у таку поверхню, зв'язуються нею. Кількість зв'язаних молекул тим більше для даного газу і певного сорбуючого матеріалу, чим нижче температура поверхні, оскільки час перебування молекули на поверхні з пониженням температури зростає за експонентою. В залежності від фізичних явищ, які відбуваються при низьких температурах кріогенні насоси можна класифікувати наступним чином:

- конденсаційні (конденсація газів на охолоджуваних металічних поверхнях);
- адсорбційні (адсорбція газів на твердих охолоджуваних сорбентах);
- конденсаційно- адсорбційні (адсорбція газів на попередньо сконденсованому допоміжному шарі газу, який легко конденсується);
- кріозахоплюючі (одночасна конденсація газу, що відкачується, і допоміжного газу, який легко конденсується).

Принцип дії конденсаційних насосів базується на конденсації газів на металевих поверхнях (кріопанелях), охолоджених до $T=20\text{K}$ і нижче, а адсорбційних насосів – на сорбції газів твердим сорбентом, який нанесено на кріопанель. Фізична поверхня сорбентів (цеоліти, активоване вугілля, силікагель, плівки окислів металів) на декілька порядків перевищує

геометричну поверхню кріопанелі. В якості допоміжного газу в конденсаційно- адсорбційних насосах використовується пари води, спирту, ацетону, діоксиду вуглецю, азот, аргон тощо. Робота кріогетерних насосів основана на фізико-хімічному зв'язуванні газів на поверхні і в об'ємі плівкою титану, яка постійно наноситься на кріопанель.

Кріогенні насоси використовуються насамперед для створення дуже високого вакууму. Їх включають в роботу зазвичай тільки після того, як за допомогою інших насосів (дифузійних, іонних) отримано достатньо низький тиск. Швидкість відкачки кріогенних насосів складає $S_n=50-100000$ л/с. Вона пропорційна площі кріогенної поверхні і визначається різницею між кількістю молекул, адсорбованих і десорбованих одиницею поверхні.

Принципова схема кріогенних насосів, незважаючи на різноманіття їх виконання, включає чотири елементи: *корпус, кріопанель, охолоджувальний пристрій, теплозахисний екран*. Кріопанель – основна частина насоса, виготовляється у вигляді дисків, циліндрів, змієвиків тощо. Кріовідкачка – це процес екзотермічний, так як за час роботи насоса на охолоджуваній поверхні в результаті переходу газу в конденсований стан постійно виділяється теплота конденсації. Через це обов'язковою умовою є відвід тепла і підтримка температури панелі на необхідному рівні.

На рис.4.8 показана конструкція конденсаційного насоса. Він являє собою посудину з великим відношенням поверхні до об'єму і подвійними стінками (тобто кріопанель циліндричної форми), між якими знаходиться кріогенна рідина (зріджені гази, такі як азот, водень тощо). Кріогенна рідина по мірі випаровування безперервно поповнюється. З метою зменшення швидкості випаровування застосовуються охолоджуючі екрани, що володіють проміжною температурою між кріопанеллю і навколишнім середовищем.

Для відкачування азоту, кисню, аргону або вуглекислого газу температуру стінок камери необхідно знижувати до температури кипіння водню $T=20,4\text{K}$. Для отримання більш низьких тисків використовують рідкий гелій, температура кипіння якого при атмосферному тиску становить $4,2\text{K}$ (-296°C). При такій температурі всі гази перебувають у рідкому і твердому станах.

Граничний тиск гелієвого насоса становить $P_{gp} = 10^{-13}$ Па. Це найбільш високий вакуум, який можна отримати промисловим насосом!

На кріогенних насосах виникає шар (шуба) із зріджених газів, який необхідно видаляти. Регенерація здійснюється шляхом нагріву до кімнатної температури і відкачки допоміжним насосом.

До недоліків кріогенних насосів слід віднести: селективність при відкачуванні газових сумішей і суттєва зміна граничного тиску при значному підвищенні температури кріопанелі; необхідність активувати кріопанель сорбентом або використовувати допоміжні засоби відкачування для видалення водню, гелію тощо, парціальний тиск яких визначає граничний вакуум, який створюється кріогенним насосом.

У сучасних кріогенних насосах використовуються двоступеневі кріопанелі (кріорефрижератори), де в якості холодоагенту використовується газоподібний гелій. При цьому температура першого ступеня складає порядка 70-80К, а температура другого ступеня 15-20К. Цикл є повністю замкнутим, тому експлуатаційні витрати на холодоагент мінімальні в порівнянні з заливними кріогенними насосами, відсутня небезпека перебою в роботі насоса, пов'язана з відсутністю рідкого азоту.

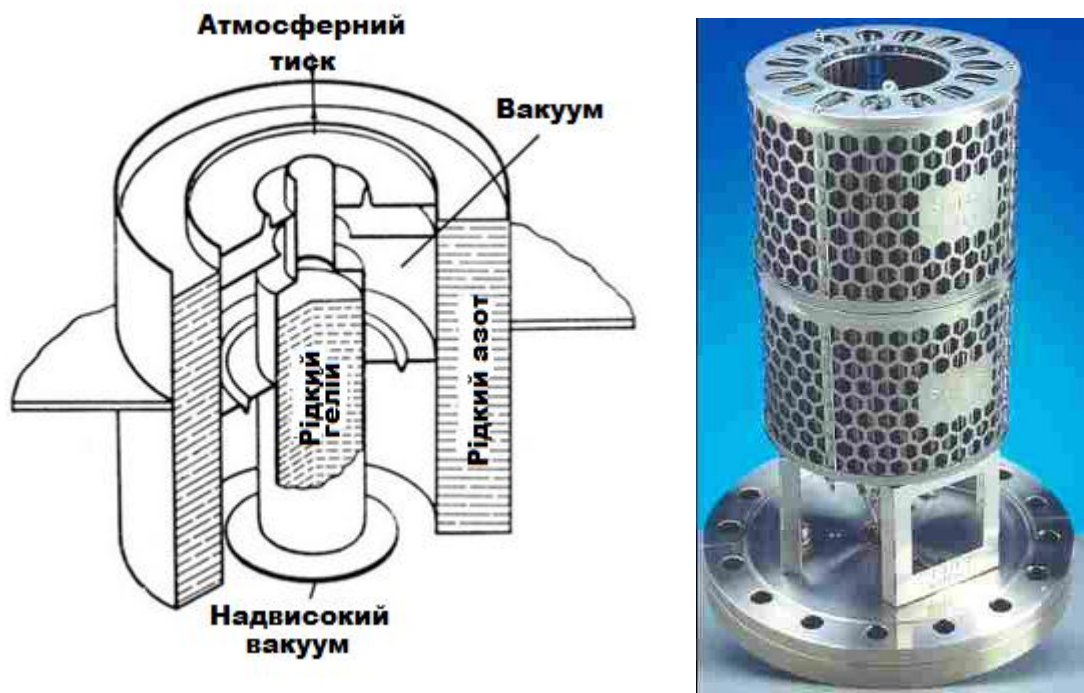


Рис.4.8. Кріоконденсаційний насос із рідким гелієм.

Використання спеціально розроблених для керування системами кріогенного відкачування контролерів дозволяє повністю автоматизувати і процес регенерації, забезпечуючи автоматичне перемикання між працюючими і регенованими насосами під час відкачування, а наявність додаткових пристроїв нагріву корпусу і продувки нагрітим газом скорочує час регенерації до мінімуму. На рис. 4.9 показан насос, який випускається компанією SHI Cryogenics (США). Кріонасоси SHI використовуються безпосередньо або у виробництві безлічі напівпровідникового, телекомунікаційного, електронного, напорюючого і спеціального лабораторного устаткування та продукції.

При роботі, показаного на рис.4.9 кріонасоса, гелій, який знаходиться при кімнатній температурі і високому тиску, нагнітається спеціальним компресором на охолоджену головку поршня, яка термічно пов'язана з двома рядами конденсаційних решіток. Після попадання на головку поршня під тиском гелій розширюється і охолоджує решітки. Зовнішній ряд решіток охолоджується до 80К і використовується для конденсації водяної пари, яка зазвичай є основою газового навантаження. Внутрішній ряд конденсаційних решіток охолоджується до температури 15К і призначений для решти газів. Всі гази, які конденсуються, переходять в твердий стан з тиском пари менш 10^{-10}

Па. Гази, які не конденсуються, такі як гелій, водень і неон одночасно адсорбуються шаром активованого вугілля, охолодженого до 15К.

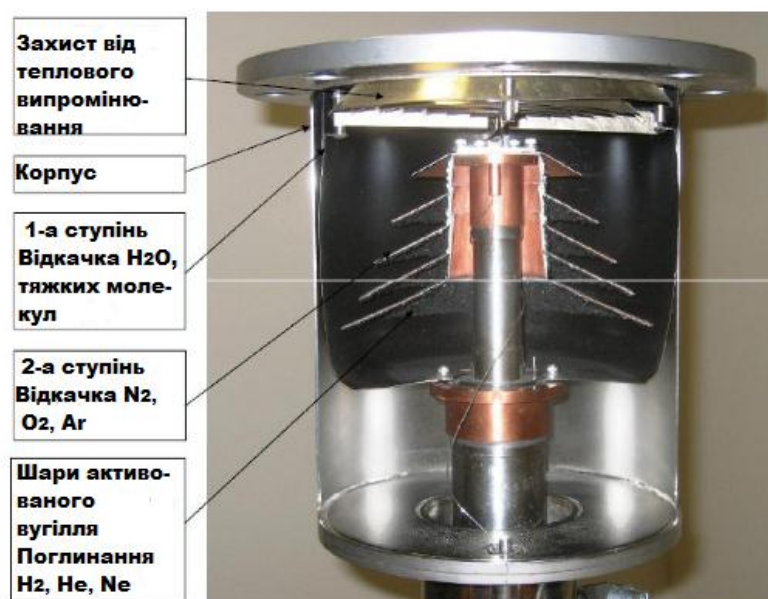


Рис.4.9. Кріогенний насос серії SHI.

Тестові завдання до розділу 4.

1. Що називається сорбцією?

- 1 – поглинання газів на поверхні деяких твердих тіл;
- 2 – поглинання газів в одиниці об'єму при певній температурі;
- 3 – поглинання газу або парів рідини твердими тілами.

2. Як залежить ефективність адсорбції від температури?

- 1 – не залежить;
- 2 – збільшується із збільшенням температури;
- 3 – збільшується з пониженням температури.

3. Чим пояснюється хімічна адсорбція?

- 1 – хімічними реакціями адсорбованих молекул з поверхнею;
- 2 – утворенням нових хімічних сполук;
- 3 – дією сил хімічних зв'язків (молекула віддає або одержує від поверхні електрон).

4. Речовину, яка поглинає газ, називають:

- 1 – сорбентом; 2 – адсорбітом; 3 – адсорбентом.

5. Абсорбція це:

- 1 – явище поглинання газів поверхнею тіл у результаті хімічного реагування між молекулами тіла і молекулами газу;
- 2 – явище виділення речовиною адсорбованого газу;
- 3 – розчинність газів металом.

6. Метали-газопоглиначі:

- 1 – мідь; 2 – цирконій; 3 – срібло.

7. В яких металах розчинність водню із підвищенням Т зростає?

- 1 – Al, Ag; 2 – W, Pt; 3 – Ti, Ta.

8. Фактори, які сприяють поглинанню газів твердим тілом:

- 1 – поверхня; 2 – температура; 3 – тиск.

9. Чому більш шорсткі поверхні, адсорбують краще ніж поліровані?
 - 1 – за рахунок збільшення сил зчеплення;
 - 2 – збільшується кількість речовини на одиницю об'єму;
 - 3 – збільшується площа ефективної поверхні.
10. Що відбувається з десорбованим газом при нагріванні тіла?
 - 1 – десорбований газ міняє хімічний склад раніше адсорбованого;
 - 2 – міняється індивідуальність адсорбованих молекул;
 - 3 – зберігається індивідуальність адсорбованих молекул і хімічний склад раніше поглинутих газів.
11. Які типи поглинання розрізняють при абсорбції?
 - 1 – поглинання з утворенням твердого розчину;
 - 2 – поглинання з утворенням нової хімічної сполуки;
 - 3 – п.1 і п.2.
12. Приклади металів, які слугують гетерами без випаровування.
 - 1 – алюміній, талій, активоване вугілля;
 - 2 – рідкоземельні елементи, в основному церій і лантан;
 - 3 – цирконій, титан торій, тантал, для яких властивим діапазоном $T \in 400 - 800^\circ\text{C}$.
13. Барій, який широко використовується у електронно-вакуумних приладах для підтримання необхідного вакууму має і недоліки. Які?
 - 1 – пари барію є отруйними;
 - 2 – барій є гігроскопічним і окислюється на повітрі;
 - 3 – не може бути використаним як гетер при температурах вище 200°C , бо починає взаємодіяти з поверхнею пристрою і втрачає поглинальні властивості.
14. Випарні насоси ефективно відкачують:
 - 1 – інертні гази;
 - 2 – сполуки органічного походження;
 - 3 – водень.
15. Іонно-гетерні насоси здатні створювати розрідження:
 - 1 – $10^{-7} \div 10^{-11}$ Па;
 - 2 – $10^{-3} \div 10^{-7}$ Па;
 - 3 – $10^{-10} \div 10^{-13}$ Па.
16. Які з наведених способів відкачки використовується в іонно-сорбційних насосах?
 - 1 – поглинання газів (абсорбція);
 - 2 – гетерні та іонні;
 - 3 – іонні (електричні методи).
17. Що є джерелом утворення іонів у іонно-сорбційних насосах?
 - 1 – потік направлених електронів на шляху від розжареного катода до анода;
 - 2 – зіткнення між нейтральними та зарядженими частинками;
 - 3 – газовий розряд у проміжку між катодом і анодом.
18. Яка з наведених реакцій утворення однозарядних позитивних іонів потоком електронів з розжареного катода гетеро-іонних насосів є вірною?
 - 1 – $A + e \rightarrow A^+ + 2e$;
 - 2 – $2A + e \rightarrow A^+ + 3e$;
 - 3 – $A + e \rightarrow A^- + 2e$.
19. Як здійснюється напорошення активної плівки поглинача у гетеро-іонному насосі?
 - 1 – розпорошенням титанових стрижнів бомбардуванням важкими іонами;
 - 2 – розпорошенням з титанових стрижнів при їх нагріванні від розжареного катода;
 - 3 – шляхом випарювання металу з титанових випарювачів, що нагріваються електричним струмом.
20. Чи потрібно знегажувати гетеро-іонний насос перед його запуском?
 - 1 – не потрібно;
 - 2 – треба прогріти корпус насоса спеціальним нагрівачем при 400°C . на протязі 5 годин під вакуумом, що створюється іншим насосом.
 - 3 – окрім процедури П.2 необхідно одночасно подати живлення катода і випарювачу титану 50% номінальних потужностей.
21. Для чого в електронно-вакуумних приладах (радіолампа, електронно-променева трубка тощо) на невелику ділянку внутрішньої поверхні напорошують барій?
 - 1 – щоб відновлювалися емісійні властивості термокатода;
 - 2 – щоб підтримувати вакуум у приладі;

- 3 – барій служить гетером для поглинання залишкових газів, що наново виділяються із деталей пристроїв.
22. Що сприяє ефективнішій відкачці інертних газів гетеро-іонним насосом, ніж газорозрядними насосами?
- 1 – більша поверхня активної плівки титану;
 - 2 – менше повторне випарюванням з катода;
 - 3 – більш ефективний процес іонізації направленим рухом електронів, іонна відкачка та поглинання іонізованого газу.
23. Звідки походить назва «титановий насос» для одержання надвисокого вакууму?
- 1 – з титану виготовляють електроди електророзрядних насосів;
 - 2 – атоми титану сприяють іонізації газів в іонно сорбційних насосах;
 - 3 – розпорошений титан у газорозрядних та іонно-сорбційних насосах є потужним джерелом поглинання.
24. Найбільш поширені титанові насоси:
- 1 – газорозрядні;
 - 2 – іонно-сорбційні;
 - 3 – магнітогазорозрядні та іонно-сорбційні.
25. Чи існують насоси попереднього розрідження з використанням поглиначів?
- 1 – існує принаймні адсорбційний цеолітовий насос;
 - 2 – не існують;
 - 3 – існують, але в комбінації з золотниковими насосами.
26. Як утворюється активна плівка Ті в магніторозрядних насосах надвисокого вакууму?
- 1 – титанові катоди розпорошуються від надмірного нагрівання;
 - 2 – титан випаровується під впливом нагрівання важкими іонами залишкових газів;
 - 3 – утворені при розряді позитивні іони бомбардують катод і викликають інтенсивне розпорошення матеріалу катода. Розпорошений титан попадає на поверхню анода.
27. Яке явище використовується у електророзрядних насосах для одержання активних плівок титану?
- 1 – катодне розпилення;
 - 2 – катафорез;
 - 3 – вторинна електронна емісія.
28. Граничний тиск орбітронного насоса з гелієвим охолодженням:
- 1 – 10^{-9} Па;
 - 2 – 10^{-13} Па;
 - 3 – 10^{-11} Па.
29. Для чого анод у магніторозрядних насосах конструктивно має відносно велику площу?
- 1 – щоб збільшити перегрівання електронними ударами;
 - 2 – щоб породжувати більше електронів з метою ефективною іонізації;
 - 3 – щоб збільшити активну плівку титану напорошеного з катода.
30. Для чого служить магнітне поле в магніторозрядних насосах діодного типу?
- 1 – для збільшення ефективності іонізації залишкових газів;
 - 2 – щоб направити іони з розряду до катода;
 - 3 – для запобігання руйнуванню катода.
31. Елементи магніторозрядних насосів надвисокого вакууму діодного типу:
- 1 – анод і два титанових катода;
 - 2 – катод і два титанових анода;
 - 3 – два титанових катода, анод та магніт.
32. Основний недолік, що створює незручності у використанні магніторозрядних насосів?
- 1 – велика громіздкість (50 – 150 кг);
 - 2 – під впливом газового розряду часто виходять з ладу електроди (анод і катод);
 - 3 – забруднення повітря в приміщенні.
33. Основний недолік магніторозрядних насосів надвисокого вакууму діодного типу?
- 1 – мала швидкість відкачки інертних газів;
 - 2 – потребує для запуску попередній високий вакуум ($<10^{-5}$ Torr);
 - 3 – значні розміри та велика вага.
34. Основні елементи магніторозрядного насоса надвисокого вакууму тріодного типу:
- 1 – анод і два катода;
 - 2 – анод-комірка і два титанових катода;

- 3 – анод, два катода у вигляді комірок і колектор іонів.
- 35.** Між якими електродами підтримується розряд у насосі тріодного типу?
- 1 – в системі між анодом і двома титановими катодами у вигляді комірок;
 - 2 – між анодом і колектором іонів;
 - 3 – між катодом і колектором іонів.
- 36.** Основні переваги насосу тріодного типу над насосом діодного типу:
- 1 – збільшується швидкість відкачки у кілька разів, а інертних газів – на порядок;
 - 2 – менші витрати рідкого азоту для охолодження;
 - 3 – покращується економічність насосу (зменшуються витрати споживаної потужності).
- 37.** Як залежить розрядний струм I від тиску P в газорозрядних насосах надвисокого вакууму? Практичне застосування цих залежностей.
- 1 – $I = kP^2$ – для визначення розрядного струму;
 - 2 – $I = k\sqrt{P}$ – для встановлення оптимального значення I ;
 - 3 – $I = kP$ – для визначення величини P по відповідному градувальному графіку.
- 38.** За рахунок чого швидкість відкачки інертних газів у магніторозрядних насосів тріодного типу збільшується в порівнянні з насосами діодного типу?
- 1 – через збільшення іонного струму на колектор;
 - 2 – завдяки вловлюванню колектором загальмованих іонів, які не викликають розпорошення матеріалу колектора;
 - 3 – через збільшення активної площі розпорошеного титану.
- 39.** Практична перевага прямолінійної залежності розрядного струму від тиску залишкових газів в магніторозрядних насосах:
- 1 – можливість підібрати номінальну потужність живлення насоса;
 - 2 – можливість визначати тиск що створюється при відкачці по градувальній шкалі;
 - 3 – створити достатньо великий струм іонів на колектор.
- 40.** Можливості цеолітового адсорбційного насосу попереднього розрідження:
- 1 – граничний вакуум 10^{-4} Торр в об'ємі 100л на протязі години роботи;
 - 2 – граничний вакуум 10^{-3} Торр в об'ємі 50л. на протязі декількох годин роботи;
 - 3 – граничний вакуум 10^{-2} Торр через дві години після запуску в об'ємі 20л.
- 41.** Недолік адсорбційного цеолітового насосу:
- 1 – великі витрати рідкого азоту та води для охолодження;
 - 2 – потреба в періодичній регенерації,
 - 3 – значний час початкового запуску.
- 42.** Для регенерації цеоліту застосовують:
- 1 – нагрів до 500°C ;
 - 2 – охолодження до -196°C ;
 - 3 – відкачку газів іншим насосом.
- 43.** Ефективність кріогенних вакуумних насосів визначається:
- 1 – температурою кріопанелі;
 - 2 – розмірами кріопанелі;
 - 3 – допоміжними засобами відкачування.
- 44.** Принцип дії кріозахоплюючого насоса:
- 1 – сорбція газів твердим сорбентом, який нанесено на кріопанель;
 - 2 – адсорбція газів на сконденсованому допоміжному шарі газу, що легко конденсується;
 - 3 – одночасна конденсація відкачуваного і допоміжного газу, який легко конденсується.

5. ТЕХНІКА ВИМІРЮВАННЯ НИЗЬКИХ ТИСКІВ

5.1. Класифікація манометрів

Невід'ємною частиною будь-якої вакуумної системи є апаратура для вимірювання тиску розрідженого газу. Область тиску, яка використовується в сучасній вакуумній техніці, $10^5 \div 10^{-12}$ Па. Вимірювання тисків у такому широкому діапазоні, природно, не може бути забезпечено одним приладом. У практиці вимірювання тиску розріджених газів застосовуються різні типи перетворювачів, що відрізняються за принципом дії і класом точності.

Прилади, за допомогою яких вимірюється тиск, називаються *манометрами*. Слово *manos* у перекладі з грецької означає негустий, тобто *манометр* – *прилад, що вимірює ступінь розрідження*. Прилади для вимірювання тиску газу нижче від атмосферного називаються *вакуумметрами*, які зазвичай складаються з двох частин - манометричного перетворювача та вимірювальної установки (вимірювальний блок).

За методом вимірювання вакуумметри розділяються на *абсолютні та відносні*. Показання абсолютних приладів не залежать від виду газу і можуть бути заздалегідь розраховані. Вони вимірюють тиск, як силу ударів молекул у поверхню. Відносна похибка тим менша, чим більше тиск.

При малих тисках (нижче 10^{-3} Па) безпосереднє вимірювання сили ударів неможливо через її малість. У приладах для відносних вимірів використовують залежність параметрів деяких фізичних процесів, що протікають у вакуумі, від тиску. Ці прилади потребують градування за еталонним приладом. Як правило при вимірюванні малих тисків використовуються електронні іонізаційні перетворювачі, принцип роботи яких заснований на іонізації газу електронами і вимірі іонного струму, за величиною якого судять про тиск. Шкали манометрів опосередкованої дії відкалібровані в одиницях тиску або електричних одиницях. Відносні похибки складають 10-60%.

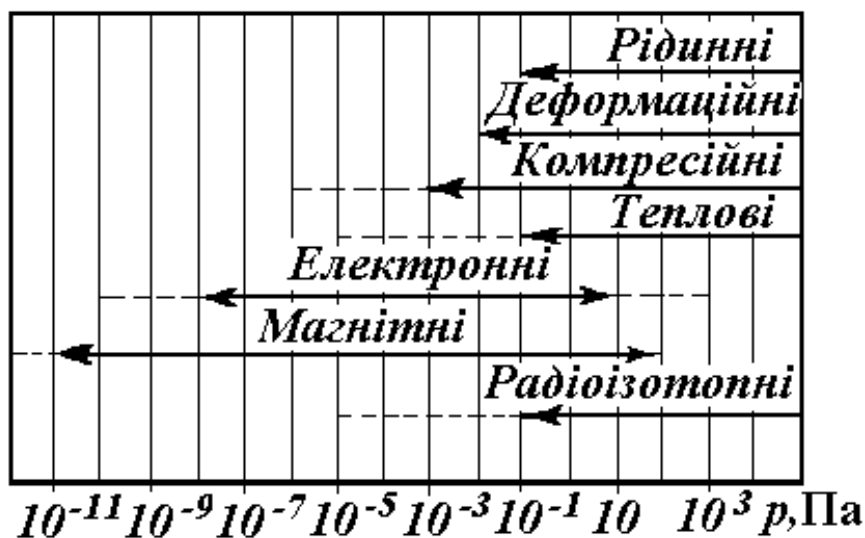


Рис.5.1. Діапазони вимірювання тиску вакуумметрами різних типів.

За принципом роботи манометри розділяють на такі типи: **рідинні** (гідростатичні), **деформаційні, компресійні, теплові та іонізаційні**; останні, в свою чергу, поділяють на електронно-іонізаційні (електронні), магнітні електророзрядні та радіоізотопні. Рідинні, деформаційні, компресійні – це абсолютні вакуумметри. На рис.5.1 наведено межі тисків, в яких можна проводити вимірювання манометром того чи іншого типу. Найбільший діапазон вимірювання мають *електронні* ($10\text{-}10^{-8}$ Па) *та магнітно-електророзрядні манометричні перетворювачі* ($10\text{-}10^{-11}$ Па).

5.2. Деформаційні манометри

Деформаційні (або механічні) манометри вимірюють різницю тисків між опорним (барометричним) і надлишковим, що викликає деформацію пружного чутливого елемента за дії з одного боку надлишкового тиску. Тому їх покази не залежать від роду газу.

Пружні чутливі елементи за типом поділяють на трубчаті, мембранні й сильфонні. Прикладом трубчатого манометра є деформаційний манометр, головний елемент якого – це спіральна трубка – трубка Бурдона (рис.5.2). Спіральну порожнисту трубку 1, відкритим кінцем через штуцер 2 приєднують до вакуумної системи, таким чином, на зовнішній бік трубки завжди діє атмосферний тиск. Під впливом надмірного тиску трубка розкручується, а під дією розрідження – скручується. При відкачуванні повітря з трубки вона починає скручуватися під дією атмосферного тиску, оскільки за різних радіусів кривизни площі її зовнішньої і внутрішньої поверхонь будуть різними. Рухомий запаятий кінець трубки почне переміщуватися ближче до нерухомого, що викличе від дії зубчастого механізму 3 поворот індикаційної стрілки проти напрямку руху годинникової стрілки. Число n поділок шкали, де зупиниться стрілка, покаже різницю між атмосферним тиском p_a і тиском p всередині трубки, тобто тиск у вакуумній системі буде: $p = p_a - n$. Шкала таких манометрів проградуєвана у відносних одиницях. Якщо у вакуумній системі тиск буде дорівнювати атмосферному, то стрілка вкаже на нульову поділку.

Чутливим елементом може бути також тонка пружна мембрана або сильфон, що виконує таку ж функцію, як і мембрана. У мембранному манометрі (рис.5.3) мембрана 1 герметично ділить об'єм манометра на дві частини, одна з яких приєднується до вакуумної системи, а в другій створено опорний постійний низький тиск: $p_k = 10^{-2}$ Па. З метою збільшення чутливості і зменшення впливу коливань зовнішньої температури мембрану виготовляють з гофрами 2. Для здійснення вимірювань використовують ємнісний збалансований місток Уїтстона, одним з пліч якого буде ємність між мембраною і нерухомою пластиною-електродом 3, відділеним від корпусу манометра (другий електрод) ізолятором 4.

Трубчасті деформаційні манометри мають низьку чутливість, ними можна вимірювати тиски, не нижчі ~ 7 Торр, тоді як мембранними вимірюють тиски в межах $760 - 10^{-4}$ Торр. Слід також відмітити такі позитивні якості мембранних манометрів на відміну від трубчатих, як незалежність вимірів від атмосферного тиску і від роду газу.

У сільфонних манометрах збільшено хід чутливого елемента за рахунок застосування гнучкої гофрованої трубки.

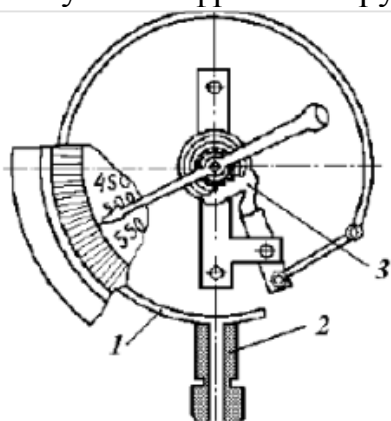


Рис.5.2.Деформаційний манометр.

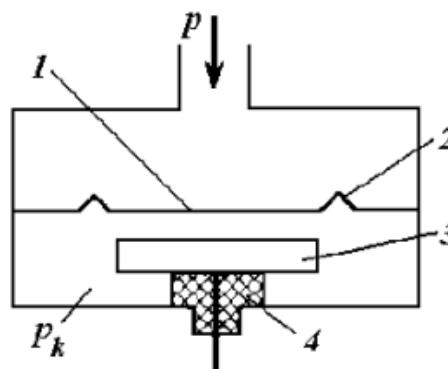


Рис.5.3.Мембранний манометр.

Для перетворення переміщення чутливого елемента в сигнал вимірювальної інформації широко застосовуються індуктивні, диференціально - трансформаторні, ємкісні, тензорезисторні, п'єзоелектричні та інші перетворюючі елементи.

5.3.Гідростатичні вакуумметри

Цей тип вакуумметрів поділяють на рідинні та компресійні.

Рідинні манометри – це прилади, принцип дії яких базується на використанні закону сполучених об'ємів. Найпростішими рідинними перетворювачами є вакуумметри з відкритим та закритим коліном. Тиск у межах 1... 760 Торр можна вимірювати дуже простими манометрами, такими, як барометрична трубка. Щоб визначити тиск у вакуумній системі, необхідно спочатку визначити атмосферний тиск допоміжним манометром, а потім встановити різницю h між рівнями рідини (рис.5.4а). Різниця тисків атмосферного і у вакуумній системі дорівнює: $(p_a - p) = \rho gh$, де g – прискорення земного тяжіння; ρ – густина рідини: якщо рідиною буде ртуть, то тиск отримаємо безпосередньо в одиницях Торр.

Очевидно, що виміри такого манометра залежать від атмосферного тиску. Щоб позбавитися такої залежності, використовують укорочений U – подібний манометр (рис.5.4б), один з кінців якого заварений. Якщо такий манометр наповнити ртуттю і приєднати до вакуумної системи, то тиск у ній буде визначатися різницею рівнів h за формулою: $p = h$ [Торр]. Чутливість такого манометра можна підвищити у $1/\sin\beta$, якщо одне з колін зробити нахиленим (рис.5.4в). Якщо ж використати не ртуть, а оливу, питома вага якої у 5 разів менша ніж у ртуті, то *чутливість* зросте у 5 разів. Однак, масляні вакуумметри перед початком роботи необхідно знегажувати, оскільки масло добре розчиняє гази і пару відкачуваних речовин.

До позитивних якостей рідинних манометрів відноситься можливість безперервних вимірювань і конструктивна простота, а до негативних – крихкість скла і громіздкість, а також невеликий діапазон вимірювання тиску з нижньою межею 10^{-1} Па (10^{-3} Торр).

Компресійні вакуумметри. Принцип дії цих приладів базується на застосуванні закону Бойля – Маріотта при стисненні розрідженого газу.

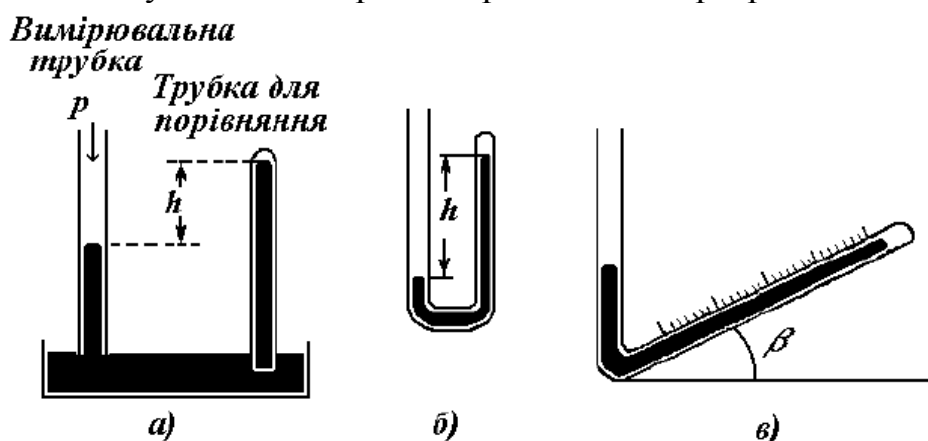


Рис.5.4. Рідинні манометри.

Серед них особливо цікавим є манометр Мак-Леода (рис.5.5), оскільки його часто використовують як еталонний. Газ вакуумної камери з низьким тиском p , що вимірюється, ізотермічно стискають до високого тиску за допомогою ртуті, а потім вимірюють різницю рівнів зрівноваженого стану. Конструктивно він складається з трубки 1, через яку підводиться ртуть до балона 2, з відомим об'ємом V_0 , що зверху має капілярну трубку 3 (трубку стискання), діаметром d , верхній кінець якої заварений. Трубка 1 має відгалуження, яке складається з трубки порівняння 4, розміщеної паралельно до трубки стискання і такого ж діаметра, та трубки 5, яка з'єднує манометр з вакуумною системою. На трубку стискання нанесена позначка L, а на трубку порівняння – позначка K. Вимірювання тиску починають завжди зі сполучення об'єму балона з вакуумною системою через трубку 5, тобто спочатку ртуть має знаходитися нижче місця з'єднання балона і трубки 5 (рис.5.5a). Потім знизу поступово вводять ртуть тим чи іншим способом з резервуару (на малюнку не показано), де вона постійно знаходиться, поки рівень ртуті не досягне позначки L (K). Газ, що знаходився у балоні V_0 , має такий же тиск P , що і газ вакуумної системи, який необхідно визначити, але після стискання його тиск зросте до величини P_1 , а об'єм зменшиться до V_1 . Тепер (відповідно до закону Бойля – Маріотта) можна записати: $PV_0 = P_1V_1$.

Очевидно, що різниця тисків урівноважується тиском стовпчика ртуті висотою h . Якщо тиски виразити в міліметрах ртутного стовпчика, тобто в одиницях Торр, то $P_1 - P = h$, тобто $P_1 = P + h$. Зазвичай компресійними манометрами вимірюють низькі тиски, які не впливають на різницю рівнів h . Тому $P \ll h$, і нехтуючи величиною P у виразі для P_1 , отримаємо:

$$P = h \frac{V_1}{V_0}.$$

Відношення об'ємів V_1/V_0 , що легко визначається через геометричні розміри манометра, називають *мірою стискання*. Тиск P газу у вакуумній системі можна знайти звичайним обчисленням.

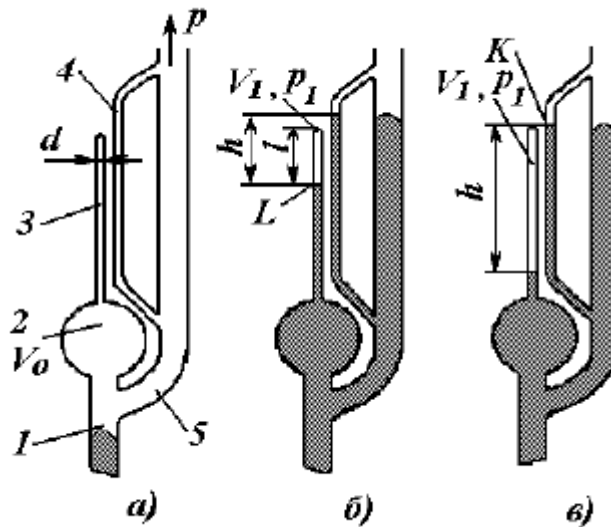


Рис.5.5. Манометр Мак-Леода.

Методи градування манометра Мак-Леода. Визначення об'єму V_1 залежить від того, як балон 2 (V_0) буде наповнюватися ртуттю.

а) *Лінійне градування шкали вимірювання.* Ртуть піднімають до рівня позначки L , що знаходиться на відстані l від верху трубки стискання. Тоді

$$P = h \frac{V_1}{V_0} = \frac{\pi d^2}{4V_0} l h = C_1 h, \quad \text{де } C_1 = \frac{\pi d^2}{4V_0} l.$$

Величину C_1 називають *сталою компресійного манометра з лінійною шкалою*. У цьому випадку міра стискання постійна для даної мітки і тому тиск, що вимірюється, прямо пропорційний різниці рівнів h . Для розширення діапазону вимірювань вибирають декілька значень l , для кожного з яких існує своя стала C_1 . Трубка стискання в цьому випадку має декілька відрізків з різним діаметром, а трубок порівняння теж буде декілька.

б) *Квадратичне градування шкали вимірювання.* Якщо шкала має квадратичне градування, то ртуть піднімають до рівня позначки K , що знаходиться на порівняльній трубці на рівні верху трубки стискання. Тоді ртуть підніметься в трубці стискання до іншого рівня на відстані h від її верху. Тепер маємо:

$$P = h \frac{V_1}{V_0} = \frac{\pi d^2}{4V_0} h h = C_2 h^2, \quad \text{де } C_2 = \frac{\pi d^2}{4V_0}.$$

Величину C_2 називають *сталою компресійного манометра з квадратичною шкалою*. У цьому випадку тиск, що вимірюється, пропорційний квадрату різниці рівнів h ; звідки і назва методу квадратичного градування. Міру стискання манометра з квадратичною шкалою можна змінювати, що дозволяє проводити виміри в більш широкому діапазоні P .

Ртуть, що застосовують в компресійних манометрах, піддається дії високого тиску, тому вона має бути абсолютно чистою. Перед використанням вона підлягає хімічному і електролітичному очищенню і вакуумній дистиляції. Для вимірювання низьких тисків виготовляють манометри з великими об'ємами балону (але зважаючи на крихкість скла, не більше 1300 см^3 ,

зазвичай $V_0 \sim 500 \text{ см}^3$) і діаметром капіляра d не менше 0,8 мм. Зменшення діаметра призводить до зростання ефекту капілярної депресії (ртуть починає прилипати до стінок трубки, що викликає можливість розділення неперервного стовпчика ртуті, виникає електризація скла). Як приклад граничного випадку можна вказати на манометр з об'ємом $V_0 = 1300 \text{ см}^3$ (маса ртуті 18 кг) і $d = 0,8 \text{ мм}$. Постійна цього манометра $C_2 = 3,86 \cdot 10^{-7}$, що дозволяє при $h = 2 \text{ мм}$ виміряти тиск 10^{-6} Торр . Для вимірювання високих тисків (але не більше 10 Торр) використовують прилади, що мають невеликий об'єм балона ($V_0 < 200 \text{ см}^3$) і капіляр з більшим діаметром.

До позитивних якостей компресійних манометрів відноситься можливість повного розрахунку, що дозволяє використовувати їх як еталонні. Похибка складає 1,5-2 % при тисках 10^{-1} -10 Торр, 2-3% - при $P > 10^{-2} \text{ Торр}$. До негативних якостей відноситься неможливість виконання безперервних вимірів (завжди перед вимірюванням необхідно звільняти балон від ртуті), забруднення парою ртуті (треба приєднувати манометри до вакуумної системи через азотні пастки), крихкість скла, неможливість вимірювань парціальних тисків пари речовин (наприклад, H_2O , CO_2), які легко конденсуються під дією сильного ($\sim 10^6$ разів) стискання. Також проблематично спостерігати за повільною зміною тиску у вакуумній камері.

Похибки вимірювання тисків рідинними, механічними і компресійними вакуумметрами не залежать від природи газу.

5.4. Теплові манометричні перетворювачі

У теплових манометричних перетворювачах використовується явище переносу тепла газом від нагрітої електричним струмом тонкої платинової нитки до стінок трубки, в якій розміщена ця нитка.

Відомо (п.1.4), що при в'язкісному режимі теплопровідність газу не залежить від тиску, оскільки $\chi = \eta c_v$, де χ - коефіцієнт теплопровідності газу; η - коефіцієнт внутрішнього тертя; c_v - питома теплоємність за постійним об'ємом. Проте при молекулярному режимі течії газу з'являється залежність коефіцієнта внутрішнього тертя від тиску. Він зменшується при зменшенні тиску і в першому наближенні можна записати, що $\chi = k p$. Звідси, чим меншим буде тиск газу, тим менше буде охолоджуватися нагріта нитка. Тобто температура її обернено пропорційна тиску.

Розрізняють *термопарні* вакуумметри, температура нитки яких вимірюється приєднаною до неї термопарою, і *теплоелектричні* вакуумметри опору, температуру нитки яких визначають за її електричним опором.

Манометр опору складається з двох частин: вимірювальної і частини, що взаємодіє з газом і з'єднується з вимірювальною. Її називають *датчиком* або *манометричним перетворювачем*.

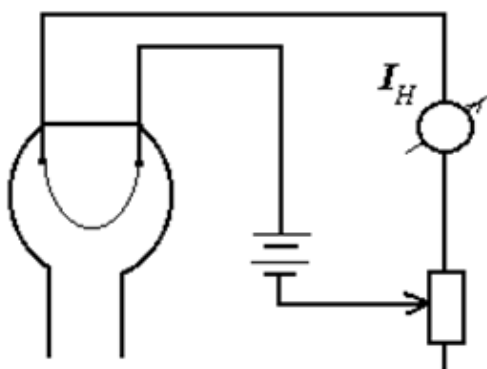


Рис.5.6. Манометр опору.



Рис.5.7. Крива градування.

Манометричний перетворювач має просту будову - це циліндрична скляна трубка, яка відкритим кінцем з'єднується з вакуумною системою там, де потрібно вимірювати тиск, а закритим кінцем відповідним цоколем - з вимірювальною частиною. У цоколь вмонтовані два електроди, до яких приварена платинова нитка, що служить електричним опором R (рис.5.6). Електрична потужність, що використовується для нагрівання платинової нитки, витрачається не тільки на нагрівання безпосередньо нитки ($I_H^2 R$), й на нагрівання електродів (P_3), до яких приєднана нитка, на випромінювання відповідно закону Стефана - Больцмана (P_2) і на нагрівання стінок трубки газом внаслідок теплопровідності газу (P_1). Таким чином рівняння балансу потужності матиме такий вигляд:

$$I_H^2 R = P_1 + P_2 + P_3 ,$$

де I_H - величина струму, яким нагрівається нитка до температури, наприклад, T_1 ; R - величина електричного опору нитки за цією температурою (слід пам'ятати, що електричний опір металів змінюється залежно від температури як $R_t = R_0(1 + \alpha t^\circ)$, де R_0 - опір при 0°C , α - температурний коефіцієнт опору і t - температура за Цельсієм);

$$P_1 = k_1 (T_1 - T_2) p ; P_2 = k_2 (T_1^4 - T_2^4) ; P_3 = k_3 (T_1 - T_3) ,$$

k_1, k_2, k_3 - відповідні множники пропорційності, а T_2 і T_3 - температура стінок трубки і кінців електродів відповідно.

Величини P_2 і P_3 не залежать від тиску газу, коли тиск є більшим ніж 10^{-3} Торр. Якщо P_2 і P_3 є значно меншими за P_1 , то ними можна буде знехтувати. Для того, щоб P_3 була відносно малою достатньо вибрати тонку нитку з малим коефіцієнтом теплопровідності (платина). Від величини P_2 залежить чутливість манометру при різних тисках. Для підвищення чутливості манометра до зміни температури нитки внаслідок дії теплопровідності газу, необхідно, щоб потужність P_1 була якомога більшою за P_2 . У той же час, щоб манометр опору мав високу чутливість при вимірюваннях низьких тисків, нитку необхідно нагрівати до відносно низької температури. У цьому разі теплопровідність газу стає дуже малою і при низькій температурі нагріву

випромінювана потужність теж зменшиться. Навпаки, при більших тисках вимірювання вигідно виконувати при вищій температурі нагріву нитки, тобто при більшій величині струму I_n . Таким чином, величина вимірюваного тиску і чутливість перетворювача залежать від величини струму I_n і температури нагріву нитки T_1 .

Вимірювання тиску манометром опору виконують наступним чином:

1) при якомога низькому тиску в лампі (10^{-5} Торр) встановлюють робочий струм, якому відповідає температура нагріву нитки T_1 ;

2) газ, що напускається в лампу, буде охолоджувати нитку і її опір зменшиться, це призведе до зростання струму I_n , який вимірюють.

З метою збільшення чутливості вимірювань манометричний перетворювач підключають до зрівноваженого містка для вимірювання опору, як одне з плечей. Зменшення тиску з початком відкачки призводить до зростання температури нагрівання нитки і, отже, до збільшення її опору. Місток розбалансується і для приведення його до зрівноваженого стану необхідно буде зменшити струм I_n . Оскільки вимірюється струм, а знати треба тиск, то використовують градувальну криву (рис.5.7), з якої за величинами струму і знаходять відповідні тиски (в межах 10^2 - 10^{-2} Торр).

У ВТ застосовуються ВСБ1, 13ВТЗ-блокувальні прилади, датчик ПМТ-6. Також широко вживаються *манометри Пірані*. Класична схема манометра Пірані часто реалізується у вигляді конструкції, де нитка розжарення, з одним або декількома прямолінійними ділянками, поміщена в циліндричний корпус з металу або скла, зовнішня сторона якого знаходиться в контакті з навколишнім середовищем. Оскільки чутливість датчика тим вище, чим довше і тонше нитка розжарення, зазвичай використовують нитку малого діаметра (~ 10 мкм), згорнуту в спіраль, або дуже тонку стрічку, виготовлену з металу, стійкого до окислення, наприклад з Pt або її сплавів, W, Ni.

Термопарний манометричний перетворювач. Другим прикладом використання залежності теплопровідності газу від його тиску є термопарний манометр (рис.5.8). Через низьку вартість і високу надійність широко використовуються датчики термопарних манометричних перетворювачів марки ПМТ-2 (стара назва ЛТ-2), ПМТ-4 (ЛТ-4). Це лампи зі скляним (ПМТ-2) або металевим (ПМТ-4) балоном (рис.5.8б), в який вмонтовано чотири електроди. Як і в манометрі опору, до двох з них приєднана платинова нитка (дротик) 1 (рис.5.8а), яка нагрівається електричним струмом від батареї БТ. До середини платинової нитки приварена термопара 2, вільні кінці якої приєднані до останніх двох електродів, до яких підключається мілівольтметр. Величина робочого струму I_p , що нагріває нитку, контролюється міліамперметром 3 і встановлюється до відповідного значення реостатом R. Термопара - це два дротики з різних металів, які з одного кінця з'єднані за допомогою зварювання. Особливістю такої пари є таке явище: якщо зварені кінці нагрівати до температури, наприклад, T_1 , то на вільних кінцях, що охолоджуються до T_0 , з'явиться термопарна електрична рушійна сила (Т.Е.Р.С.), величина якої залежить від різниці температур ($T_1 - T_0$) - чим більша

ця різниця, тим більшою буде $T.E.P.C.$. Вибором відповідних металів можна збільшити $T.E.P.C.$. В лампі ПМТ-2 використовується термопара з металів хромеля (90 % Ni + 10 % Cr) і копеля (56 % Cu + 44 % Ni).

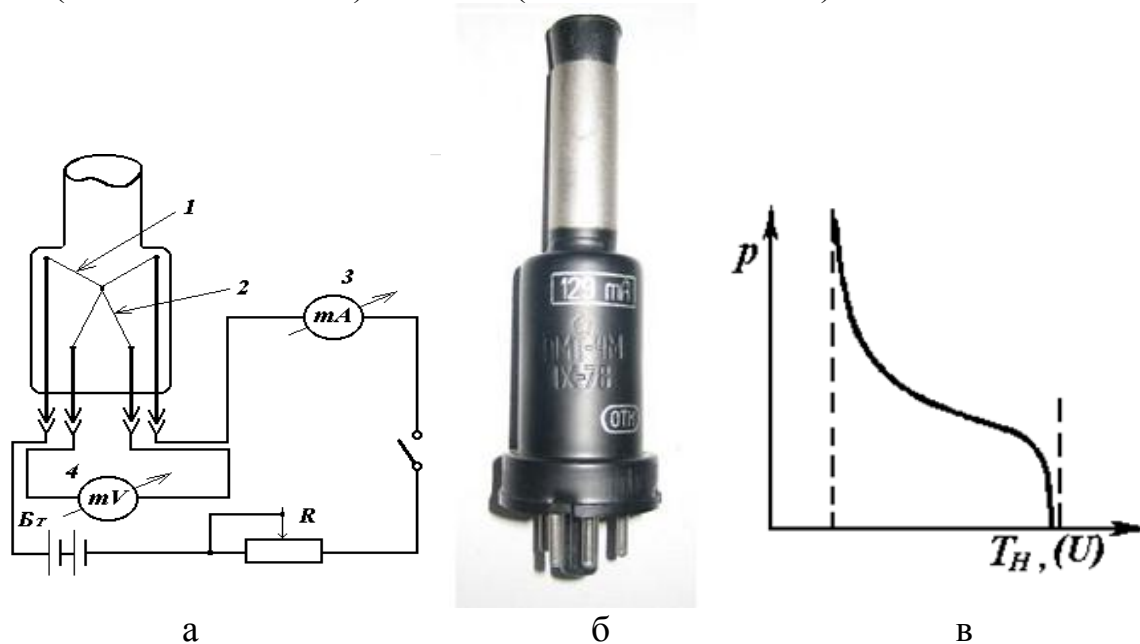


Рис.5.8.Термопарний манометр: а-схема; б- зовнішній вид ПМТ-4М; в- градувальна крива.

Відкритим кінцем лампа приєднується герметично до вакуумної системи. Поки тиск у вакуумній системі буде атмосферним, мілівольтметр буде показувати $T.E.P.C.$, близьку до нуля при струмі I_p , заданому для даної лампи при її виготовленні. При достатньому зниженні тиску мілівольтметр 4 почне показувати зростаючу $T.E.P.C.$, тому що теплопровідність газу із зниженням тиску зменшиться і це призведе до підвищення T нитки і термопарного спаю. Коли тиск знизиться настільки, що теплопровідність стане дуже малою і температура нитки перестане зростати, стрілка мілівольтметра зупиниться на граничній (максимальній) позначці 10 mV, при умові що струм I_p буде попередньо вірно виставлений і залишатися незмінним; у цей момент витрати тепла ниткою і термопарою будуть зумовлені практично тільки теплопровідністю дротиків і випромінюванням.

Термопарну манометричну лампу виготовляють у запаяному вигляді з вакуумом в середині 10^{-4} - 10^{-5} Торр. Щоб вірно визначити робочий струм запаяної лампи, необхідно дуже ретельно підібрати величину I_p реостатом R так, щоб стрілка мілівольтметра, який показує величину $T.E.P.C.$, встановилась при цьому струмі незмінно на поділці 10 mV. Цей струм і є робочим для даної лампи і при ньому виконують всі вимірювання. Зрозуміло, що за допомогою термопарної лампи вимірюють фактично не тиск, а $T.E.P.C.$, тому для визначення тиску використовують залежність величини $T.E.P.C.$ від тиску (рис.5.8в).

Тепловими манометричними перетворювачами можна проводити вимірювання для різних газів і пари, вести безперервні спостереження за

зміною тиску у вакуумній системі, але слід враховувати їх інерційність (0.3-0.5 хв.); вони не складні для виготовлення. Усе це є їх позитивними якостями. Але вони мають і недоліки, головними з яких є: вузький діапазон вимірювання тиску ($5 \cdot 10^{-1} - 10^{-3}$ Торр), оскільки чутливість манометра поза межами діапазону різко знижується і виміри стають неточними; залежність градувальних кривих від сорту газу і зміни робочого струму I_p з часом. Останній недолік виникає тому, що змінюється електричний опір платинової нитки - її поверхня забруднюється паром вакуумних олив та ін. У зв'язку з цим при використанні теплових манометричних перетворювачів необхідно періодично перевіряти робочий струм. Очевидно, що для цього вакуумну систему необхідно відкачати до тиску не менше 10^{-4} - 10^{-5} Торр. Істотний вплив на похибку вимірювання тепловими вакуумметрами надають коливання температури навколишнього середовища.

Теплові датчики калібруються по чистому повітрю, а залежність показів приладу від роду газу враховується так: $p = p_{\text{повітря}} \cdot q$; де коефіцієнт q для $H_2 = 0,67$, $He = 1,12$, $CH_4 = 0,61$, $Ne = 1,31$, $CO = 0,97$, $CO_2 = 0,94$, $Ar = 1,56$.

5.5. Іонізаційні манометричні перетворювачі

Вимірювання тиску за допомогою цих манометрів відбувається завдяки іонізації залишкового газу і визначенню іонізаційного струму, що буде мірою молекулярної концентрації, тобто тиску газу. Очевидно, що збільшення струму іонів буде відповідати зростанню тиску.

Іонізаційний манометр, як і термодатчик, складається з двох частин: вимірювальної (ВИТ-1,2,3, ВИ-14) і датчика (рис.5.9). Датчик – скляна лампа – перетворювач манометричний іонізаційний ПМИ – 2 (стара назва ЛМ), має вигляд (рис.5.10) скляної колби 1, що закінчується трубкою 2, через яку приєднується до вакуумної системи. У середині колби впаяні три електроди: вольфрамовий катод 3, розміщений на осі колби у вигляді петлі з двома відводами 4, анод – молібденова сітка у вигляді біфілярної спіралі 5, що охоплює катод і також має два відводи 6, і нікелевий колектор іонів 7 у вигляді циліндра, що охоплює ці електроди і має відвід 8. Два відводи у сітці-анода необхідні для розжарювання її електричним струмом, щоб викликати виділення поглинутих газів як з неї, так і з інших елементів лампи. Електрони, які емітуються нагрітим катодом, спрямовуються до анода і створюють електронний струм, а іони, які утворилися під дією ударної іонізації, збираються колектором іонів і створюють іонний струм, який вимірюється мікроамперметром (рис.5.11а). Оскільки сітка має великий період намотки, то значна частина електронів не зразу досягає її поверхні, а пролетівши повз неї, опиняється в гальмуючому електричному полі колектора і починає коливальний рух (5 коливань) навколо сітки перед тим, як потрапити на неї. Збільшення довжини траєкторії руху електронів збільшує імовірність іонізації і значно підвищує чутливість манометра. З цією ж метою відстань між сіткою-анодом і колектором іонів роблять відносно великою. Для створення іонного струму достатньо до колектора прикласти від'ємну напругу до 10 В, але для прискорення емісійних електронів необхідна позитивна напруга до 250 В.



Рис.5.9. Іонізаційний датчик ПМИ-2 та вимірювальні прилади: ВІТ-3 (зверху) і Мерадат-ВІТ 19ІТ2 (знизу).

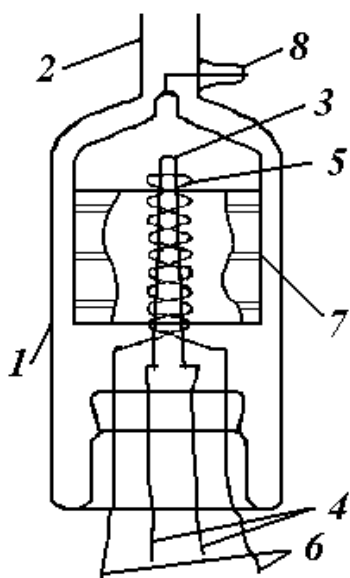


Рис.5.10. Будова ПМИ-2

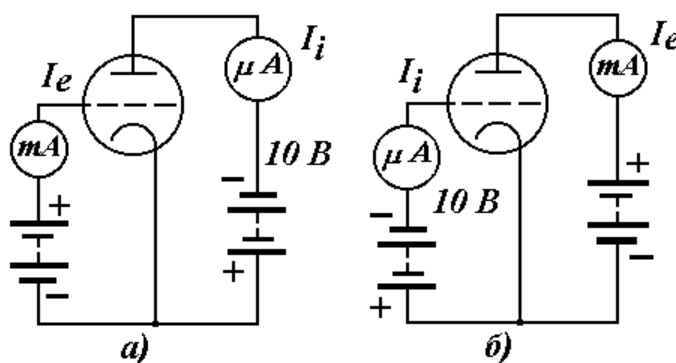


Рис.5.11. Схеми живлення ПМИ-2.

Підключення іонізаційного датчика можна здійснювати також за схемою (рис.5.11б), де функцію анода виконує колектор іонів, а іони збираються сіткою 5. Чутливість манометра при такому підключенні нижча, тому схема а) має більш широке застосування.

З експериментів відомо, якщо тиск газу не перевищує 10^{-3} Торр, то відношення іонного струму до електронного прямо пропорційним до тиску в манометричній лампі: $\frac{I_i}{I_e} = kp$.

Коефіцієнт пропорційності k визначає чутливість манометра і залежить від властивостей газу, його температури, електричного режиму і геометрії. Якщо електронний струм підтримувати завжди на постійній величині, то можна вважати, що $I_i = Ap$, де $A = I_e k$ – постійна манометра.

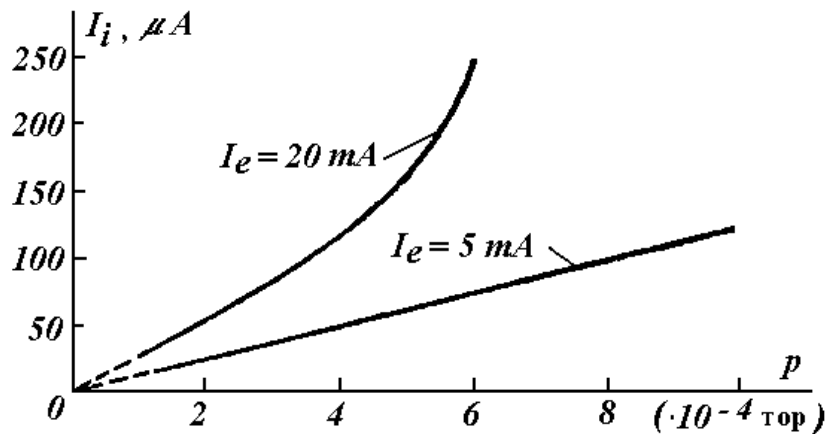


Рис.5.12. Градуировальный график для різних значень електронного струму.

Величину сталої манометра визначають геометрично з градуировального графіка, який будують за допомогою іншого манометра. Очевидно, що при збільшенні величини електронного струму іонний струм також зростатиме. Питома іонізація залежить від роду газу, тому як і для термопарного манометра покази іонізаційного потребують коректування на сорт газу: для повітря $q=1$; N_2 -1; Cl_2 - 0,8; H_2 -0,43; He -0,18; H_2O -0,1; Kr -1,9; пари масла -913.

Градуировальный график має в основному лінійну залежність (рис.5.12). Тангенс кута нахилу визначає постійну манометра. За підвищених тисків ($>10^{-4}$ Торр) при більшому електронному струмі (20 мА) іонний струм зростає швидше ніж тиск. Це пояснюється виникненням лавинної іонізації. Завдяки лінійній залежності іонного струму від тиску іонізаційні манометри мають високу точність у діапазоні тисків 10^{-3} - 10^{-6} Торр.

До недоліків слід віднести можливість руйнування розжареного катода при раптовому проникненні у колбу атмосферного повітря. Руйнування відбудеться завдяки інтенсивному бомбардуванню іонами, що будуть утворюватися біля катода. Крім цього приєднувати манометр до вакуумної системи треба через трубку великого діаметра, в супротивному разі газовий розряд, що протікає в манометрі, призведе до поглинання газу електродами, тобто до помітного зниження тиску в ньому в порівнянні з вакуумною системою. Тому перед вимірюванням необхідно провести знегажування елементів манометра інтенсивним електронним бомбардуванням, яке створюють розжаренням спіралі анода.

При вимірюванні низьких тисків ($<10^{-7}$ Торр) з'являються помітні неточності, пов'язані з появою фотоелектронної емісії з колектора іонів, що виникають під дією рентгенівських променів, які випромінює анод внаслідок бомбардування його прискореними електронами (виникає додатковий фоновий струм). Останній недолік частково усувається зміною конструкції.

5.6. Іонізаційний манометр Байярда – Альперта

Щоб більш точно вимірювати низькі тиски, Байярд і Альперт створили манометр, в якому колектором іонів слугує тонкий вольфрамовий дротик 1, оточений сіткою – анодом 2, а катод 3 розміщений зовні сітки (рис.5.13). Анодну напругу було понижено до 100 В. Усе це було зроблено з метою зниження рентгенівського випромінювання і його дії на колектор іонів (мала площа). Дійсно, чутливість такого манометра зросла у 100 і більше разів. Манометр Байярда – Альперта дає точні виміри тисків до $\sim 10^{-10}$ Торр. Розміщення колектора іонів всередині сітки зменшило число іонів, що потрапляли на стінку колби, а не на колектор, тобто при такому розміщенні відповідність іонного струму числу утворених іонів вища. Вимірювання тисків нижчих 10^{-10} Торр обмежується тиском насиченої пари вольфраму, що з'являється при температурі розжарення нитки катода $\sim 2300^{\circ}\text{C}$, а також помітному проникненню до колби атмосферного гелію через скло. Градування манометрів виконують шляхом порівняння вимірів з показаннями компресійного манометра.

Іонізаційні електронні перетворювачі широко використовуються в сучасній науці і техніці, зокрема в прискорювачах і накопичувачах. Також принцип роботи іонізаційних манометрів використовують для перевірки ступеня вакууму в запаяних вакуумних приладах. До загального недоліку іонізаційних манометрів слід віднести чутливість до впливу на виміри тиску зовнішніх електричних і магнітних полів.

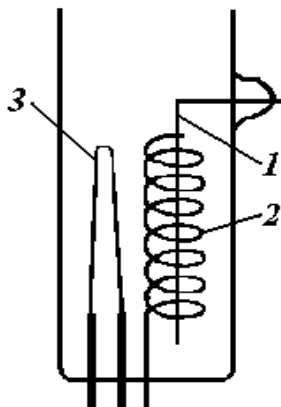


Рис.5.13. Лампа Байярда – Альперта.

5.7. Магнітні перетворювачі

Це свого роду вдосконалені іонізаційні перетворювачі. Принцип дії магнітних перетворювачів заснований на залежності струму самостійного газового розряду від тиску в схрещених магнітному та електричному полях. Іонізація газу здійснюється не термоелектронами, а забезпечується розрядом між холодними електродами. Застосовують кілька видів електродних систем, які забезпечують підтримку самостійного розряду при високому вакуумі. Насамперед це комірка Пеннінга (рис.5.14), яка складається з двох дискових катодів (в їх ролі може бути корпус) і циліндричного анода. Електрони, що

вилітають з катода в результаті автоелектронної емісії, рухаються по спіральних траєкторіях між катодними пластинами. Магнітна індукція B ($E \parallel H$) вибирається більше критичного значення (напруженість складає декілька тисяч А/м), яке відповідає рівності діаметра електрода і діаметра кола, по якому рухається електрон. При зіткненні з молекулою залишкового газу електрон втрачає частину енергії на її іонізацію і переміщається в радіальному напрямку до анода. Утворені позитивні іони рухаються до катода, утворюючи іонний струм I_i (їх маса більша, ніж електронів, тому магнітне поле не впливає на траєкторію руху). Зіткнення позитивних іонів з катодом призводить до утворення вторинних електронів, струм яких пропорційний іонному.

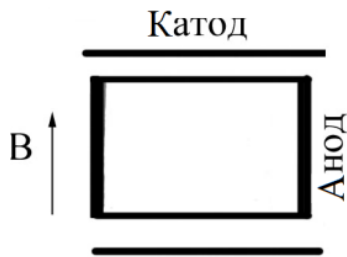


Рис.5.14. Комірка Пеннінга.

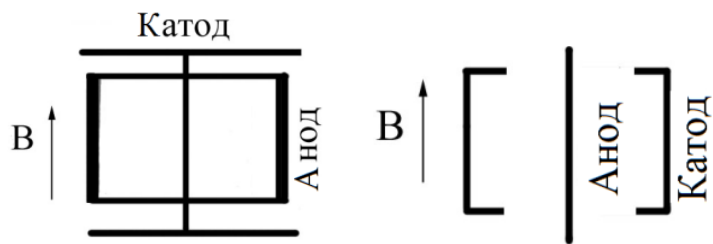


Рис.5.15. Магнетронний і інверсно-магнетронний перетворювач.

Таким чином, розрядний струм магнітного перетворювача:

$$I_p = I_f + I_i + I_v,$$

де I_f - фоновий струм автоелектронної емісії; I_v - струм вторинної електронної емісії. Струм автоелектронної емісії не залежить від тиску, іонний струм і струм вторинної емісії від тиску залежать: $I_i + I_v = aP^n$, де $a = 0,1 \dots 0,01$ А/Па і $n = 1 \dots 1,4$ - постійні.

Якщо розташувати магнітне поле так, щоб $H \perp E$, то отримаємо магнетронні перетворювачі (рис.5.15). У них катода з'єднані стрижнем. В інверсно-магнетронних центральний стрижень є анодом, а зовнішній циліндр - катод. Стрижень – це тонкий електрод, який при швидкому нагріванні виділяє адсорбовані гази, і тим самим полегшує загоряння розряду.

Для всіх магнітних електророзрядних датчиків характерно, що прямий проліт електронів, які утворилися в розряді між холодними електродами, до анода, заборонено завдяки застосуванню магнітного поля. В датчиках з $E \parallel H$ домінує зворотно-поступовий рух електронів уздовж осі, в магнетроні – циклоїда, в інверсно-магнетронному перетворювачі – гіпоциклоїда.

Нижня межа вимірювання в сучасних магнітних вакуумметрах може досягати 10^{-11} Па. Інші переваги магнітних вакуумметрів: широкий діапазон дії, простота в експлуатації, стійкість до напускання повітря у вакуумну камеру. Завдяки простоті і надійності вони використовуються для керування технологічними процесами. До недоліків необхідно віднести: а) нестабільність роботи через замаслювання електрода (корпусу або катода), що бомбардується

іонами; б) селективність роботи (різна чутливість до різних газів); в) чутливість гірша, ніж у іонізаційного вакуумметра.

Широко застосовуються прилади: ВМБ-3,8,14, ВІМ-2 та ін.; датчики: ММ-13, ПММ-3-21, ММ-14, М-4А та ін. На рис. 5.16 показано вакуумметр магнітний блокувальний ВМБ-14, інверсно-магнетронні манометричні перетворювачі з холодним катодом ПММ-32-1 (діапазон вимірюваних тисків $10^{-2} \div 7,5 \cdot 10^{-10}$ Торр) та ПММ-46 (діапазон вимірюваних тисків $1 \div 3 \cdot 10^{-13}$ Торр). Останні випускаються без скляного корпусу, монтуються на фланці.



Рис.5.16. Сучасні магніторозрядні вакуумметри.

5.8. Радіоізотопні перетворювачі

Бажання позбутися розпеченого анода та високих напруг, зберігши при цьому принцип вимірювання тиску за іонним струмом, привело до створення манометрів із радіоактивним джерелом. Джерелом іонізації в таких вакуумметрах є α -, β - або γ - випромінювання радіоактивних речовин, наприклад радію, кобальту. Особливо ефективним є використання β - випромінювання. При взаємодії з молекулами газів електрони викликають їх іонізацію. Причому кількість отриманих позитивних іонів прямо пропорційна тиску в робочому об'ємі.

До переваг таких вакуумметрів відносять необмежений термін служби, відсутність високих напруг, лінійність характеристик, а до недоліків – вузький діапазон робочих тисків від 10^5 до 10^{-3} Па (ВР-4 з датчиком МР-8).

5.9. Динамічні і радіометричні вакуумметри

Динамічні вакуумметри побудовані на різних варіантах перенесення імпульсу. До цих приладів відносяться в'язкісні і кінетомолекулярні вакуумметри. Дія перших заснована на вимірі часу загасання коливального руху поверхні в результаті ефекту демпфування (коливання) після прикладання імпульсу. В кінетомолекулярних вакуумметрах використовується ефект переносу імпульсу від диска, що безперервно обертається, до іншого нерухомого, розташованого дуже близько. Тиск визначається за обертальним моментом нерухомого диска.

До конструкції елементів підвіски таких вакуумметрів пред'являються підвищені вимоги: виникаючі в ній сили тертя і її жорсткість не повинні маскувати вимірювальний обертальний момент. Можливість розробки більш простих, надійних та точних вакуумметрів, що забезпечують вимір низьких тисків, з'явилася з ідеєю використовувати кулю або диск, які вільно підвішені у магнітному полі. Вперше ця ідея була висунута ще в 1946 р., але лише після 1962 р. була реалізована в динамічних вакуумметрах. Це дозволило вимірювати тиск до 10^{-7} Па, проте оптимальний діапазон вимірюваних тисків становить 10^{-2} – 10^{-5} Па. Навіть перші недосконалі в'язкісні вакуумметри представляли собою прецизійні пристрої, що вимагають дорогої електронної системи управління і вимірювання, а також встановлення їх на віброзахисних столах. Такі вакуумметри випускаються промисловістю в невеликих кількостях. Поверхня ротора має бути ідеально гладкою. Зокрема, при негладкій поверхні покази вакуумметра істотно залежатимуть від роду газу.

Радіометричні вакуумметри в порівнянні з в'язкісними володіють тією перевагою, що їх покази не залежать від природи газу. Одним з перших радіометрів був прилад, запропонований Круксом в 1873 р. Основним елементом цього пристрою була легка чотирилопатева вертушка. Якщо до балона, в якому перебувала ця вертушка, піднести джерело світла або тепла, то вона починала обертатися. Причина – *радіометричний ефект*, тобто прояв дії сили відштовхування між двома поверхнями при різних температурах в розрідженому газі. Ефект викликається тим, що молекули газу, які вдаряються у поверхню з $T_1 > T_2$ відбиваються від неї з більшою кінетичною енергією, ніж після взаємодії з холодною поверхнею (T_2). Тоді холодна поверхня твердого тіла (диск, вертушка) з боку нагрітої бомбардується більш швидкими молекулами, ніж з протилежного боку. Завдяки різниці в одержаних імпульсах виникає сила відштовхування. При низькому тиску вона пропорційна тиску, а при високому – обернено пропорційна.

Розроблено радіометричний вакуумметр з магнітною підвіскою, що дозволяє вимірювати тиски до 10^{-8} Па. У цьому вакууметрі основним елементом є вирізаний з полікристалічного магнітно-ізотропного графіту диск діаметром 3 мм і товщиною 0,05 мм, який обертається навколо свого діаметра, розташованого по вертикальній осі статора (рис.5.17). Диск поміщений всередині циліндричного корпусу (статора), виконаного з молібденових смужок, розташованих під певним кутом. Корпус статора за допомогою теплопроводу (металевого стержня), зануреного в рідкий азот, може охолоджуватися до $\sim 78\text{K}$, тоді як скляна оболонка вакуумметра знаходиться при кімнатній температурі. Якщо диск обертається проти годинникової стрілки, то півкола диска (щодо осі обертання) будуть увесь час відступати, а протилежні їм півкола – наступати. В результаті обертовий диск буде або прискорюватися, або уповільнюватися в залежності від напрямку початкового обертання. Швидкість обертання визначається за допомогою фотопомножувача, який фіксує відбитий від обертового диска промінь світла.

При одному повному обороті диска на фотопомножувач потрапляє два імпульси світла.

Зазвичай тиск вимірюється за ефектом гальмування обертового диска, а швидкість обертання визначається за кількістю імпульсів за певний відрізок часу. При тиску 10^{-7} Па для вимірювання потрібно близько 60 с. Через це вакуумметр цього типу не придатний для динамічного вимірювання тиску.

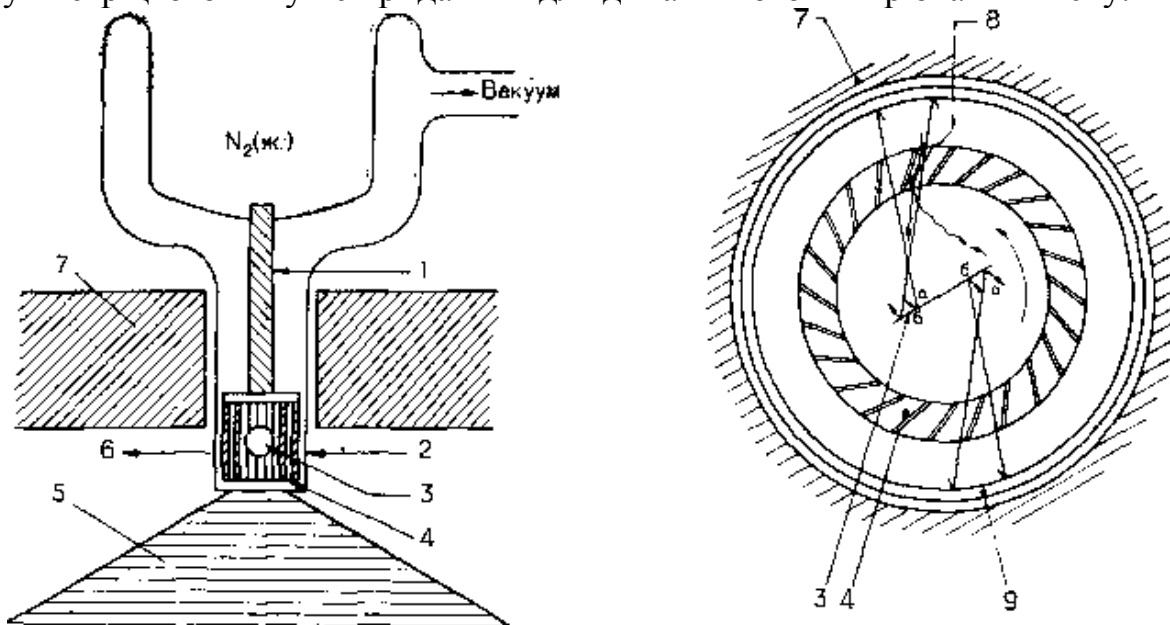


Рис. 5.17. Вакуумметр Евраз і Бутрі (вид збоку і горизонтальний поперечний переріз): 1 - теплопровід; 2- промінь світла; 3-графітовий диск; 4 - статор (холодний); 5 - магніт; 6 - фотопомножувач; 7 - магніт; 8 - теплове випромінювання; 9 - скляний корпус (нагрітий).

Вакуумметр, температура ротора якого, збігається з температурою навколишнього середовища, може використовуватися як в'язкісний вакуумметр. Проте, при будь-яких вимірах слід враховувати вплив в'язкості газу. Розглянутий вакуумметр являє собою досить складний і дорогий пристрій. Будучи абсолютним вакуумметром, він, зазвичай, застосовується як еталон для градуювання іонізаційних вакуумметрів.

5.10. Груба оцінка вакууму

Ступінь вакууму можна оцінити за видом свічення газового розряду в розрядній трубці, яку приєднують до вакуумної системи. Газовий розряд стає помітним при тиску менше 10 Торр і має вигляд “шнуру”, що розміщений на осі трубки і випромінює світло. Зниження тиску приводить до розширення шнура і при тиску в 1 Торр він заповнює весь поперечний переріз трубки, але яскравість свічення зменшується. Трубка випромінює слабе дифузне світло. Якщо тиск стає рівним 0,1 Торр, то розряд стає дуже блідим і з'являються світні поперечні смуги (страсти). Свічення газу стає майже непомітним при тиску 10^{-2} Торр, але під дією бомбардування стінки трубки іонами та електронами з'являється зеленувата або блакитна флуоресценція скла (залежно від складу скла). Наступне зниження тиску до 10^{-3} Торр приводить до

зникнення будь-якого свічення. При $\sim 10^{-4}$ Торр - ніякого світіння немає (чорний або темний вакуум).

5.11. Градування вакуумметрів

Існують два основні методи градування вакуумметрів: статичний і динамічний. При використанні статичного методу градуваний вакуумметр під'єднується до вакуумної камери поблизу від зразкового (еталонного) і проводиться порівняння показів обох приладів в умовах рівноваги. Камера повинна бути сконструйована таким чином, щоб гарантувати однаковий тиск по всьому об'єму (неприпустима наявність в камері потоків газу). Крім того, вакуумна система повинна забезпечувати досягнення і збереження значно більш низького тиску в порівнянні з необхідним для проведення вимірювань.

Цей метод найбільш доцільно використовувати для вакуумметрів з робочим діапазоном вимірювань від 10 до 10^{-3} Па, тобто при таких тисках, зазвичай використовують скляні відпаяні системи. Для таких вакуумметрів може бути досягнута точність краще $\pm 1\%$.

Однак для надвисоких вакуумметрів виконання перерахованих вище умов практично неможливо, що пояснюється наступними причинами. По-перше, єдиними вакуумметрами, які можуть бути використані в якості еталонних, є динамічні і радіометричні вакуумметри, нижня межа вимірювання тиску для яких становить близько 10^{-7} Па. Тому в разі приладів, призначених для умов надвисокого вакууму, доводиться покладатися на градування за допомогою вторинних еталонів (попередньо відградуваних іонізаційних вакуумметрів) або використовувати метод екстраполяції до більш низьких тисків. По-друге, необхідно, щоб залишковий тиск в системі був нижче 10^{-8} Па, досягти якого і для відпаяних систем непросто, крім того, потрібно точно знати склад використаного при градуванні газу, що не завжди вдається. Проте цей метод застосовується і призводить до задовільного результату. Особливо він корисний при перевірці чутливості і градуванні вакуумметрів серійного виробництва.

Проблема атестації вакуумметрів може бути частково вирішена за допомогою методу об'ємного розширення. Суть цього методу зводиться до того, що невелика кількість газу відомого обсягу, що знаходиться при тиску вище 10^{-3} Па (яке може бути виміряне з досить високим ступенем точності), розширюється в камері відомого (великого) обсягу, до якої підключено градуваний вакуумметр. Після розширення та встановлення рівноваги тиск газу визначається за законом Бойля–Маріотта на підставі відомого відношення обсягів, величина якого може досягати 10^7 . Цей метод можна використовувати або багаторазово для двох камер, або для декількох послідовних камер з меншими значеннями відношення обсягів.

5.12. Вимірювання парціальних тисків

На роботу вакуумних приладів, у тому числі газорозрядних джерел світла, дуже впливає не тільки ступінь вакууму, але й склад залишкових газів. Від того, які гази і їх кількість залишилися в електронному вакуумному приладі залежить якість та надійність роботи. Тому є необхідність аналізу залишкових

газів і оцінки їх парціальних тисків при виготовленні таких приладів. Вимірювачі парціальних тисків, як і загальних, характеризуються нижньою і верхньою межами вимірюваних парціальних тисків, чутливістю, а також властивим тільки їм параметром - роздільною здатністю.

Вимірювання парціальних тисків у вакуумних системах в даний час здійснюють двома методами: *іонізаційним і сорбційним*. Іонізаційний метод заснований на іонізації і поділу позитивних іонів в залежності від відношення маси до заряду. Сорбційний метод використовує аналіз адсорбованих газів.

Залежно від фізичних ефектів, що використовуються, іонізаційні газоаналізatori аналізatori поділяються на:

а) мас-спектрометри з магнітним розподілом іонів - використовується залежність радіуса кривизни траєкторії позитивних іонів, що рухаються у постійному магнітному полі, від співвідношення заряду q до його маси m ;

б) омегатрони – мас-спектрометри, в яких використовується залежність резонансної частоти коливань іонів у змінному електричному і постійному магнітному полі від співвідношення q/m ;

в) хронотрони – газоаналізatori, в яких використовується залежність часу прольоту іонів однакової відстані від їх маси.

Принцип дії магнітного газоаналізатора (мас-спектрометра) заснований на просторовому поділі моноенергетичного пучка іонів в однорідному поперечному магнітному полі (рис.5.18). Іоноутворення здійснюється електронним бомбардуванням (Ie) нейтральних газових молекул в іонному джерелі 1. Іонне джерело знаходиться під негативним потенціалом щодо землі, тому виштовхує іонний пучок I^+ в простір дрейфу зі швидкостями $v \sim (q/m) 0,5$. У просторі дрейфу діє поперечне магнітне поле з індукцією B ; під впливом сили Лоренца $F_1 = qvB$ позитивні іони рухаються в напрямку, обумовленому правилом лівої руки, по колах постійних радіусів R . При цьому доцентрова сила Лоренца врівноважується відцентровою силою $F_2 = mv^2 / R$. З умови рівності сил $F_1 = F_2$ радіус траєкторії іонів: $R = mv / (qB)$.

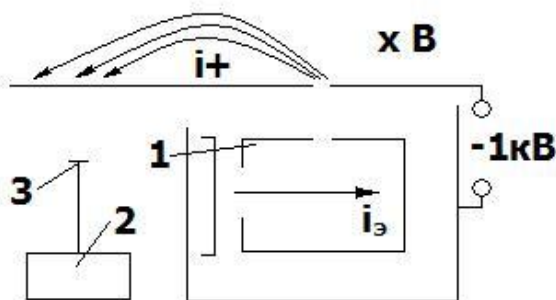


Рис.5.18. Схема магнітного газоаналізатора.

В результаті на колектор 3 потрапляють тільки ті іони, радіус яких відповідає положенню щілини в діафрагмі перед колектором. Змінюючи радіус траєкторії іона R за рахунок зміни прискорюючої напруги або індукції B ,

можна забезпечити попадання на колектор іонів з різними масовими числами. Іонний струм реєструється приладом 2.

Чутливість мас-спектрометра зростає при збільшенні ширини щілин. Верхня межа робочих тисків 0,01 Па визначається постійністю коефіцієнта чутливості, нижня 10^{-8} Па - фоновими струмами.

Для проведення аналізу за допомогою методу сорбції в камеру з досліджуваним газом, що має звичайний манометричний перетворювач, поміщають вольфрамову нитку, яка прогривається прямим пропусканням струму. Перед початком роботи її треба відгазити прогрівом до 2500 К. Після охолодження на її поверхні адсорбуються молекули залишкових газів. При нагріванні нитки відбувається десорбція газів і тиск у камері підвищується, причому десорбція різних газів відбувається при різній температурі нитки. Для підвищення чутливості приладу необхідно збільшувати адсорбуючу поверхню. Якщо адсорбуючу поверхню охолодити, то можна провести аналіз газів з малою теплою адсорбції.

5.13. Вакуумметри з активним датчиком

Як ми побачили в цьому розділі, загалом традиційні вакуумметри складаються з пасивного датчика - манометричного перетворювача, який формує сигнал, пропорційний тиску у вакуумній камері, і спеціалізованого вимірювального блоку, який цей сигнал обробляє і здійснює індикацію тиску на вимірювальному приладі. Основним недоліком таких вакуумметрів є те, що сигнал з пасивного манометричного перетворювача малий за величиною (особливо при високому вакуумі). Передача його до вимірювального блоку здійснюється по проводах, іноді досить довгим. Через малу величину сигналу, по-перше, неминучі обмеження, що накладаються на довжину кабелю, який зв'язує пасивний манометричний перетворювач і вимірювальний блок. По-друге, необхідне якісне екранування такого кабелю - тільки за таких умов можна без втрат і спотворень передати малий сигнал. По-третє, у разі манометричних перетворювачів, для роботи яких необхідні високі напруги (інверсно-магнетронні, іонізаційні), живлення до перетворювача підводиться від вимірювального блоку по тому ж кабелю, що також позначається на зручності користування приладом і на точності вимірювань (наприклад, напруга, яка необхідна для роботи інверсно-магнетронного перетворювача складає одиниці кіловольт). Вимірювальний блок такого вакуумметра є вузькоспеціалізованим і розрахований, як правило, на роботу тільки з перетворювачами одного типу.

Вакуумметри з активним датчиком позбавлені цих недоліків. Активний датчик складається з власне манометричного перетворювача - датчика і електронної схеми, розташованої в безпосередній близькості до його виходу. Манометричний перетворювач і електронна схема монтуються безпосередньо на фланці, який приєднується до вакуумної системи. Електронна схема забезпечує обробку сигналу з датчика, і його перетворення в стандартний аналоговий і / або цифровий сигнал. Передача такого сигналу суттєво простіша і надійніша, ніж у випадку традиційних вакуумметрів. Електронна

схема формує всі необхідні для манометричного перетворювача робочі напруги з поданої на її вхід напруги малої величини (як правило 24В) - відповідно немає необхідності передавати високу напругу від реєструючого блоку (блоку індикації).

Блок індикації в цьому випадку універсальний і може бути застосований на підключення декількох активних датчиків. Ці датчики можуть бути різних типів. Блок індикації розпізнає їх тип по сигналу з електронної схеми. Сучасні активні датчики можуть складатися з двох перетворювачів – низько- і високовакуумного, причому для користувача такий датчик сприймається як один, розрахований на весь діапазон вимірювань (так звані "full-range" датчики).

Основними напрямками розвитку вакуумметричної апаратури є:

- мініатюризація всіх складових частин вакуумметрів;
- розширення номенклатури і конструктивне вдосконалення комбінованих вакуумметрів і комбінованих перетворювачів тиску,
- розробка і впровадження нових форм вакуумметричних приладів - вторинних електронних пристроїв, сполучених з первинними перетворювачами, і можливістю забезпечити вироблення вимірювального сигналу в цифровому вигляді без відображення на вихідному приладі.

Тестові завдання до розділу 5.

1. З яких двох елементів складається більшість вакуумметрів?
 - 1 – з датчика та приладу, що вимірює іонний струм іонізованого газу;
 - 2 – датчика – перетворювача сигналу тиску в електричний сигнал та вимірювального блоку;
 - 3 – з датчика та мікроамперметра.
2. Який прилад називають вакуумметром?
 - 1 – прилад для вимірювання вакууму;
 - 2 – прилад для вимірювання тиску від атмосферного до 10^{-14} Торр;
 - 3 – прилад для вимірювання тиску газу нижче атмосферного.
3. Чому у ВТ датчик для вимірювання тиску не зручно називати манометром?
 - 1 – манометром вимірюють і тиск вище атмосферного;
 - 2 – це може бути і складовою вакуумметра і прилад, що вимірює тиск вище атмосферного;
 - 3 – цей прилад має грубу шкалу.
4. Який діапазон тисків охоплює компресійний манометр?
 - 1 – від 10^{-4} Торр і нижче;
 - 2 – від декілька Торр до 10^{-6} Торр;
 - 3 – від декілька Торр до 10^{-4} Торр.
5. При яких тисках Р похибка вимірів компресійним манометром є мінімальною?
 - 1 – $P < 10^{-2}$ Торр;
 - 2 – Більших 10^{-2} Торр;
 - 3 – $P = 10^{-4}$ Торр.
6. При яких тисках похибка вимірів компресійним манометром складає 2 – 3%?
 - 1 – декілька Торр до 10^{-6} Торр;
 - 2 – вище 10^{-2} Торр;
 - 3 – менше 10^{-6} Торр.
7. Недолік компресійного манометра якщо тиск, що вимірюється, повільно змінюється?
 - 1 – незручність спостереження за висотою стовпчика ртуті в капілярі;
 - 2 – спостереження за зміною тиску у вакуумній камері неможливо;
 - 3 – суттєво погіршується похибка вимірів.

8. Який головний недолік ртутного рідинного манометра?
 - 1 – ртуть майже в 13 разів важча від води;
 - 2 – можливе забруднення вакуумної установки і робочого приміщення;
 - 3 – велика вартість ртуті.
9. Що собою конструктивно представляють рідинні вакуумметри?
 - 1 – капіляри, в яких використовуються спирт;
 - 2 – U – подібні трубки з ртуттю та їх модифікації;
 - 3 – трубки, в яких використовуються спеціальні вакуумні олії.
10. Чутливий елемент у найбільш поширених деформаційних вакуумметрів:
 - 1 – сильфон; 2 – мембрана; 3 – сильфон або мембрана.
11. Методи градуювання манометра Мак-Леода:
 - 1 – лінійний; 2 – квадратичний; 3 – логарифмічний.
12. Як залежить величина тиску в манометрі Мак-Леода від об'єму балона V_0 з ртуттю?
 - 1 – пропорційна V_0 ; 2 – обернено пропорційна V_0 ; 3 – не залежить.
13. З якого матеріалу виготовляють компресійний манометр?
 - 1 – нержавіюча сталь; 2 – мідь; 3 – скло.
14. Чому перерізи двох капілярів сполучених посудин рідинного манометра мають бути однаковими?
 - 1 – для симетрії дизайну;
 - 2 – щоб не були різними капілярні сили в них;
 - 3 – щоб у запаяному капілярі не було прилипання ртуті.
15. Якої дії є компресійний манометр?
 - 1 – прямої;
 - 2 – непрямої;
 - 3 – прямої при великих тисках ($P > 10^{-3}$ Торр) або не прямої дії при тисках $P < 10^{-4}$ Торр.
16. На чому заснована дія компресійних манометрів?
 - 1 – на створенні компресії;
 - 2 – на законі ізотермічного тиску ідеального газу;
 - 3 – на вирівнюванні тиску стовпчика ртуті з атмосферним (дослід Торрічеллі).
17. Яка з наведених формул для визначення тиску у вакуумній системі P_c по висоті стовпчика ртуті h в капілярах є вірною $P_c = \rho h^2$ або $P_c = \rho h$?
 - 1 – перша;
 - 2 – друга;
 - 3 – обидві для методу квадратичної шкали та методу лінійної шкали, відповідно.
18. Яка величина вимірюється у теплоелектричному вакуумметрі, активним елементом якого є термоопір?
 - 1 – сила струму через термоопір;
 - 2 – напруга на клеммах термоопору;
 - 3 – теплопровідність залишкового газу.
19. Чим обмежується можливість використання лампи ПМИ-2 при тисках $< 10^{-8}$ Торр?
 - 1 – при таких тисках припиняється процес іонізації;
 - 2 – при таких тисках струм колектора стає рівновеликим фотострумові з колектора;
 - 3 – при таких тисках струм колектора є дуже малим $\approx 5 \cdot 10^{-9}$ А.
20. Чим обумовлений струм витоку колектора іонізаційного манометра ПМИ-2?
 - 1 – забрудненням поверхні лампи;
 - 2 – забрудненням внутрішньої поверхні;
 - 3 – забрудненням, як зовнішньої так і внутрішньої поверхні балону.
21. Чим обумовлений фотоелектронний струм колектора, що обмежує використання манометричної лампи ЛМ-2 при тисках $< 5 \cdot 10^{-8}$ Торр?
 - 1 – дією м'якого рентгенівського випромінювання з анода-сітки лампи;
 - 2 – випромінюванням з катоду;
 - 3 – внутрішніми переходами електронів в атомах колектора.

- 22.** Принципова відмінність в конструкції лампи Баярда-Альперта від манометричної лампи ПМИ-2?
- 1 – використовуються два, а не один термокатод;
 - 2 – колектором служить дротинка діаметром 0,1мм замість циліндра значно більшої поверхні;
 - 3 – термокатод зміщений відносно осі лампи.
- 23.** Чим відрізняються електричні схеми живлення ламп ПМИ-2 та Баярда-Альперта?
- 1 – нічим не відрізняються;
 - 2 – на колектор подається більша від'ємна напруга;
 - 3 – подається більша додатна напруга між катодом та анодом-сіткою.
- 24.** Граничний тиск газу, який може бути виміряний лампою Баярда-Альперта?
- 1 – 10^{-8} Торр;
 - 2 – 10^{-10} Торр;
 - 3 – 10^{-12} Торр.
- 25.** Чи можливий безперервний контроль за станом вакууму термопарним манометром?
- 1 – неможливий;
 - 2 – можливий з врахуванням інерційності вимірів $\sim 0,3$ хв.;
 - 3 – можливий при тисках що відповідають вузькому діапазону 10^{-1} - 10^{-3} Торр.
- 26.** Розширення можливостей вимірювання тиску при надвисокому вакуумі лампою Баярда-Альперта порівняно з можливостями манометричної лампи ЛМ-2:
- 1 – від 10^{-6} до 10^{-7} Торр;
 - 2 – від 10^{-8} до 10^{-10} Торр;
 - 3 – від 10^{-8} до 10^{-12} Торр.
- 27.** Чому покази термопарного манометра залежать від типу газу (повітря, азот, кисень)?
- 1 – у різних газів різна теплопровідність;
 - 2 – різні гази по різному діють на термопару;
 - 3 – опір нагрівника термопари залежить від тиску газу.
- 28.** Чому фотострум з колектора лампи Баярда-Альперта значно менший ніж у манометричної лампи ПМИ-2?
- 1 – менша засвітка від термокатодів;
 - 2 – значно менша поверхня колектора;
 - 3 – використовується інший матеріал колектора.
- 29.** Якому газіві відповідає градувальна крива термопарного манометра, яка приводиться у паспорті манометричної лампи ПМИ-2 (ЛМ-2)?
- 1 – азоту;
 - 2 – суміші азоту і кисню;
 - 3 – сухому повітрю.
- 30.** Яким чином збільшується ефективність іонізації розрідженого газу при надвисокому вакуумі ($P < 10^{-8}$ Торр) у лампі Баярда-Альперта?
- 1 – аналогічно тому як і у випадку використання манометричної лампи ЛМ-2 тобто, збільшенням шляху проходження електрона від катода до анода-сітки;
 - 2 – конструктивними особливостями;
 - 3 – використанням двох катодів замість одного у лампі ЛМ-2.
- 31.** Три основні елементи іонізаційної манометричної лампи ПМИ-2 (ЛМ-2):
- 1 – катод, анод та колектор іонів;
 - 2 – скляний балон, вивід колектора іонів, схема реєстрації іонів;
 - 3 – катод, сітка та анод.
- 32.** Який тиск попереднього розрідження потрібен для надійної роботи манометричної електронно-іонізаційної лампи Баярда-Альперта?
- 1 – 10^{-2} Торр;
 - 2 – менший 10^{-3} Торр;
 - 3 – більший за 10^{-3} Торр.
- 33.** Які вакуумметри з класу іонізаційних є найбільш поширеними?
- 1 – електронні іонізаційні;
 - 2 – газорозрядні іонізаційні;
 - 3 – магнетронні іонізаційні.
- 34.** Чому на графіковій градувальній кривій при мінімальному тискові 10^{-4} Торр е.р.с. термопари складає 10 мВ?
- 1 – встановлення відповідного струму дротини підігріву при тисках $< 10^{-4}$ Торр;
 - 2 – 10 мВ є максимальною е.р.с при тискові 10^{-4} Торр;
 - 3 – обмежені можливості термопари при 10^{-4} Торр.

- 35.** Чи змінюється точність виміру тиску розрідженого газу електронно-іонізаційними манометрами?
- 1 – не змінюється;
 - 2 – чим менший тиск тим вища точність вимірів;
 - 3 – точність погіршується з наближенням до мінімальних тисків.
- 36.** В якому інтервалі тисків використовуються електронні іонізаційні вакуумметри (без використання магнітного поля)?
- 1 – 10^{-3} - $5 \cdot 10^{-10}$ Торр;
 - 2 – 10^{-4} - 10^{-8} Торр;
 - 3 – 10^{-2} - 10^{-6} Торр.
- 37.** Як досягається розширення діапазону тиску електронно-іонізаційного вакуумметра?
- 1 – збільшенням термоелектронної емісії з термокатоду;
 - 2 – застосуванням магнітного поля;
 - 3 – вибором конфігурації електродів.
- 38.** Яке явище використовується у термопарному вакууметрі для вимірювання тиску розрідженого газу?
- 1 – залежність концентрації складових залишкового газу від температури;
 - 2 – залежність теплопровідності газу від концентрації складових залишкового газу;
 - 3 – залежність тиску залишкових газів від її концентрації.
- 39.** Для чого служить розігрітий до високої температури катод в електронно- іонізаційному манометрі?
- 1 – щоб відштовхувати позитивно заряджені іони;
 - 2 – для запалення іонізуючого розряду в залишкових газах;
 - 3 – для створення потоку електронів з метою іонізації молекул залишкових газів.
- 40.** Застосування магнітного поля в магнітронному-іонізаційному вакууметрі призводить до збільшення чутливості:
- 1 – за рахунок фокусування потоку електронів;
 - 2 – внаслідок високої ефективності іонізації розрідженого газу при русі електронів у схрещених електричному і магнітному полях;
 - 3 – за рахунок захисту колектора від розсіяних заряджених частинок.
- 41.** Чому із зменшенням тиску розрідженого газу е.р.с. термопари зростає у термопарного вакуумметра?
- 1 – менше тепла нагрівника віддається залишковому газу;
 - 2 – за рахунок збільшення температури нагрівника.
 - 3 – за рахунок збільшення струму нагрівника.
- 42.** Що собою представляє анод іонізаційного вакуумметра?
- 1 – пластинку з нікелю;
 - 2 – вольфрамову дротинку;
 - 3 – біфілярно намотану з молібденового дроту спіраль.
- 43.** Чому тиск розрідженого газу 10^{-4} Торр є мінімальним, що може бути ще визначеним за допомогою термопарного вакуумметра?
- 1 – практично зникає теплопровідність газу;
 - 2 – через властивості термопари з хромеля і копеля;
 - 3 – при нижчих тисках струм розігріву не змінюється.
- 44.** Конструкція катода манометричної лампи ПМИ-2:
- 1 – вольфрамова спіраль;
 - 2 – петля з вольфрамової дротинки закріпленої по осі балона;
 - 3 – молібденова смужка.
- 45.** У скільки разів чутливість магнетронного іонізаційного вакуумметра більша, ніж у електронно-іонізаційних манометрах без застосування магнітного поля?
- 1 – 10^2 ;
 - 2 – 10^3 ;
 - 3 – 10^4 – разів.
- 46.** Мінімальний тиск розрідженого газу, який може бути визначений манометричною лампою ПМТ-2 (ЛТ-2)?
- 1 – 10^{-3} Торр;
 - 2 – 10^{-4} Торр;
 - 3 – 10^{-5} Торр.

- 106

- 61.** Чи залежить чутливість іонізаційного манометру від роду газу що відкачується (повітря, азот, кисень, тощо)?
 1 – не залежить; 2 – залежить; 3 – залежить при тисках $10^{-7} - 10^{-8}$ Торр.
- 62.** Чи залишається лінійною залежність іонного струму в іонізаційному манометрі від тиску різних газів, що відкачуються (повітря, кисень, азот, тощо) $I_i = kP$?
 1 – не залишається, а змінюється до $I_i = kP^2$;
 2 – не залишається при відносно великих тисках $10^{-2} - 10^{-4}$ Торр.
 3 – залишається при різних k окремо для кожного газу.
- 63.** Чи можливо використовувати ПМИ – 2 для вимірювання тисків пари рідин?
 1 – не можливо;
 2 – можливо з врахуванням зміни чутливості манометра до різних газів та парів;
 3 – можна при відносно великих тисках – $10^{-2} - 10^{-4}$ Торр.
- 64.** При грубій оцінці вакууму зникнення свічення газового розряду в розрядній трубці свідчить про який тиск?
 1 – 0,001 Торр; 2 – 0,01 Торр; 3 – 1 Торр.
- 65.** Переваги радіоізотопних перетворювачів:
 1 – відсутність розжареного катода;
 2 – висока міцність конструкції;
 3 – широкий діапазон робочих тисків.
- 66.** Діапазон тисків, які можна вимірювати приладом ВР-4 з датчиком МР-8:
 1 – 10^3 до 10^{-4} Па; 2 – 10^5 до 10^{-2} Па; 3 – 10^{-2} до 10^{-8} Па.
- 67.** Принцип дії омегатрону:
 1 – залежність резонансної частоти коливань іонів у змінному електричному і постійному магнітному полі від співвідношення q / m ;
 2 – залежність часу прольоту іонів однакової відстані від їх маси;
 3 – залежність радіуса кривизни траєкторії позитивних іонів, що рухаються у постійному магнітному полі, від співвідношення q / m .
- 68.** Принцип дії хронотрону:
 1 – залежність резонансної частоти коливань іонів у змінному електричному і постійному магнітному полі від співвідношення q / m ;
 2 – залежність часу прольоту іонів однакової відстані від їх маси;
 3 – залежність радіуса кривизни траєкторії позитивних іонів, що рухаються у постійному магнітному полі, від співвідношення q / m .
- 69.** Яким приладом можна виміряти парціальний тиск азоту в повітряній суміші?
 1 – мас-спектрометром;
 2 – радіоактивним манометром;
 3 – манометром опору.

6. ВАКУУМНІ СИСТЕМИ ТА ЇХ ЕЛЕМЕНТИ

6.1. Вакуумні уловлювачі та їх експлуатація

6.1.1. Призначення та основні вимоги до вакуумних уловлювачів.

При високому тиску (більше 10^2 Па) зворотний потік парів робочої рідини затримується зустрічним потоком відкачуваного газу, і в застосуванні захисних пристроїв не виникає необхідності. При більш низькому тиску, коли довжина вільного пробігу молекул газу стає більше діаметра вхідного патрубку насоса, пари рідини можуть рухатися назустріч основному потоку і проникати у камеру, яка відкачується. Якщо температура насоса вище, ніж температура відкачуваного об'єкта, то зворотний потік буде існувати до тих пір, поки вся пара робочої рідини насоса не переміститься в камеру. Для захисту відкачуваного об'єму від пари робочої рідини використовуються спеціальні пристрої, які називаються *пастками*. Отже, *вакуумними уловлювачами* (пастками) називаються пристрої, що встановлюються у вакуумну систему і призначені для уловлювання пари робочої рідини насоса та зниження тим самим її проникнення у відкачуваний об'єм. Окрім одержання безоливного вакууму пастки уловлюють механічні частинки, які можуть утворюватися у камері і насосі. Таким чином, пастки слугують для покращення вакууму. Залежно від діапазону робочих тисків їх поділяють на форвакуумні (уловлювання пари робочих рідин форвакуумних насосів при в'язкісному та молекулярно-в'язкісному режимах течії пари із насосів) і високовакуумні (уловлювання пари робочих рідин із дифузійних і бустерних пароструминних насосів при молекулярному режимі течії пари з насосів).

Залежно від принципу дії уловлювачі поділяються на механічні (масловідбиваючі), низькотемпературні (конденсаційні), адсорбційні, термічні (гарячі, термосорбційні) та електричні (газорозрядні). Найбільшого поширення набули механічні, низькотемпературні й адсорбційні уловлювачі.

Основними характеристиками уловлювачів є їх *захисна здатність та питома провідність*. *Захисну здатність уловлювача β* визначають як відношення потоку пари робочої рідини $Q'_{\text{п}}$, що надходить з насоса в уловлювач за одиницю часу, до потоку пари $Q''_{\text{п}}$, який пройшов через уловлювач до відкачуваного об'єму:

$$\beta = Q'_{\text{п}} / Q''_{\text{п}}$$

Іноді, як показник, що характеризує захисну здатність уловлювача, використовують безпосередньо потік $Q''_{\text{п}}$, віднесений до одиниці площі вхідного отвору уловлювача, або парціальну частку пари робочої рідини та продуктів термічного розкладу в спектрі залишкових газів у відкачуваній системі за уловлювачем.

Питома провідність уловлювача визначають як відношення провідності уловлювача $U_{\text{ул}}$ до площі його вхідного отвору $F_{\text{ул}}$.

При конструюванні уловлювачів залежно від їх призначення до них ставиться ряд наступних вимог.

1. Уловлювачі мають добре захищати відкачуваний об'єм від проникнення пари робочої рідини, тобто повинні мати максимальну захисну здатність.

2. Уловлювачі повинні якомога менше знижувати швидкодію насоса. Правильно сконструйований уловлювач знижує швидкість роботи насоса не більше ніж на 30–40 %.
3. Уловлювачі повинні мати конструкцію, яка б забезпечувала доступ до захисних елементів для їх періодичного очищення.
4. Уловлювачі, які застосовуються в надвисоковакуумних системах, повинні допускати прогрівання до 750K з метою їх знегажування.
5. Конструкції охолоджуваних пасток повинні забезпечувати малі витрати холодоагента.

6.1.2. Механічні уловлювачі. Для зменшення зворотного потоку пари робочої речовини застосовуються захисні ковпачки, які встановлюються над краєм сопла дифузійного насоса (рис.6.1), та масловідбивачі. Правильно встановлений захисний ковпачок створює бар'єр для теплової хмари пари й перехоплює потік, що викидається із струменя сопла пароструминного насоса.

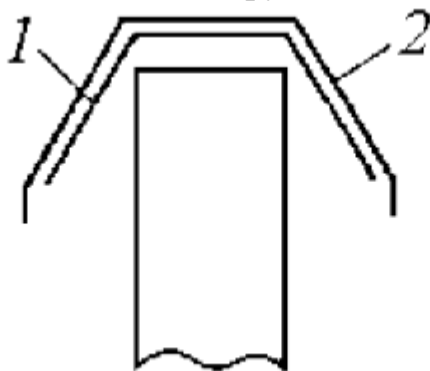


Рис.6.1. Сопло зонтичного типу: 1 – зонтик; 2 – захисний ковпачок

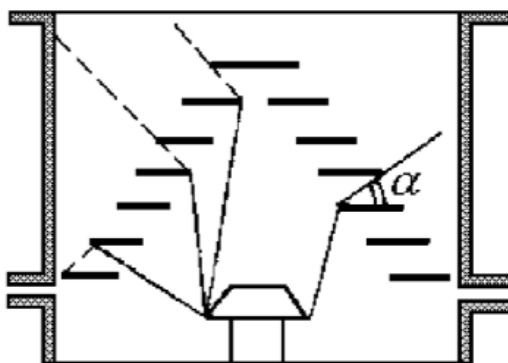


Рис.6.2. Схема (а) та вигляд (б) конічного дискового масловідбивача.

Серед механічних масловідбивачів найбільшу ефективність має конічний дисковий уловлювач, принцип дії якого показано на рис.6.2. Захисна здатність такого уловлювача характеризується максимальним кутом α , утвореним між горизонтальною площиною та вторинним променем потоку, спрямованим у бік високого вакууму (пунктирні лінії на рис.6.2). Потік спрямовується на стінку, на якій конденсується. Наприклад, зворотний потік пари масла для пароструминного насоса становить 10^{-3} мг/(с·см²). Якщо на його шляху встановити механічний відбивний ковпачок, то за рахунок

відбивання молекул пари її потік зменшується до 10^{-5} мг/(с·см²). Жалюзійні й конічні дискові пастки знижують зворотний потік до 10^{-3} мг/(с·см²). Механічні уловлювачі охолоджуються за рахунок теплопровідності від корпусу насоса або водою. У тих випадках, коли необхідно підвищити захисну здатність масловідбивача, застосовують охолодження до більш низьких температур.

В якості механічних пасток застосовують фільтри-сорбенти. Фільтри із пористих матеріалів зменшують потік парів робочої рідини, які проникають у вакуумну систему з механічних насосів з масляним ущільненням. В якості фільтрів можуть використовуватися пористі нікель, фторопласт, нержавіюча сталь. Найзручнішим матеріалом є пориста нержавіюча сталь із розмірами пор (капілярів) від 4 до 20 мкм. Механізм уловлювання молекул робочої рідини полягає в їх сорбції на стінках капілярних каналів фільтра, завдяки чому зворотний потік пари за фільтром зменшується в 10^6 разів. Тому фільтри застосовують для уловлювання туману з форвакуумних оливних насосів. Термін експлуатації фільтрів-сорбентів від 200 до 700 годин.

6.1.3 Низькотемпературні охолоджувальні уловлювачі. Для найбільш повного захисту відкачуваної системи від пари робочої рідини пароструминних насосів призначені низькотемпературні уловлювачі, які знижують тиск пари до значення, що відповідає температурі охолоджених елементів уловлювача. Ці пастки не тільки запобігають проникненню шкідливої пари у відкачуваний об'єм, а й вловлюють пару і гази, які є у вакуумній камері, що дозволяє отримувати в добре знегаженій системі тиск залишкових газів на рівні 10^{-8} Па для паромасляних дифузійних насосів і 10^{-10} Па для парортутних. Для дифузійних насосів застосовують уловлювачі, охолоджувані до температур від 243 до 77 К.

Процес видалення пари методом конденсації називають виморожуванням, тому уловлювачі з охолоджуваними поверхнями отримали назву *виморожувальних, або конденсаційних*. Виморожувальні уловлювачі поділяють на прості й високовакуумні, а залежно від матеріалу, з якого вони виготовлені, – на скляні й металеві.

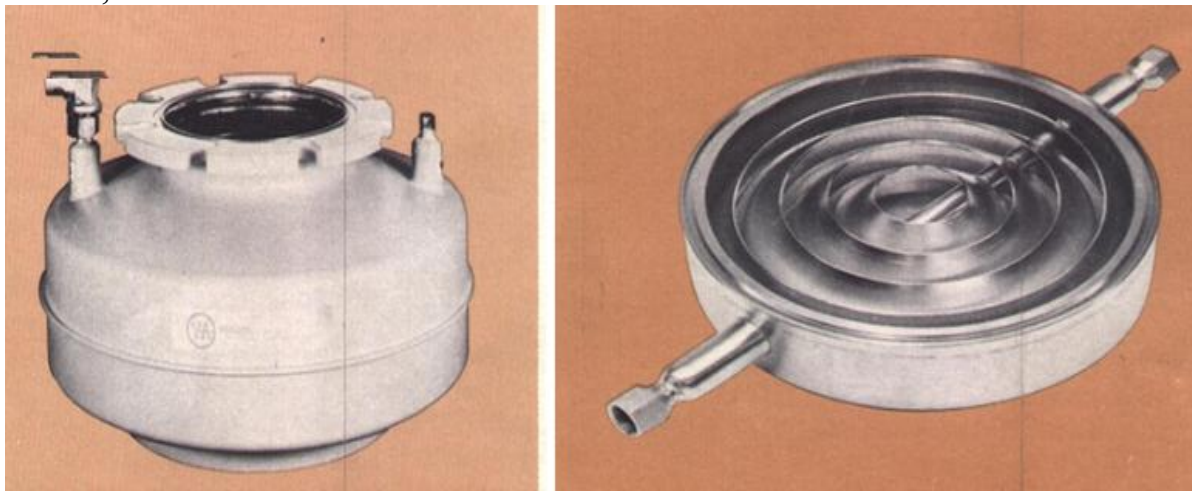


Рис.6.3. Конденсаційні пастки.

На рис.6.3 показано азотні пастки фірми Vacma (зліва) і фірми Varian (справа). Для охолодження конденсаційних пасток застосовують воду; суміш льоду і NaCl (дозволяє досягти -18°C); суміш льоду і CaCl_2 (-48°C); тверду вуглекислоту зі спиртом (-78°C); фреон (-120°C); рідке повітря (183°C); рідкий азот (-186°C). Дані таблиці 6.1 ілюструють покращення вакууму, який створюється дифузійним насосом для різних робочих рідин, при використанні пасток. Видно, що зниження температури поверхні, на якій конденсуються пара робочої рідини, значно зменшує її пружність.

Табл.6.1

Холодоагент	Температура	$P_{\text{нас}} \text{ H}_2\text{O},$ Тор / Па	$P_{\text{нас}} \text{ Hg},$ Тор / Па	$P_{\text{нас}} \text{ ПФЕ},$ Тор / Па	$P_{\text{нас}} \text{ ВМ-1},$ Па
Вода	20°C	$17,5 / 2,3 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^{-3} / 1,6 \cdot 10^{-1}$	$10^{-7} / 10^{-5}$	10^{-5}
Лід	0°C	$4,6 / 6 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^{-4} / 2,6 \cdot 10^{-2}$	$10^{-9} / 10^{-7}$	10^{-6}
CO_2 (твердий)	-80°C	$4 \cdot 10^{-4} / 5,3 \cdot 10^{-2}$	$10^{-10} / 10^{-8}$	$10^{-14} / 10^{-12}$	10^{-6}
Рідке повітря	-183°C	$10^{-10} / 10^{-8}$	$10^{-27} / 10^{-25}$		10^{-8}
Рідкий азот	-196°C	$10^{-12} / 10^{-10}$	$10^{-28} / 10^{-26}$	$10^{-18} / 10^{-16}$	10^{-8}

6.1.4 Адсорбційні уловлювачі. Незважаючи на те, що охолоджувані уловлювачі забезпечують досить надійний захист відкачуваного об'єму від потрапляння в нього пари робочої рідини, їх головним недоліком є необхідність безперервної подачі охолоджувальної речовини.

Висока адсорбційна здатність деяких пористих речовин-адсорбентів (цеолітів, активованого окислу алюмінію, активованого вугілля, силікагелю, пористих металів) щодо пари масла дає можливість створювати ефективні уловлювачі. Адсорбенти перед використанням потребують очищення шляхом прогрівання до $600\text{--}700 \text{ K}$ у вакуумі для видалення вологи та інших домішок, адсорбованих у порах при зберіганні адсорбенту в атмосферних умовах. Процедура активування повинна повторюватися кожного разу після контакту уловлювача з повітрям. Активування (регенерація) необхідне і після тривалого періоду роботи під вакуумом для видалення адсорбованих парів робочих рідин, якщо уловлювач перебуває у стані адсорбційної рівноваги.

На рис.6.4 показано адсорбційні уловлювачі, які мають вигляд розширеної ділянки вакуумпроводу, яка заповнена адсорбентом. Такі уловлювачі доцільно розміщувати в частині вакуумної системи, яка прогрівається, щоб забезпечити їх автоматичну регенерацію. За допомогою

цеолітових уловлювачів, виготовлених за схемою, зображеною на рис.6.4б, можна підтримувати вакуум $\sim 10^{-7}$ Па упродовж декількох десятків днів над вимкненим паромасляним насосом, обладнаним лише механічним відбивачем, охолоджуванім проточною водою.

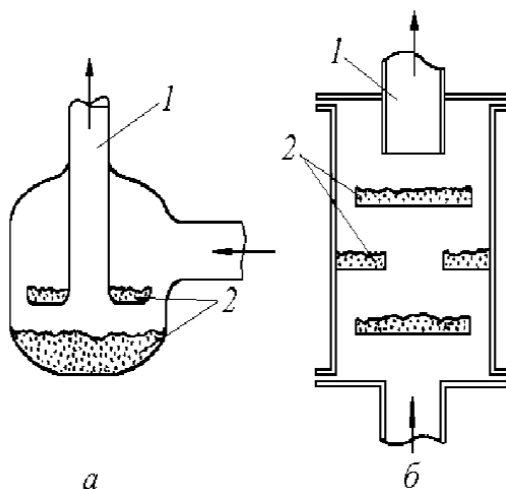


Рис.6.4. Неохолоджувані адсорбційні уловлювачі скляний (а) та металевий (б): 1 – вихідний патрубок; 2 – адсорбент.

Також застосовуються схеми вакуумних адсорбційних уловлювачів, обладнаних електричними нагрівачами для регенерації. Використання адсорбційних пасток у відкачувальних системах із паромасляними дифузійними насосами знижує зворотний потік робочої рідини у відкачуваний об'єм більше ніж у 100 разів. Недоліки: адсорбційні пастки зменшують швидкість відкачування на 30% та їх застосування потребує додаткового вакуумпроводу.

6.1.5. Гарячі (термічні) уловлювачі. Принцип дії термічних уловлювачів базується на розкладанні пари робочої рідини (масла) при її сильному нагріванні на газ (H_2 , CO , CO_2), які легко відкачуються, і вуглець. Отже, зворотний потік пари масла можна значно зменшити, якщо розмістити між дифузійним насосом та відкачуваним об'ємом оптично непрозорий масловідбивач 2, який нагрівається до високої температури (рис.6.5).

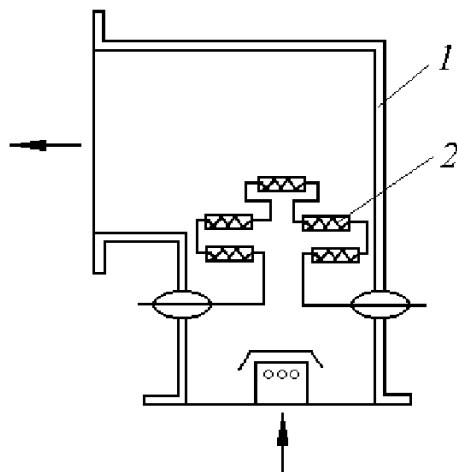


Рис.6.5. Нагрівний уловлювач.

Потрапляючи на масловідбивач 2, молекули масла розкладаються на вуглець та газоподібні компоненти. Перший осідає на стінках 1 уловлювача і служить поглиначем для молекул парів і газів, а газоподібні компоненти відкачуються дифузійним насосом.

Гарячі уловлювачі можна розміщувати з боку насосів попереднього розрідження для того, щоб запобігти потраплянню у високовакуумний насос пари легких фракцій олив. Оптимальна робоча температура гарячого уловлювача залежить від сорту масла і не перевищує 773К.

6.1.6. Електричні (газорозрядні) уловлювачі. При відкачуванні механічними вакуумними насосами з масляним ущільненням поряд із адсорбційними уловлювачами застосовують електричні (іонні) уловлювачі. Робота їх базується на тому, що молекули пари робочої рідини, потрапляючи в розрядний проміжок, можуть збуджуватися, іонізуватися або дисоціювати при зіткненнях з електронами у вільному просторі. Крім того, молекули, адсорбовані на стінках уловлювача, можуть також дисоціювати на більш легкі складові та вуглець під впливом іонного бомбардування. Збуджені молекули органічних сполук мають підвищену активність до адсорбції та полімеризації й утворюють стійку плівку на стінках уловлювача, яка має гетерні властивості. Частина молекул пари, яка перейшла в іонізований стан, під дією електричного поля може прямувати в бік насоса або на стінку уловлювача, сприяючи полімеризації вуглецеводневих сполук. Газоподібні компоненти, які утворилися при дисоціації, відкачуються насосом, а вуглець осідає на стінках уловлювача.

У більшості електричних уловлювачів мають місце всі перелічені явища, але ймовірність їх перебігу залежить від обраного типу розряду та густини розрядного струму.

Мас-спектрометричні дослідження, проведені у вакуумній системі з електричним уловлювачем, показали, що парціальний тиск пари робочої рідини зменшується приблизно у 100 разів, тиск пари води – у 4 рази, а кисень зникає практично повністю.

Електричні уловлювачі з холодним катодом можна успішно використовувати і на лініях попереднього розрідження, адже інверсно-магнетронний розряд досить стійко горить до тисків ~ 1 Па.

6.2. Вакуумні з'єднання

6.2.1. Конструкційні матеріали, що використовуються у вакуумній техніці. До матеріалів, що використовуються у ВТ, ставиться ряд вимог:

- вони повинні мати низький тиск парів при робочій температурі;
- мати малу газопроникність та газовіддачу;
- відсутність пор (найкращою вакуумною щільністю володіють метали, піддані вакуумному переплаву);
- повинні мати можливість швидкого знегажування;
- повинні бути корозієстійкими та немагнітними (ця вимога стосується металевих матеріалів).

Оскільки надвисоковакуумні установки потребують прогрівання до температури 573–673К упродовж декількох десятків годин, то не всі матеріали можуть використовуватися як конструктивні для надвисоковакуумної техніки.

Метали використовують у ВТ для виготовлення насосів, вентилів, камер, електродних систем та газопоглиначів. Чавун використовують для виготовлення корпусних деталей, що працюють у маслі в умовах низького та середнього вакууму. Сталі добре паяються та зварюються і можуть використовуватися для виготовлення деталей вакуумних систем, які не прогриваються, тобто в системах для отримання низького та середнього вакууму. Нержавіючі сталі 1Х21Н5Т та Х17Г9АН4 використовують для виготовлення сильно навантажених деталей у ВТ. Сталь 12Х18Н10Т є кислотостійкою, немагнітною, добре зварюється та паяється зі спеціальними флюсами; вона використовується у надвисоковакуумній техніці.

Алюміній марок АД1М, АМЦ використовують для виготовлення прокладок паропроводів масляних насосів, кріогенних екранів. Алюміній добре зварюється гелієво-дуговим зварюванням, має малу газопроникність. У зв'язку з цим для виходу електронних та рентгенівських променів із вакуумних камер використовують алюмінієві вікна. Проте Al не стійкий проти дії ртуті, тому користуватися алюмінієвими вентилями і деталями можна лише на вакуумних установках із масляними насосами і ні в якому разі – з ртутними. У надвисоковакуумній техніці Al не використовують.

Нікель завдяки легкості обробки та низькому тиску пари є гарним матеріалом для внутрішніх деталей електровакуумних приладів.

Вольфрам з усіх металів має найбільшу температуру плавлення і найнижчий тиск насичених газів. Тому із вольфраму виготовляють електроди для великих потужностей, нагрівальні елементи для високотемпературних печей, катоди і нитки розжарення в електровакуумних приладах.

Мідь широко застосовується у вакуумній техніці для виготовлення прокладок, внутрішньої арматури і корпусів відпаяних приладів. Рекомендується застосовувати марки найбільш чистої міді МБ (безкисневої). Присутність кисню в міді особливо шкідливо для зварювання міді і пайки або відпалу в водні. Зварні шви виходять пористими.

Латуні Л62 (62% Cu і 38% Zn) і ЛС59-1 (59% Cu, 1% Pb, 40% Zn) застосовуються для виготовлення деталей, що не піддаються прогріванню.

Цинк не використовують у високовакуумній техніці, бо він добре сублімує.

Молібден за своїми властивостями аналогічний вольфраму, але менш крихкий і тому краще обробляється. Використовується для виготовлення сіток та анодів електровакуумних приладів.

З титану виготовляються катоди магніторазрядних насосів.

Скло має низький тиск насичених парів навіть при високих температурах, воно газонепроникне і досить добре обробляється. Усе це призвело до того, що скло є важливим матеріалом ВТ. Дуже поширене вольфрамове та молібденове скло через високу тугоплавкість.

Використовують також скло, яке зварюється з металами, – це скло, до складу якого входить ковар. Для ковару і металів коефіцієнти лінійного розширення практично збігаються, що дуже важливо при їх з'єднанні.

Кераміки використовують як герметичні струмовведення, тобто як ізолятори. Поширені такі види вакуумно-щільної кераміки: стеатит, алундова кераміка, форстерит, циркон. Найбільш термостійкою є алундова кераміка (70-96% Al_2O_3) з температурою розм'якшення 1900°C . Вона добре паяється.

З пластмас у ВТ робляться багато деталей: ущільнювачі, мембрани, ізолятори, гнучкі трубопроводи тощо. Широко використовують фторопласт. Він досить еластичний і витримує температури до 523K . Однак, для надвисоковакуумних установок він практично не використовується, оскільки при суттєвому нагріванні виділяється фтор, який є дуже активною речовиною.

Гуми використовують у вакуумних установках, окрім надвисоковакуумних, тому що вони не витримують нагрівань і вирізняється високим газовиділенням, особливо при T вище $323\text{--}473\text{K}$.

6.2.2. Нерозбірні вакуумні з'єднання. Вакуумні системи невеликих розмірів, призначені для дослідних робіт, часто виготовляються повністю з тугоплавкого скла (С-47, С-87), що витримує інтенсивну термічну обробку. Усі з'єднання в них виконують шляхом паяння, здійснюваного нагріванням з'єднувальних елементів до температури розм'якшення скла. Для жорстко спаяних скляних з'єднань елементи повинні бути виготовлені зі стекл, різниця коефіцієнтів теплового розширення яких не перевищує 5 %.

Вакуумні установки великих розмірів внаслідок крихкості скла виготовляють тільки з металу. Особливо потрібно бути обережним, якщо у вакуумній системі є ртуть. У зв'язку з цим мідь, алюміній, золото, срібло і латунь застосовувати не можна, оскільки на них хімічно діє ртутна пара. У багатьох випадках насоси і вакуумні системи (наприклад, для одержання високого вакууму) виготовляють повністю з нержавіючої сталі.

Жорсткі з'єднання металевих деталей виконують шляхом паяння або зварювання, при цьому перевагу віддають твердим припоям порівняно з м'якими. Припої, що плавляться при температурі нижче 573K є м'якими, а припої з температурою плавлення вище 573K – твердими. Міцність паяння м'якими припоями звичайно невисока, а робоча температура з'єднаних деталей повинна бути не вищою 393K . Для запобігання окиснюванню паяння з'єднувальних деталей проводять без флюсу у вакуумі або водневій пічці.

Для виготовлення нерозбірних металевих з'єднань, що використовуються у вакуумних системах великих розмірів, застосовуються різні види зварювання.

Для низьковакуумних систем, а також при ремонтних роботах, часто використовуються клейові з'єднання. Епоксидний клей застосовується для з'єднання сталі, скла і кераміки з робочою температурою не більше 140°C . Кремнійорганічні клеї можуть витримувати короточасний нагрів до $300\text{--}350^\circ\text{C}$ або тривалу експлуатацію при $150\text{--}180^\circ\text{C}$.

6.2.3. Розбірні вакуумні з'єднання. Розбірними називаються вакуумні з'єднання, що дозволяють розділяти і знову з'єднувати окремі вузли й елементи вакуумних систем із дотриманням герметичності стику. Герметичність досягається заповненням зазору між матеріалами, що з'єднуються, замазкою чи використанням фланцевих з'єднань із герметичними прокладками (гума, фторопласт, м'які метали). Вимоги до розбірних вакуумних з'єднань: 1) мінімальне натікання і відсутність газовиділення, 2) достатня механічна міцність, 3) технологічність у виготовленні і зручність в експлуатації, 4) здатність витримувати багаторазові прогрівання без порушення герметичності, 5) можливість легкої перевірки на герметичність.

З'єднання на вакуумних замазках використовують для з'єднання скляних і металевих трубок та приєднання до вакуумної системи дифузійного насоса. Найбільш поширеною вакуумною замазкою є *піцеїн*. Він виготовляється з бджолиного воску й очищеного дьогтю і при кімнатній температурі має пружність пари $\sim 10^{-6}$ Па. Зі збільшенням температури вище 323К піцеїн розм'якає і плавиться, а пружність пари може зростати до 10^2 Па. Тому місця з'єднань на піцеїні не можна піддавати нагріванню.

Розбірні з'єднання з гумовими прокладками широко використовуються у вакуумних установках з температурою прогрівання не вище 453К і застосовуються в основному в системах середнього вакууму (10^{-4} Па). Гумові ущільнення прості у виготовленні, дають вакуумно-герметичні з'єднання з поверхнями, обробленими до 6-го класу шорсткості, допускають швидке й багаторазове складання і розбирання без заміни ущільнювальної прокладки. До недоліків гумових ущільнень відносять порівняно високі газопроникність і газовиділення. Термостійкість гуми мала, але найтермостійкіші сорти мають робочу температуру близько 300°C. Перевагою гуми є відмінні пружні властивості, завдяки яким вона є прекрасним матеріалом для вакуумних ущільнювачів. Вакуумні гуми поділяються на звичайні та термостійкі, на маслостійкі і немаслостійкі. Нестійка до олив *біла вакуумна гума* дуже еластична, з малою газопроникністю. Діапазон робочих температур - від + 90 до -10°C. Маслостійка *чорна гума* має гіршу еластичність і більше газовиділення, але меншу газопроникність.

На рис.6.6 показані приклади найбільш поширених видів фланцевих з'єднань із гумовими прокладками. Найпростішим є ущільнення між двома плоскими фланцями (рис.6.6а), але воно не забезпечує точної фіксації деталей. Крім того, у цьому з'єднанні не обмежується максимальне зусилля на прокладку, що часто призводить до її перевантаження і пластичної деформації. Ущільнення, показані на рис.6.6 б – д, обмежують максимальне зусилля стиску, що спричиняє деформацію гумової прокладки на 30–40% від її первісної товщини, і забезпечують фіксацію ущільнювачів. Оскільки гума практично не стискається, то в ущільненнях, передбачене місце для розтікання гуми при деформації.

Крім гуми, в якості ущільнювачів, набувають застосування полімерні матеріали: *фторопласт-4*, *поліетилен* та інші. Вони мають найменше

газовиділення у вакуумі. Однак, поліетилен через недостатню термостійкість може застосовуватися в тих випадках, коли тепловий режим вакуумної апаратури не перевищує 313–323К. Найменше газовиділення (на порядок нижче, ніж у кращих сортів вакуумної гуми) з усіх полімерних матеріалів має фторопласт-4. До того ж він характеризується великим діапазоном робочих температур (78 - 523К) і високою хімічною стійкістю, вищою, ніж у Au і Pt.

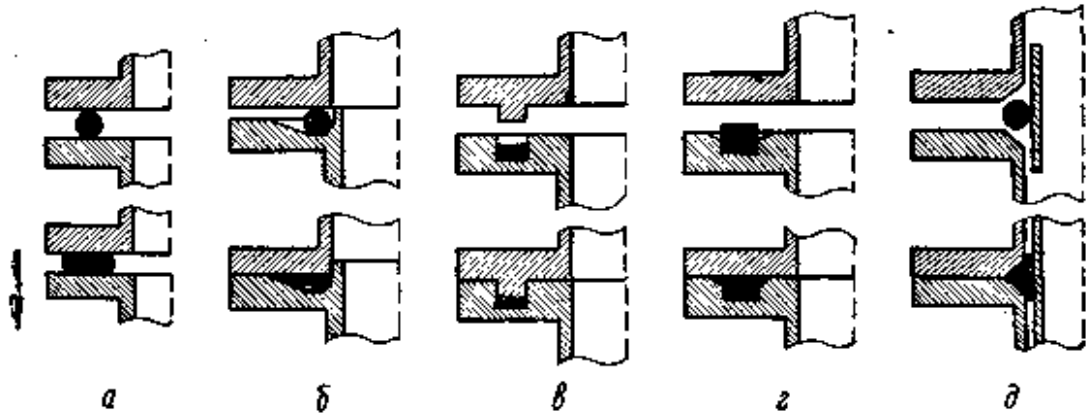


Рис.6.6. Фланцеві з'єднання з гумовими прокладками.

Розбірні з'єднання з металевими ущільнювачами застосовують в основному в системах із тиском нижче $7 \cdot 10^{-5}$ Па і які допускають тривале і багаторазове прогрівання до температури 723–823К у процесі знегажування. Герметизація з'єднуваних поверхонь досягається шляхом заповнення мікронерівностей за рахунок пластичної деформації матеріалу прокладки. Для металевих ущільнювачів найбільш часто використовують мідь, золото, алюміній, свинець, індій. Газовиділення металевих прокладок у 10^3 разів менше, ніж у кращих сортів вакуумної гуми, і вони практично виключають проникнення газу через матеріал ущільнювача. Однак ущільнення з металевими прокладками технологічно більш складні у виготовленні, допускають обмежену кількість зборок і добре працюють лише при близьких коефіцієнтах лінійного розширення елементів з'єднання. Схеми найбільш поширених з'єднань із металевими ущільнювачами показані на рис.6.7.

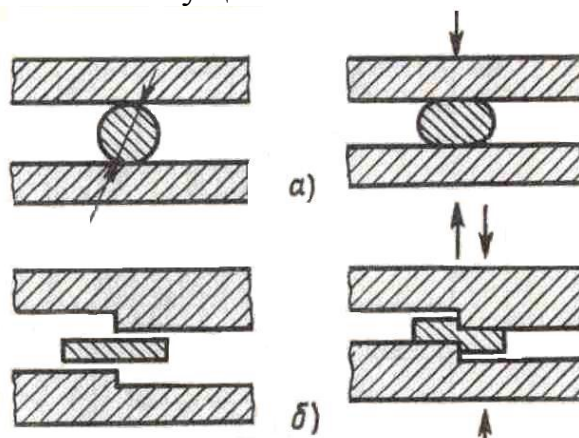


Рис.6.7. Схеми ущільнень з металевими прокладками:
а - дротова прокладка; б - плоска прокладка, що працює на зріз.

У ВТ застосовують також гнучкі з'єднання (трубки, трубопроводи). Гнучкі з'єднання із синтетичних матеріалів (полівінілхлорид, фторопласт, вітон тощо) мають порівняно з гумовими набагато менше газовиділення, і їх можна застосовувати у високовакуумній частині установки для отримання вакууму не нижче 10^{-4} Па. Дуже поширеними є металеві з'єднання. Гнучкі з'єднання, що прогріваються, виготовляють із металу у вигляді шлангів та еластичних сильфонів (рис. 6.8).

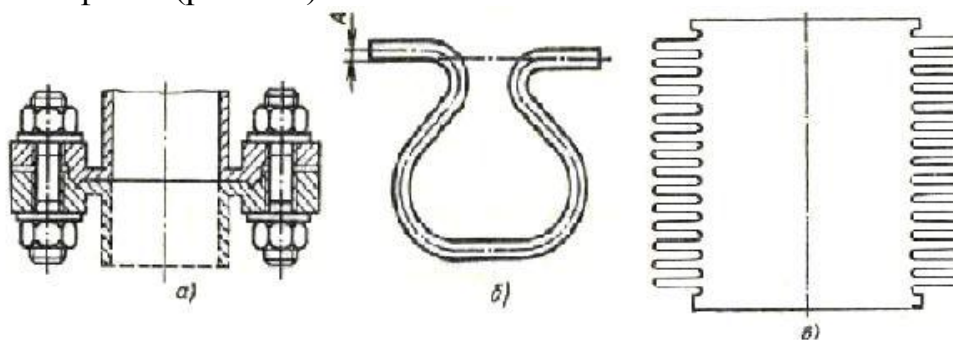


Рис.6.8. Конструктивні форми трубопроводів:
а-жорсткий трубопровід; б-вигнутий трубопровід; в-сильфон.

Сильфони – тонкі металеві гофровані трубки з товщиною стінки 0.2 мм, виконані із сплаву міді з цинком, берилієвої бронзи і нержавіючих сталей. Вони краще працюють на стиск, ніж на розтяг, тому застосовуються переважно для виготовлення перехідних гнучких ланок вакуумних систем, а також для передачі руху у вакуум. Для здійснення великих вигинів вакуумпроводів вони непридатні. У цьому разі застосовують гофровані металеві шланги.

6.2.4. Передача руху у вакуум. У вакуумній техніці й технологіях часто виникає необхідність у передачі руху у відкачуваний об'єм. Це зумовлено розміщенням механічного приводу зовні вакуумної камери. Пристрої для передачі руху поділяють на види:

- для передачі зворотно-поступального руху;
- для передачі обертального руху;
- для передачі коливального руху.

Для передачі зворотно-поступального руху використовують сальникові, мембранні або сильфонні вводи. Для передачі обертального руху використовують магнітні, сальникові або складні комбінації вводів. Коливальний рух до систем вводять за рахунок застосування мембранних або сильфонних вводів. Для вводів низького та середнього вакууму застосовують гумові або фторопластові ущільнення. Гумові ущільнювачі для сталених конструкцій завжди змащують (наприклад, дисульфідом молібдену MoS_2 , порошковим графітом). З кращого боку зарекомендували себе рухомі з'єднання, в яких за ущільнювач використовують фторопласт-4. Високовакуумні та надвисоковакуумні вводи роблять металевими через

необхідність нагрівання для знегажування. Гнучкі елементи конструкцій вводів забезпечують герметичність упродовж сотень тисяч коливань.

6.2.5. Запірно-регулююча апаратура. Запірно-регулююча апаратура являє собою комплекс функціональних засобів вакуумних систем, призначених для перекриття газових потоків, дозування потоків газу, стабілізації тиску газів у вакуумних системах і камерах, аварійного захисту вакуумних систем при розгерметизації тощо. Для перекриття вакуумних потоків використовують вакуумні клапани і затвори, класифіковані за низкою ознак конструктивного і експлуатаційного характеру: за призначенням, формою, типом приводу, робочим тиском, способом герметизації тощо.

В якості натікачів можуть застосовуватися пористі матеріали, деякі метали, проникні для окремих газів, наприклад платина для водню, срібло для кисню. Мікрометричне переміщення голки в отворі, зміна зазору між матеріалами з різними коефіцієнтами лінійного розширення можуть бути застосовані для створення і регулювання великих вакуумних опорів. Вакуумні крани застосовуються в установках з малим газовідділенням, в лініях попереднього розрідження і у випадках, коли не потрібно отримання великої провідності. У металевих клапанах і затворах, що працюють при кімнатній температурі, використовуються гумові та фторопластові ущільнювачі.

Основні експлуатаційні характеристики затворів:

- ступінь герметичності, яка обумовлена потоком натікання газу через ущільнювальну пару, складає $10^{-7} - 10^{-11}$ Па м³/с;
- провідність у відкритому положенні, яка визначається відношенням потоку газу, що проходить через порожнину вакуумного клапана, до різниці тисків у його вхідному і вихідному отворах;
- швидкодія, яка визначається часом герметичного перекриття;
- ресурс, який визначається числом циклів перекриття ущільнювальної пари із забезпеченням заданого ступеня герметичності.

6.3. Течі і методи їх пошуку

Ідеальна герметична вакуумна система повинна зберігати розрідження, створене системою відкачки, після виключення насоса протягом нескінченного часу. Однак без активного відкачування тиск в будь-якій реальній системі зростатиме з часом. Основними причинами є "*відгазовка*" (десорбція різних молекул зі стінок вакуумної системи, наприклад молекул води) і *течі* (проникнення сторонніх молекул ззовні системи).

Течі - негерметичність, здатність перепони (яка обмежує замкнутий об'єм) пропускати назовні (у разі підвищеного тиску усередині порожнини) або всередину (в разі зниженого тиску або вакууму) небажані газоподібні речовини. Прилади, які дозволяють визначити місце течі, - *течешукачі*. Течешукачі реагують на фізико-хімічні властивості газів, які називаються *пробниками*.

Слід визнати аксіомою, що абсолютна герметичність в принципі неможлива. Через це всі течі в першу чергу класифікують за ступенем впливу на технологічний процес, що проводиться на обладнанні:

- течі, які не детектуються існуючим обладнанням;
- течі некритичні для технологічного процесу - найчастіше ці ж течі не детектуються, оскільки економічно недоцільно використовувати значно дорожчі і чутливі прилади для пошуку в некритичних діапазонах;
- течі помірно критичні для технологічного процесу; це течі, які при використанні певних технологічних прийомів можуть бути усунені або їх вплив може бути зведене до некритичного;
- критичні течі, що роблять неможливим завершення технологічного процесу без отримання браку або розвитку аварійної ситуації;

Усі виявлені при тестуванні течі обов'язково треба усунути, оскільки поступове збільшення виявлених натікань або кумулятивна дія кількох старих і нових течій можуть легко перевищити критичний поріг.

При виготовленні вакуумних систем через пори або тріщини в матеріалах можлива поява течі.

Класифікація течій на вакуумних установках:

-течі по фланцевим ущільненням: легко детектуються і локалізуються, оскільки доступ до них відкритий, відгук приладу на тестовий газ швидкий, релаксація також настає швидко;

-течі по манжетним ущільненням: тяжко детектуються, але досить добре локалізуються;

-течі по зварних швах: відносно легко детектуються, проте дуже погано локалізуються через протяжності дефектних ділянок;

-порожнинні течі, що знаходяться в закритому корпусі: виявити можна тільки після того, як корпус досить наповниться тестовим газом або він розподілиться по корпусу, течі погано детектуються і локалізуються;

-течі по трубопроводах: відносно добре детектуються, але погано локалізуються через сильне запізнювання відгуку, особливо на трубопроводах малого діаметру;

-течі у вакуумних насосах: дуже добре детектуються і локалізуються, за умови, що система вакуумних насосів течешукача забезпечує більш глибокий вакуум ніж тестовані насоси; при наявності відкритого вихлопу тестованих насосів завжди з'являється сигнал про течі через зворотний потік газу.

-блукаючі течі: найбільш складні для детектування та локалізації; виникають через перенесення тестового газу повітряними потоками різного походження; можлива поява блукаючого сигналу через попадання тестового газу на вихлоп форвакуумного насоса самого течешукача .

Допустима сумарна величина натікання Q_{nat} .

1. При безперервній відкачці системи зі швидкістю S_0 потрібно її відкачати до тиску P_1 , тоді $Q_{nat} \leq S_0 P_1$, звідси $Q_{nat} < \frac{S_n U}{S_n + U} P_1$, тобто навіть при наявності течі, при правильному підборі S_n , U , можна досягти робочого тиску.

2. Для ізолюваної системи об'ємом V , що знаходиться під вакуумом або під надлишковим тиском, зміна тиску за рахунок негерметичності не повинна перевищувати Δp за Δt , тобто $Q_{nat} \leq V \Delta p / \Delta t$. Натікання, як характеристика

герметичності вакуумної системи, визначається як добуток об'єму (V), який займає газ, на $\Delta p / \Delta t$.

Через малі розміри дефектів, що викликають течі, виявити візуально їх практично неможливо. Для визначення місця течії розроблені наступні методи їх пошуку: а) пробного газу; б) високочастотного розряду; в) люмінесцентний; г) радіоізотопний; д) бульбашковий.

Метод пробного газу отримав найбільш широке поширення через високу точність. Його схема приведена на рис.6.9.

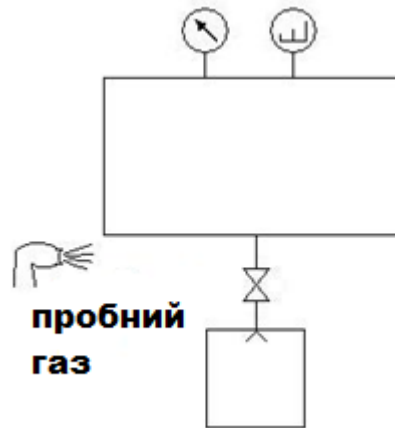


Рис.6.9. Метод пробного газу.

Після отримання вакууму у випробуваному об'єкті місце, яке перевіряється на наявність течі, обдувається пробним газом, який через дефект-отвір починає надходити в об'єкт і реєструється мас-спектрометром. Для запобігання підвищення тиску об'єкт повинен перебувати під безперервною відкачкою. Основним пробним газом є гелій. Це пов'язано з тим, що гелію в атмосфері мало ($5 \cdot 10^{-4}\%$) і він відсутній в продуктах газовиділення вакуумних систем. Тому фонові ефекти при роботі з ним позначаються значно менше, ніж у випадку застосування інших речовин. Мала молекулярна маса гелію і щодо велика її відмінність від ефективної маси іонів, що утворюють сусідні піки в мас-спектрі (водень H_2 і вуглець C^{++}), дозволяють знизити вимоги до роздільної здатності аналізатора і застосовувати досить простий магнітний аналізатор з високою чутливістю ($7,5 \cdot 10^{-6}$ А/Па), що відповідає можливості реєстрації парціального тиску гелію $P_{min} = 10^{-10}$ Па. Крім того, гелій має майже в три рази більшу проникаючу здатність, ніж повітря; отже, потрібно менш чутливий прилад для визначення течі однакових розмірів. Найбільш поширеними є гелієві течешукачі СТИ-11, ПТИ-6,7,10 та інші. На рис.6.10а показано основний і винесений пульти управління ПТИ-7А. Сучасні автоматизовані гелієві течешукачі мають ряд переваг в порівнянні з ПТИ, такі як час включення, час виключення, габарити, простота роботи. Мінімальний потік, який реєструється може досягати $3 \cdot 10^{-13}$ Па м³/с. Мас-спектрометричні гелієві течешукачі дозволяють здійснювати пошук витоків різними способами (щупа, вакуумної камери, обдування тощо). Зразком таких приладів є високоякісні течешукачі серії MS американської компанії VIC (рис.6.10б).

При використанні методу пробного газу слід враховувати інерційність випробувань. Для уточнення місця течі поверхню покривають вакуумною замазкою, яка в момент припинення проникнення пробного газу фіксує місце течі. Так можна визначити координати місця течі з точністю до декількох мм. Замість пробних газів іноді використовують рідини - спирт, ефір, бензин, ацетон. При цьому час проникнення рідини може досягати декількох годин. Тому рідини використовують для індикації грубих течій при високому тиску.



Рис.6.10. Течешукачі.

Розроблено та освоєно у виробництві малогабаритні гелієві мас-спектрометричні течешукачі ТИ1-14 і ТИ1-15, високочутливий стенд СВТ-2, вдосконалені галогенні БГТИ-7 і ТИ-2-8, принципово нові електронно-захоплюючі 13ТЕ-9-001 і ТИЕ-2, що використовують в якості пробного газу *елегаз* (гексафторид сірки – надзвичайно інертний газ).

Окрім мас-спектрометричних приладів за методикою пробного газу використовуються й теплові течешукачі. Теплові течешукачі являють собою прилад, який працює на відмінності теплопровідності між газами. Сенсор такого течешукача складається з двох мікропорожнин, через які вентилятор простягає повітря. В одну порожнину газ надходить з пробовідбірника, в іншу з торця. У порожнинах знаходяться ідентичні нитки розжарення, включені в електричний місток. Таким чином, при появі в пробовідбірнику газу з теплопровідністю, відмінною від теплопровідності повітря, нитка в одній з порожнин змінює свою температуру, отже, й опір. У схемі з'являється різниця потенціалів, яку течешукач автоматично інтерпретує і переводить в стандартні одиниці виміру потоку. Завдяки тому, що теплові течешукачі можуть працювати з газами, як з більшою теплопровідністю, так і з меншою, кількість можливих тестових газів дуже велика. Чутливість теплових течешукачів залежить від тестового газу. Чим більша різниця теплопровідностей у пробного газу і повітря, тим вище чутливість.

Сучасні теплові (катарометричні) портативні течешукачі GasCheck англійської компанії Ion Science об'єднують в собі можливість визначення течі різних газів з чутливістю до 10^{-5} см³/с по гелію і невеликі габарити, що дозволяють розмістити такий портативний прилад в одній руці (рис.6.10 в).

Метод височастотного розряду полягає в тому, що при наближенні електрода височастотного трансформатора до місця течі утворюється спрямований розряд. Поява розряду пов'язана з пониженням тиску повітря в місці течі і поліпшенням умов електричного пробоя газового проміжку. Цей метод зручний для визначення течі в скляних вакуумних системах.

Люмінесцентний метод використовує проникнення розчину люмінофора в капілярні течі. Тестований об'єкт тривалий час витримується в розчині люмінофора. Після видалення люмінофора з поверхні об'єкта заповнені капіляри виявляються у вигляді крапок або смуг при опроміненні ртутно-кварцовими лампами. Люмінофор дає жовте або червоне свічення.

Радіоізотопний метод виявлення течі полягає в тому, що випробовувані об'єкти протягом деякого часу витримуються в атмосфері радіоактивного газу. Після видалення радіоактивного газу і ретельного очищення поверхні від радіоактивних забруднень залишаються такими, що випромінюють тільки негерметичні прилади. Метод застосовується при автоматичній перевірці на герметичність малогабаритних напівпровідникових приладів.

Бульбашковий метод найбільш простий. У випробовуваному об'єкті створюється надлишковий тиск газу, і об'єкт занурюється в рідину. Діаметр бульбашки в місці його утворення дорівнює діаметру капіляра. Воду без утворення бульбашок можна нагріти до 80°C, масло до 200°C.

6.4. Особливості фізики надвисокого вакууму

Надвисоким вакуумом називають газ, тиск якого нижчий за 10^{-6} Па (10^{-8} Торр). Надвисокий вакуум створюють у камерах для імітації космічного простору, в низці експериментальних установках, у деяких приладах. Він також необхідний для дослідження фізичних властивостей дуже чистої поверхні твердого тіла і підтримки її в такому стані впродовж достатньо тривалого часу. У зв'язку з цим іноді надвисокий вакуум визначають як стан розрідженого газу, при якому чиста поверхня тіла покривається мономолекулярним шаром адсорбованого газу за час 100 секунд.

6.4.1 Отримання надвисокого вакууму. При дуже низькому тиску переважна частина газу перебуває в адсорбованому стані на поверхні вакуумної апаратури, а також у розчиненому стані всередині її матеріалів, і лише незначна частина – у відкачуваному об'ємі. Досяжний ступінь вакууму визначається рівновагою між швидкістю відкачування газу та швидкістю його надходження у відкачуваний об'єм за рахунок десорбції газу із стінок і натікання ззовні через мікроскопічні отвори. Для отримання надвисокого вакууму натікання ззовні зводять до мінімуму, а апаратуру разом із корпусом вакуумної камери знегажують, прогрівачи у вакуумі при температурі 573–773К. Тому зазвичай корпус вакуумної камери виготовляють із щільних, зварних корозієстійких матеріалів, що мають низький тиск пари матеріалу і легко знегажуються при прогріванні (нержавіюча сталь, скло, кварц, вакуумна кераміка). Особлива проблема, що для виготовлення надвисоковакуумних пристроїв придатні лише речовини з дуже низьким тиском пари в умовах робочих температур, тобто ті, які випаровуються надзвичайно повільно, не

встигаючи забруднити вакуумну камеру. Таких матеріалів зовсім небагато: алюміній, мідь, тантал, титан, вольфрам, молібден, залізо, платина, срібло та ще декілька металів, спеціальні вакуумні кераміки і кварцове скло. Причому матеріали повинні бути дуже чистими (наприклад, вміст домішок у міді – не більше 0,001 %). Проте навіть при дотриманні таких умов *утримати вакуум вище 10^{-6} Па можна лише одним способом – за рахунок безупинної роботи насосів.*

У надвисокому вакуумі так мало молекул, що будь-яка поверхня довго залишається бездоганно чистою. Як зазначалось вище, для визначення якості вакууму навіть вводять особливий параметр – час, упродовж якого поверхня покривається шаром завтовшки однієї молекули. Для вакууму 10^{-6} Па це всього пара хвилин, а для 10^{-8} Па – вже декілька годин. За цей час цілком можна встигнути нанести матеріал на підкладку практично в ідеальних умовах і відповідно з ідеальною якістю. Сьогодні інтегральні схеми, багато напівпровідникових пристроїв, наноструктури виготовляють методом молекулярно-променевої епітаксії: в умовах надвисокого вакууму потрібну структуру «викладають» буквально шар за шаром у відповідній послідовності, отримуючи елемент мінімальних розмірів із потрібними властивостями. І це вже не наукові експерименти, а промислове виробництво швидкодіючих інтегральних схем, елементів мобільних телефонів, фотоприймачів і лазерних діодів, якими ми користуємося, не замислюючись про їх «вакуумне» походження.

Нещодавно в Європейському центрі ядерних досліджень змогли отримати перші атоми антиводню – першу штучну антиречовину. Потрібно було уберегти ці унікальні екземпляри від миттєвої анігіляції зі звичайною речовиною, щоб вони проіснували хоч деякий час. Для цього в спеціальній кріогенній пастці був створений вакуум на рівні 10^{-15} Па, коли в кожному літрі залишається всього декілька десятків частинок. Лише у таких умовах вдалося на деякий час утримати і приблизно порахувати отримані антиатоми.

6.4.2. Вимірювання надвисокого вакууму. Вимірювання надвисокого вакууму здійснюється електронними іонізаційними і магнітними електророзрядними вакуумметрами (див.р.5). Нижня межа тиску у перших визначається фотоелектронним струмом з іонного колектора під дією рентгенівського випромінювання з анода (що виникає при електронному бомбардуванні). Існують іонізаційні вакуумметри спеціальної конструкції, в яких фоновий струм знижений. Найбільшого поширення набув манометр Байярда – Альперта (п.5.6) Модулюючи іонний струм у манометрі Байярда – Альперта за допомогою спеціального електрода, вдається вимірювати тиск до 10^{-10} Па. Пригнічення фонового струму електричним полем додаткового електрода (супресора) дозволяє вимірювати ще нижчий тиск (особливо у поєднанні з методом модуляції). Створені конструкції, в яких колектор екранований від потрапляння на нього рентгенівського випромінювання з анода. У манометрі Редхеда іони з області іонізації витягуються через отвір в екрані і за допомогою півсферичного рефлектора фокусуються на тонкий

дротяний колектор. У манометрі Хельмера іонний потік, що виходить з отвору в екрані, відхиляється за допомогою 90° кутового електростатичного дефлектора. У манометрі Грошковського тонкий дротяний колектор розміщений напроти отвору в торці анодної сітки і захищений від рентгенівського випромінювання скляною трубкою. Зазначені прилади вимірюють тиск до 10^{-11} Па.

Значне зменшення нижньої межі тиску може бути досягнуте за рахунок збільшення довжини пробігу електронів. У орбітронному манометрі це досягається за допомогою електричного поля, а в іонізаційному магнетронному манометрі (манометр Лафферті) – за допомогою магнітного поля. Такими приладами можна вимірювати тиск до 10^{-10} – 10^{-11} Па. Для вимірювання парціального тиску газів в умовах надвисокого вакууму застосовують мас-спектрометри, наприклад, омегатроном вдається вимірювати тиск до 10^{-8} Па, а статичним, квадрупольним та іншими мас-спектрометрами – до 10^{-11} – 10^{-12} Па.

6.5. Умовні графічні позначення елементів вакуумних систем

Широка потреба використання вакууму стала причиною розробки й створення вакуумних установок як для наукових досліджень, так і для застосування у промисловості. Вакуумна установка складається з вакуумної системи і ряду допоміжних пристроїв, що забезпечують її роботу і специфічні функції, заради яких розроблялася та чи інша установка. Отже, поняття «вакуумна установка» є більш широким, ніж «вакуумна система». Реальна вакуумна система складається з:

- сукупності пристроїв для створення вакууму (вакуумних насосів);
- відкачуваних обсягів (вакуумної камери), в яких створюється вакуум;
- вакуумних трубопроводів, забезпечених арматурою (затвори, вентилі, клапани), що дозволяє з'єднувати і роз'єднувати елементи вакуумної системи, а також регулювати потік газу в них;
- вимірювальних приладів;
- систем керування, що дозволяють забезпечувати задану логіку роботи.

На рис.6.11 приведена схема системи відкачки доплерівського томографу, сконструйованого і виготовленого в Проблемній НДЛ кафедри квантової електроніки УжНУ. Попередня відкачка робочої камери 1 здійснюється цеолітовими насосами 10 (або пластинчато-роторним форвакуумним насосом 13) при відкритому вентилі 14. Розрідження в лінії форвакуумної відкачки контролюється вакуумметром 8, підключеним до термпарного датчика 9. Основним робочим насосом приладу є магніторозрядний насос 6 типу НМД-0,4-1, приєднаний безпосередньо до камери. При відсутності натікання й непрацюючому джерелі іонів цей насос після прогрівання камери забезпечує розрідження $5 \cdot 10^{-10}$ Торр ($6.7 \cdot 10^{-8}$ Па). Вентилі ДУ-25 (14) і ДУ-50 при цьому повинні бути закриті. У робочих умовах, внаслідок неминучого газовиділення з нагрітих деталей іонного джерела й інших вузлів установки, розрідження в камері складає 10^{-8} – $5 \cdot 10^{-9}$ Торр, що цілком припустимо для задач експерименту. При використанні

іонного джерела із значним газовиділенням магніторозрядний насос 6 може бути використаний у парі з турбомолекулярним насосом 11 (типу ВМН-500). Цей насос також застосовується для відкачки камери 1 і корпуса насоса 6 у режимі їх термічного знегажування. Для нормальної експлуатації турбомолекулярного насоса його вихідний патрубок приєднаний до системи форвакуумної відкачки, котра забезпечує розрідження не гірше 10^{-2} Торр. Тиск на вході ВМН-500 контролюється термопарним датчиком 9. Якщо камеру 1, корпус насоса 6 і вентиль ДУ-50 прогріти до температури $250 - 300^{\circ}\text{C}$ протягом 20-24 годин, то розрідження досягає $5 \cdot 10^{-9}$ Торр ($6.7 \cdot 10^{-7}$ Па).

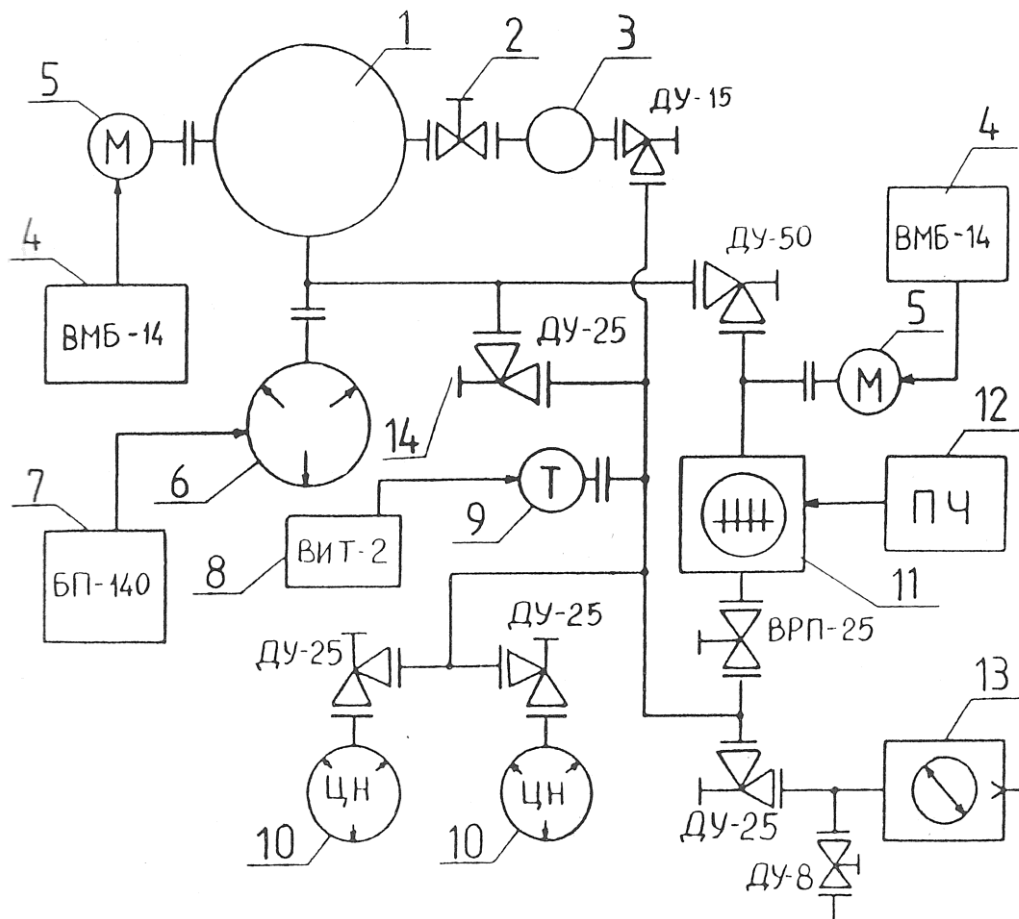


Рис. 6.11. Схема системи відкачки: 1 - робоча камера; 2 - прохідний надвисоковакуумний клапан; 3 - шлюзова камера; 4 - магнітний вакуумметр; 5 - манометричний датчик ПММ-32-1; 6 - магніторозрядний насос НМД-0,4-1; 7 - блок живлення НМД-0,4-1; 8 - іонізаційно-термопарний вакуумметр; 9 - манометрична лампа ПМТ-4; 10 - цеолітовий насос; 11 - турбомолекулярний насос ВМН-500; 12 - блок живлення турбомолекулярного насоса; 13 - форвакуумний насос 2НВР-5Д; 14 - надвисоковакуумний вентиль ДУ-25, що з'єднує форвакуумну лінію з робочою камерою.

Запуск турбомолекулярного насоса 11 проводиться після досягнення в камері 1 і форвакуумної лінії розрідження не гірше $5 \cdot 10^{-3}$ Торр. До закінчення пускового режиму закривається вентиль 14 і відкривається кран ДУ-50. Після досягнення в камері 1 тиску 10^{-4} Торр вмикається магніторозрядний насос 6.

Через 1-1.5 години після початку відкачки в робочій камері створюється розрідження не гірше 10^{-7} Торр. Для подальшого поліпшення вакууму (до значень близьких до 10^{-9} Торр) необхідно прогрівати стінки вакуумної камери. Контроль розрідження на вхідному патрубку турбомолекулярного насоса й у робочій камері здійснюється за допомогою вакуумметрів 4 типу ВМБ-14 з магнітними датчиками 5 типу ПММ-32-1. Прогрів камери, вакуумних переходників, вентилів і корпуса магніторозрядного насоса до температури 250°C здійснюється зовнішніми нагрівачами.

Основна частина будь-якої вакуумної системи - вакуумна камера, призначена для створення певних умов при проведенні досліджень або інших процесів у вакуумі, а також ізоляції технологічних процесів або пристроїв від контакту з навколишнім середовищем. Призначення вакуумної камери і особливості створюваних в камері умов (тиску залишкових газів P і парціальних тисків P_i) визначається характеристиками об'єкта, який знаходиться у вакуумі, його розмірами, особливостями технологічного процесу або експерименту.

Однією з важливих характеристик вакуумної системи є величина сумарного газового потоку Q , що надходить у вакуумну камеру під час роботи вакуумної установки. За величиною сумарного газового потоку Q_{Σ} розраховують швидкість відкачування S_0 і вибирають вакуумні насоси. Сумарний потік газів, що надходять в робочий об'єм, визначається так:

$$Q_{\Sigma} = Q_{np} + Q_{нат} + Q_{диф} + Q_{пов} = PS_0,$$

де Q_{np} - потік, обумовлений проникністю стінок вакуумної камери, $\text{м}^3\text{Па/с}$;

$Q_{нат}$ - потік газів, який натікає з атмосфери через течі і з'єднання, $\text{м}^3\text{Па/с}$;

$Q_{диф}$ - потік газів, обумовлений дифузійним газовиділенням з глибини конструкційних матеріалів і оброблюваних виробів, $\text{м}^3\text{Па/с}$;

$Q_{пов}$ - потік газу з поверхні робочої камери і елементів в ній, $\text{м}^3\text{Па/с}$;

P - тиск у робочій камері, Па;

S_0 - ефективна швидкість відкачування камери при тиску P , $\text{м}^3 / \text{с}$.

Для оцінки газового потоку Q_{Σ} необхідно знати конструкцію і об'єм вакуумної камери, площу її поверхні, матеріали камери і експериментальних об'єктів або тип технологічного процесу і температуру.

Елементи та пристрої на принциповій вакуумній схемі зображують за допомогою умовних графічних позначень (див. рис.6.11). При проектуванні і зображенні схем слід дотримуватись правил, викладених у відповідних стандартах єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД). ЄСКД — комплекс державних стандартів, що встановлюють взаємопов'язані правила, вимоги і норми по розробці, оформленню і обігу конструкторської документації, що розробляється і застосовується на усіх стадіях життєвого циклу виробу (при проектуванні, розробці, виготовленні, контролі, прийманні, експлуатації, ремонті, утилізації).

Вакуумні зв'язки зображують за допомогою ліній зв'язку. Вакуумпровід на схемі показують суцільними лініями незалежно від функцій, які вони

виконують в установці. Кожен елемент, що входить у вакуумну систему, повинен мати позиційне позначення, що складається з літерного позначення (коду), що вказує вид елемента, і порядкового номера (номера елемента), що проставляється після літерного коду. Літерний код елемента містить одну або декілька прописних літер латинського алфавіту. Літерні коди найбільш поширених видів елементів наведені в таблиці 6.2.

Табл.6.2

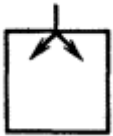
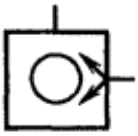
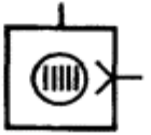
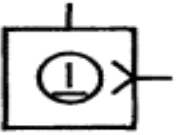
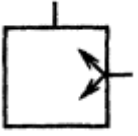
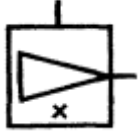
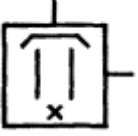
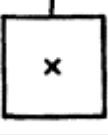
Пристрій	Позначення	Пристрій	Позначення
Насос вакуумний: механічний	Nl	Уловлювач: Охолоджуваний рідиною	BW
Двоторний (насос Рутса)	NZ	Охолоджуваний повітрям	BA
Обертальний об'ємний без газобаласту	NV	Охолоджуваний рідиною	BL
Обертальний об'ємний газобаластн.	NL	Сорбційний	BS
Водокільцевий	NW	Іонний	BE
Турбо- молекулярний	NR	Вакуумметр: деформац.	PD
Струминний	NB	Рідинний	PL
Ежекторний	NH	Магнітний електророзр.	PM
Комбінований	NP	Тепловий	PT
Дифузійний	ND	Іонізаційний	PA
Сорбційний	NS	Термоелектр	BT
Адсорбційний	NA	Камера вакуумна	CV
Випарний гетерний	NG	Ковпак вакуумний	CN
Кріосорбційний	NC	Вентиль, клапан, затвор: тарілчастий	VT
Випарний іонний	NE	З електропр.	VM
Кріогенний	NK	З пневмо- або гідропривод.	VP

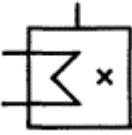
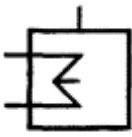
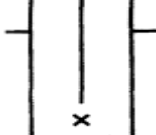
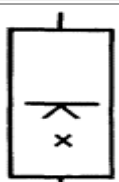
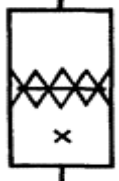
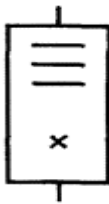
Перша буква коду елемента – це загальний літерний код (він обов'язковий.) Він несе інформацію про групи елементів, до яких належить даний елемент (наприклад, клапан тарілчастий VT відноситься до виду клапанів V). Порядкові номери елементів вакуумних схем присвоюються

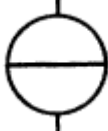
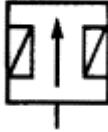
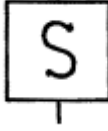
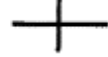
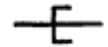
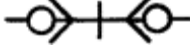
відповідно до послідовності розташування елементів на схемі зверху вниз і в напрямку зліва направо. Позиційні позначення проставляються на схемі поряд з умовними графічними позначеннями елементів з правого боку або над ними.

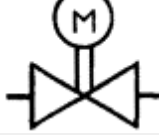
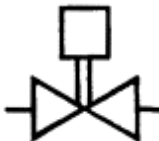
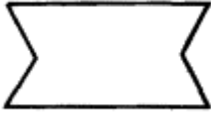
Деякі умовні графічні позначення елементів і пристроїв вакуумної системи приведено в табл.6.3.

Табл.6.3

Насос вакуумний. Загальне позначення	
Насос вакуумний механічний	
Турбомолекулярний	
Дваторторний (насос Рутса)	
Насоси вакуумні струминні. Загальне позначення	
Ежекторний Замість знаку «X» вказують хімічну формулу робочої рідини (вода, масло, ртуть)	
Дифузійний Замість знаку «X» вказують хімічну формулу робочої рідини (масло, ртуть)	
Насоси вакуумні сорбційні. Загальне позначення	
Сублимаційний (випарно-гетерний)	

Кріосорбційний Замість знаку «X» вказують хімічну формулу сорбента	
Кріогенний	
Випарний іонний	
Магнітний електророзрядний	
Пастка (уловлювач). Загальне позначення Замість знаку «X» вказують тип хладагенту (температура)	
Пастка темоелектрична Замість знаку «X» вказують температуру поверхні	
Пастка адсорбційна	
Пастка іонна Замість знаку «X» вказують температуру поверхні	
Вакуумметри (манометри)	
Вакуумметр. Загальне позначення	
Вакуумметр парціального тиску	

Вакуумметр іонізаційний з гарячим катодом	
Вакуумметр магнітний електророзрядний з холодним катодом (вакуумметр Пеннінга)	
Вакуумметр теплоелектричний (термопарний, опору)	
Вакуумметр U-подібний	
Вакуумметр компресійний (Мак-Леода)	
Вакуумметр мембранний (деформаційний)	
Течешукач. Загальне позначення	
Мас-спектрометр	
Вакуумпровід	
Вакуумпровід з вказівкою напрямку потоку газу	
Вакуумпровід гнучкий, шланг	
Вакуумне з'єднання. Загальне позначення	
фланцеве	
штуцерне	
швидкороз'ємне	
Клапан:	

прохідний	
кутовий	
Засувка	
Кран прохідний	
Електропривід	
Електромагнітний привід	
Камера вакуумна	

Тестові завдання до розділу 6.

- Вакуумні уловлювачі використовують для:
 - створення вакууму у лампах;
 - уловлювання пари робочої рідини насоса;
 - уловлювання механічних частинок, які утворюються при роботі вакуумних насосів.
- Як пастки впливають на парціальний тиск?
 - не впливають;
 - збільшують;
 - знижують.
- Принцип роботи масловідбиваючих уловлювачів?
 - механічний;
 - адсорбційний;
 - конденсаційний.
- Основними характеристиками уловлювачів є:
 - габарити;
 - питома електропровідність;
 - питома провідність.
- Захисну здатність уловлювача визначають як:
 - відношення потоку пари робочої рідини, що надходить з насоса в уловлювач за одиницю часу, до потоку пари, який пройшов через уловлювач до відкачуваного об'єму;
 - відношення потоку пари, який пройшов через уловлювач до відкачуваного об'єму до потоку пари робочої рідини, що надходить з насоса в уловлювач за одиницю часу;
 - відношення провідності уловлювача до площі його вхідного отвору.
- На скільки відсотків знижує швидкість насоса правильно сконструйований уловлювач?
 - 3-5%;
 - 30-40%;
 - 40-60%.
- В якості уловлювальних фільтрів можуть використовуватися:
 - пориста нержавіюча сталь;
 - пористий азбест;
 - кераміка.
- Яка вимога ставиться до металевих виморожувальних уловлювачів?
 - високий коефіцієнт теплопровідності;
 - низький коефіцієнт теплопровідності;
 - розбірність.

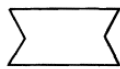
9. Недолік охолоджувальних уловлювачів:
- 1 – витрати рідини для охолодження;
 - 2 – не надійний захист від пари робочої рідини насосів;
 - 3 – нерозбірність для очищення.
10. Як очищають адсорбційні пастки?
- 1-шляхом прокачування повітря;
 - 2-шляхом пониження температури до -270°C ;
 - 3-шляхом прогрівання до $600\text{--}700\text{ K}$.
11. У скільки разів знижує зворотний потік робочої рідини застосування адсорбційних уловлювачів у системах із паромасляними дифузійними насосами?
- 1 – 5 разів; 2 – 50 разів; 3 – 100 разів.
12. На якому явищі базується принцип дії термічних уловлювачів?
- 1 – на розкладанні пари масла на і газу (H_2 , CO , CO_2) і вуглець при її сильному нагріванні;
 - 2 – на високій адсорбційній здатності пористих речовин-адсорбентів з підвищенням T ;
 - 3 – на дисоціації молекул.
13. Будова газорозрядних уловлювачів із розжарювальним катодом.
- 1 – корпус, адсорбент, нагрівач-катод, відбивачі
 - 2 – катод та коаксіально розміщений анод;
 - 3 – катод, анод, магніт.
14. Найбільш ефективно газорозрядні пастки зменшують тиск:
- 1 – водяної пари; 2 – азоту; 3 – кисню.
15. З якого матеріалу виготовляють камери високовакуумних установок?
- 1 – нержавіюча сталь; 2 – чавун; 3 – алюміній.
16. Як використовують мідь у вакуумній техніці?
- 1 – для виготовлення сіток та анодів електровакуумних приладів;
 - 2 – для внутрішніх деталей електровакуумних приладів;
 - 3 – як струмоводи та прокладки у вакуумних з'єднаннях.
17. Чому для надвисоковакуумних установок фторопласт практично не використовується?
- 1 – добре сублімує;
 - 2 – високий тиск насичених парів;
 - 3 – при суттєвому нагріванні виділяється фтор.
18. Через що для надвисоковакуумних установок не використовується гума?
- 1 – високий тиск насичених парів;
 - 2 – високе газовиділення;
 - 3 – не витримує нагрівань.
19. Переваги скла, як матеріалу для вакуумної техніки:
- 1 – газонепроникне;
 - 2 – низький тиск насичених парів навіть при високих температурах;
 - 3 – високий тиск насичених парів навіть при низьких температурах.
20. Піцеїн використовують у вакуумній техніці, як:
- 1 – гетер; 2 – замазку; 3 – наповнювач адсорбційного насоса.
21. Які переваги фторопласта серед ущільнювачів?
- 1 – найменше газовиділення;
 - 2 – висока хімічна стійкість;
 - 3 – стійкість до високих температур.
22. Сильфон застосовується для:
- 1 – для здійснення великих вигинів вакуум-проводів;
 - 2 – для передачі поступального або коливального руху у вакуумну камеру;
 - 3 – для передачі обертального руху у вакуумну камеру.
24. Яким чином потрібно враховувати натікання у вакуумну камеру (погіршення вакууму) від фізичних джерел?

- 1 – додавати;
 2 – віднімати потоки натікання в залежності від природи газу;
 3 – усереднювати.
25. Метод пробного газу це:
 1 – метод пошуку течії;
 2 – метод вимірювання парціального тиску;
 3 – метод випробування вакуумного насосу.
26. Який газ застосовується в приладах ПТИ-2, ПТИ-6 тощо?
 1 – азот; 2 – гелій; 3 – водень.
27. Надвисокий вакуум це стан газу, тиск якого нижчий за:
 1 – 10^{-6} Па; 2 – 10^{-5} Па; 3 – 10^{-7} Па.
28. Надвисокий вакуум визначають як стан розрідженого газу, при якому чиста поверхня тіла покривається мономолекулярним шаром адсорбованого газу за час:
 1 – 300с; 2 – 500с; 3 – 100с.
29. Який манометр найбільш поширений при вимірюванні надвисокого вакууму?
 1 – манометр Байярда – Альперта;
 2 – манометр Хельмера;
 3 – ЛТ-4.
30. Який тиск у космосі на висоті 500 км?
 1 – $P=10^{-6}$ Торр; 2 – $P=10^{-8}$ Торр; 3 – $P=10^{-10}$ Торр.
31. Чому тільки у вакуумі можливо реалізувати керований термоядерний синтез?
 1 – щоб уникнути втрати енергії внаслідок зіткнень іонів термоядерного палива з молекулами залишкових газів;
 2 – щоб отримати високотемпературну плазму;
 3 – щоб звести до мінімуму теплообмін плазми і стінок вакуумної камери.
32. Яке значення має вакуум у камері прискорювачів елементарних частинок:
 1 – можливість звести до мінімуму число зіткнень накопичених частинок з молекулами залишкових газів;
 2 – щоб орбіти прискорених електронів не змінювалися внаслідок електронно-молекулярних зіткнень;
 3 – сприяє фокусуванню прискорених частинок.
33. З якою метою прогрівається гетерно-іонний насос надвисокого вакууму перш ніж привести його в дію?
 1 – для обезгажування стінок, випарювачів та катода;
 2 – щоб швидше досягти граничного вакууму;
 3 – для перевірки надійності роботи елементів насосу – катода та титанових випарювачів.
34. Основна частина вакуумної системи:
 1 – вакуумна камера; 2 – манометри; 3 – уловлювачі.
35. Сумарний потік газів, що надходять в робочий об'єм, визначається:
 1 – тиском у робочій камері; 2 – ефективною швидкістю відкачування; 3 – п.1 і п.2.
36. Перша буква коду елемента вакуумної системи N. Що вона позначає?
 1 – натікач; 2 – насос; 3 – вакуумметр деформаційний.



37. Умовне позначення відповідає

- 1 – натікачам; 2 – турбомолекулярним насосам; 3 – сорбційним вакуумним насосам.



38. Умовне позначення відповідає

- 1 – вакуумній камері; 2 – насосам вакуумним; 3 – клапанам.



39. Умовне позначення відповідає

1 – вакуумній камері; 2 – насосам вакуумним; 3 – клапанам.



40. Умовне позначення  відповідає:

1 – вакууметрам; 2 – насосам вакуумним; 3 – течешукачам.

41. Умовне позначення  відповідає:

1 – електропривіду; 2 – засувкам; 3 – клапанам.



42. Умовне позначення  відповідає:

1 – вакуумметру іонізаційному з гарячим катодом;

2 – вакуумметру теплоелектричному;

3 – вакуумметру парціального тиску.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

Вакуумні прилади, починаючи з перших дослідів Дж.Дж.Томсона в 1897 р., який показав реальність існування «атома електрики» - електрона, до наших днів виявляються незамінними при проведенні багатьох фізичних експериментів. У міру удосконалення вакуумних приладів ставали можливими все нові наукові відкриття, і деякі з них виявилися революційними у розвитку наших знань про природу, її закони і будову речовини. Можна припускати, що і подальший розвиток вакуумної техніки дозволить безперервно поглиблювати пізнання навколишнього світу. Справа в тому, що фізико-хімічні процеси, що протікають у вакуумі (у порівнянні з процесами при атмосферному тиску) характеризуються прискореною дією. Знижується в кілька разів температура кипіння рідини, зменшується в десятки-сотні разів швидкість окислення, підвищується швидкість дифузії; вакуум - середовище існування пучків заряджених частинок. Ці особливості дозволяють досліджувати і створювати нові матеріали, прилади, технології. Особливо активний імпульс розвитку ВТ отримала останнім часом. Він пов'язаний з лавиноподібним збільшенням обсягів виробництва напівпровідникової техніки, матриць рідкокристалічних дисплеїв, тонких плівок, а також із зростанням обсягів науково-технологічних сегментів, таких як нанотехнології, термоядерна енергетика, прискорювально-накопичувальні установки, електрофізична апаратура. Сучасною наукою і промисловістю перед вакуумною технікою поставлені нові проблеми. Ось деякі, найбільш важливі з них.

1) Необхідно створювати технічні засоби для швидкої відкачки дуже великих обсягів (наприклад, кілька тисяч м³), які потрібні для подальшого розвитку ядерної фізики і створення «моделей» космічного середовища. Вакуумні установки повинні бути розбірними і включати комунікаційні вакуумпроводи великих діаметрів, забезпечені вентилями для підключення до вакуумних насосів і камерам.

2) Залишковий вакуум в камерах установок або у відкачуваних приладах повинен бути не гірше 10^{-11} Торр. Вакуум треба «очистити» від деяких небажаних газів або пари, зокрема вуглеводнів. Розвиток безмасляних механічних форвакуумних засобів відкачування пов'язується з кулачково-зубчастими насосами (на базі насосів Рутса). До числа перспективних безмасляних високовакуумних засобів відкачки можна віднести турбомолекулярні насоси з магнітним підвісом ротора і продуктивністю 300-4500 л/с; турбомолекулярні насоси на керамічних підшипниках продуктивністю 30-6000 л/с; кріовакуумні насоси з швидкодією до 56000 л/с.

Створюються і впроваджуються як принципово нові конструкції насосів, які забезпечують створення і підтримку чистого вакууму - наприклад, спіральні насоси, в яких немає ніякого мастила, так і модифікуються відомі конструкції з метою видалення з них оливи шляхом зміни використовуваних в них матеріалів - створення пар тертя, принципів закріплення рухомих частин - використання магнітних підвісів тощо. Застосування нового типу проточної

частини (молекулярно-в'язкісних ступенів) дозволяє створювати комбіновані турбомолекулярні насоси без використання форвакуумного відкачування.

3) Не можна залишити осторонь і сучасні тенденції в розвитку аналітичного обладнання для дослідження вакууму. Насамперед це вакууметрія, розвиток універсальних широкодіапазонних датчиків тиску від 10^5 до 10^{-9} Па, автоматизація моніторингу тиску та контролю процесів, визначення течій і зниження габаритів мас-спектрометричних течешукачів, застосування для пошуку течі спеціальних газів - водню, фреону, елегазу, спрощення подібного обладнання

Світовий ринок вакуумної техніки (устаткування, приладів і комплектуючих виробів) сьогодні перевищив позначку в 10 млрд. доларів. Розвиток ринку йде у напрямках, визначених, насамперед споживачами - наукою і промисловістю. Серед основних вимог, які пред'являються споживачами до вакуумної техніки, можна відзначити наступні.

- Надійність обладнання - стійкість до можливих пагубних впливів технологічного процесу. Сюди можна включити впливи, пов'язані як із самим технологічним процесом, наприклад, можливість роботи з агресивними газовими середовищами, так і стійкість до проблем, обумовлених форс-мажорними обставинами - наприклад, аварійне вимикання електрики, недотримання штатних режимів роботи тощо.

- Максимальне невтручання у технологічний процес - відсутність домішок, вібрації та інших впливів. Також системи повинні бути максимально прозорими і непомітними для основного технологічного процесу і не повинні обумовлювати необхідність навантаження установки додатковим запобіжним обладнанням - пастками, фільтрами тощо.

- Універсальність і розширюваність систем - зрозуміла вимога з урахуванням того, що обсяги виробництва в галузях, де використовується вакуумне обладнання, постійно і стійко зростають. Повністю міняти систему на більш продуктивну не вигідно, набагато простіше наростити потужності вже існуючої.

- Автоматизація, моніторинг та контроль обладнання - ці вимоги впливають з постійного ускладнення і все більш зростаючої розгалуженості вакуумних систем. Проводити вичерпний моніторинг і контроль вручну стає практично нездійсненним завданням, звідси випливає необхідність максимальної автоматизації установок, забезпечення їх логічними системами, здатними без участі людини швидко реагувати на виникаючі ситуації.

- Екологічні та ергономічні вимоги - пов'язані з посиленням контролю стану навколишнього середовища. Треба сказати, що ці вимоги впливають навіть на базові підходи до формування виробництва. Такі вимоги послужили одним з поштовхів до заміни струминних систем у хімічних виробництвах на безмасляні механічні системи. Це обумовлено тим, що останні не вимагають подальшої утилізації робочої рідини, який сам по собі є складним і дорогим процесом. Все більше «наближення» вакуумних систем до людини - відхід від тільки промислових областей, що зумовлює необхідність розвитку

ергономічних характеристик вакуумного устаткування - зменшення рівня шуму, зниження ваги, габаритів тощо.

Відомо, що найбільш цікаві ефекти спостерігаються на стику різних наук і технологій. Прикладами проектів, в яких одночасно використовуються елементи кріогенної техніки, вакуумної техніки і нанотехнології можуть бути надвисоковакуумний низькотемпературний зондовий мікроскоп, вакуумний тунельний діод, проект видобутку ^3He на Місяці, компресор Кнудсена, нанокріогеніка, виробництво вуглецевих наноматеріалів тощо.

Вакуумна техніка - прикладна наука, яка постійно розвивається, поширюється в самих різних галузях науки і техніки. Отже, стартову позицію випускників фізичних факультетів в сучасному світі науки і техніки в значній мірі визначає рівень підготовки з вакуумної техніки і практичний досвід, отриманий під час навчання.

Фізика без вакууму – теорія.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шимон Л.Л. Техніка фізичного експерименту. Навчальний посібник. Частина 1. Фізичні основи вакуумної техніки. Ужгород : Вид. УжНУ „Говерла”, 2008. – 40с.
2. Конспект лекцій з курсу —Електротехнологічні установки та пристрої. Вакуумна техніка / Є. В. Шепілко. – Харків : ХНАМГ, 2005. – 122 с.
3. Лобода В. Б. Фізичні основи вакуумної техніки : навч. посіб. / В. Б. Лобода. – Суми : ВТД «Університетська книга», 2011. – Ч. 1. – 253 с.
4. Лобода В. Б. Фізичні основи вакуумної техніки : навч. посіб. / В. Б. Лобода. – Суми : ВТД «Університетська книга», 2012. – Ч. 2. – 296 с.
5. Вакуумна техніка: конспект лекцій / укладачі: В.В. Бібик, І.П. Бурик, Т.М. Гричановська. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 177 с.
6. Грошковский Я. Техника высокого вакуума / Я. Грошковский. – М. : Мир, 1975.- 622 с.
7. Розанов Л. Н. Вакуумная техника : учебник для вузов / Л. Н. Розанов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2007. – 391 с.
8. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники : пер. с англ. / С. Дэшман . – М. : Мир, 1964 . – 715 с.
9. Пипко А.И. Основы вакуумной техники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 334 с.

Навчальний посібник

Митропольський І.Є.
Грицак Р.В.

ВАКУУМНА ТЕХНІКА

Формат 60×84/16. Умовн. друк. арк. Зам. № Наклад прим.
Видавництво УжНУ “Говерла”.
88000, м. Ужгород, вул. Капітульна, 18.

*Свідоцтво про внесення до державного реєстру видавців,
вигодовників і розповсюджувачів продукції -
Серія 3т № 32 від 31 травня 2006 року*