

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра наноелектроніки

Кваліфікаційна робота бакалавра

# *Сучасні методи одержання високого вакууму*

Студент гр. ФЕ-61 Каїймах Ахмад  
Іссам Мустафа

Науковий керівник:  
кандидат фіз.-мат. наук, професор  
Лобода Валерій Борисович

Суми 2020

## РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної реферативної роботи бакалавра є процес одержання високого вакууму.

Мета роботи полягає у ознайомленні з основними сучасними методами одержання високого вакууму, а саме:

- а) одержання високого вакууму за допомогою дифузійних насосів;
- б) одержання високого вакууму за допомогою турбомолекулярних насосів;
- в) одержання високого вакууму за допомогою магніторозрядних насосів;
- г) та вивчити фізичні принципи роботи цих насосів та їх будову і особливості їх конструкції.

Під час виконання реферативної роботи використовувалася сучасна навчальна та науково-технічна література з вакуумної техніки.

У результаті проведених досліджень в кваліфікаційній роботі висвітлені фізичні принципи роботи цих насосів, переваги і недоліки кожного виду насосів, описано особливості експлуатації вакуумних систем на їх основі.

Робота викладена на 63 сторінках, зокрема містить 25 рисунків, 4 таблиці, список цитованої літератури із 11 джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** вакуум, високий вакуум, дифузійний насос, турбомолекулярний насос, магніторозрядний насос.

## Зміст

	стор.
Вступ. Коротка історія розвитку вакуумної техніки.....	3
Розділ 1. Загальні уявлення про вакуум та його одержання.....	5
1.1. Поняття вакууму. Ступені вакууму.....	5
1.2. Загальні характеристики вакуумних насосів.....	9
1.3. Області дії вакуумних насосів.....	12
Розділ 2. Дифузійні насоси для одержання високого вакууму.....	14
2.1. Пароструменеві дифузійні насоси.....	14
2.2. Швидкість відкачування дифузійного насоса.....	17
2.3. Конструкції сучасних дифузійних насосів.....	19
2.4. Робочі рідини для дифузійних насосів.....	25
Розділ 3. Турбомолекулярні насоси для одержання високого вакууму.....	28
3.1. Молекулярні насоси.....	28
3.2. Турбомолекулярні насоси.....	31
3.3. Конструктивні особливості турбомолекулярних насосів.....	35
3.4. Гібридні конструкції турбомолекулярних насосів.....	39
3.5. Основні характеристики сучасних турбомолекулярних насосів.....	40
Розділ 4. Магнітні електророзрядні насоси для одержання високого вакууму.....	42
4.1. Механізм відкачування магніторозрядного насоса.....	42
4.2. Конструктивні особливості магніторозрядних насосів.....	49
4.3. Електричне живлення магніторозрядних насосів.....	51
Розділ 5. Конструкції сучасних високовакуумних систем.....	54
5.1. Високовакуумні системи на основі дифузійних насосів.....	54
5.2. Вакуумні системи на основі турбомолекулярних насосів.....	57
5.3. Вакуумні системи на основі магніторозрядних насосів.....	59
Висновки.....	62
Список використаної літератури.....	63

## Вступ

### Коротка історія розвитку вакуумної техніки

Слово «вакуум», що в перекладі з латинської мови означає «пустота», на протязі майже двох тисячоліть до середини XVII століття використовувалося виключно в філософських трактатах. Початком наукового вивчення вакуумних явищ можна вважати 1643 рік, коли учень Галілея італієць Торрічеллі вперше провів вимірювання атмосферного тиску повітря. Приблизно в 1650 році німецький фізик Отто фон Геріке винайшов вакуумний повітряний насос і за його допомогою провів низку вакуумних досліджень описаних ним у трактаті «Нові досліді про порожній простір» у 1672 році.

Але найбільш значні відкриття у вакуумній техніці були зроблені наприкінці XIX та на початку XX століття. З цього часу починається «технологічний етап» розвитку вакуумної техніки. Основними віхами цього етапу є:

1873 рік – винайдення Лодигінім першого електровакуумного приладу – електричної лампи розжарення.

1874 рік – винайдення Мак-Леодом компресійного манометра.

1883 рік – відкриття Едісоном явища термоелектронної емісії.

1901 рік – реалізація Лебедевим в своїх дослідях ідеї відкачування повітря парами ртуті.

1906 рік – винайдення Геде обертального насоса.

1906 рік – винайдення Д'юаром кріосорбційного насоса.

1909 рік – винайдення Пірані теплового манометра.

1912 рік – винайдення Геде молекулярного насоса.

1913 рік – винайдення Геде дифузійного насоса.

1916 рік – винайдення Баклі іонізаційного манометра.

У ці роки були поведені фундаментальні досліді по вивченню властивостей розріджених газів (Кнудсен, Смолуховський, Ленгмюр, Дешман).

1948-1952 роки – створення Ноттінгемом і Альпертом нового типу, іонізаційного манометра з широким діапазоном вимірювань.

1958 рік – розробка Беккером турбомолекулярного насоса.

1964 рік – розробка Хербом орбітронного насоса.

1969 рік – розробка Джемсеном і Холандом магніторозрядного насоса.

Розробка та вдосконалення вакуумних насосів продовжується і до цього часу. В останні роки вона зумовлена потребами в так званому «безмасляному надвисокому вакуумі» для потреб атомної та ядерної фізики і техніки, виробництва приладів сучасної мікроелектроніки, космічної техніки, «нанотехнологій» та створення мініатюрних прототипів існуючих вакуумних насосів, які вмонтовуються в різні мікроелектронні прилади [літ].

Завершуючи цей дуже стислий перелік основних винаходів у вакуумній техніці, необхідно відмітити надзвичайно тісний зв'язок і взаємообумовленість розвитку вакуумної техніки у відповідності до запитів фізики і техніки та особливо сучасних технологій. У наш час практично неможливо назвати хоча б одну галузь промисловості де б не використовувались вакуумні насоси та вакуумні технології. Навіть простий перелік промислових виробництв де використовуються вакуумні технології зайняв би декілька сторінок [1, 2].

## Розділ 1. Загальні уявлення про вакуум та його одержання

### 1.1. Поняття вакууму. Ступені вакууму

Стан газу, при якому його тиск нижчий атмосферного, в фізиці і техніці називають вакуумом. Газ у такому стані називають розрідженим. Кількісною мірою вакууму є тиск газу  $P$ . В системі СІ він вимірюється в паскалях ( $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ ). Нормальний атмосферний тиск повітря приблизно рівний  $10^5 \text{ Па}$ . Дуже часто у вакуумній техніці вживається також одиниця тиску 1 мм ртутного стовпчика або 1 Тор (одиниця названа в честь Торічеллі). В цих одиницях нормальний тиск атмосфери становить 760 Тор. Зв'язок між одиницями тиску в Па та Тор можна одержати з таких міркувань. Якщо  $D = \rho gh$  – тиск стовпа рідини густиною  $\rho$  та висотою  $h$ , то тиск стовпчика ртуті висотою 1 мм буде

$$P = 1 \text{ Тор} = (13,55 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 1 \cdot 10^{-3}) \text{ Па} \approx 133 \text{ Па},$$

де  $\rho = 13,55 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  - густина ртуті,  
 $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  - прискорення вільного падіння,  
 $h = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

І навпаки:  $1 \text{ Па} \approx 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Тор}$ .

Сучасна вакуумна техніка має справу з вакуумом в межах від декілька сотень Па до  $10^{-12} \text{ Па}$  ( з тиском газів у  $10^{17}$  разів меншим атмосферного).

Теоретичною основою вакуумної техніки є класична молекулярно-кінетична теорія (МКТ) газів. Одним з найбільш важливих понять (МКТ) газів є поняття середньої довжини вільного пробігу молекул  $\tilde{\lambda}$ . Під  $\tilde{\lambda}$  розуміють середню відстань, яку пролітає молекула газу між двома послідовними зіткненнями з другими молекулами. МКТ газів встановлює залежність  $\tilde{\lambda}$  від концентрації молекул  $n$ , та їх розмірів  $d$ :

$$\tilde{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} \quad (1.1)$$

Оскільки тиск газу

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

( $n$  – концентрація молекул,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – абсолютна температура газу), то

$$\tilde{\lambda} \sim \frac{1}{P}. \quad (1.3)$$

Таким чином, вакуум можна характеризувати не тільки значенням тиску  $P$ , а й значенням довжиною вільного пробігу газових молекул  $\tilde{\lambda}$ .

Найчастіше при створенні вакууму в певній посудині необхідно відкачувати з неї повітря. Повітря є досить складною сумішшю газів, основні з яких наведені в таблиці 1.1. Крім газів у повітрі завжди є деяка кількість водяної пари.

Таблиця 1.1.

### Склад сухого атмосферного повітря [3]

Газ	Вміст, %	Парціальний тиск Па·10 <sup>2</sup>	Газ	Вміст, %	Парціальний тиск Па·10 <sup>2</sup>
N <sub>2</sub>	70,1	781	He	5,2·10 <sup>-4</sup>	5,2·10 <sup>-3</sup>
O <sub>2</sub>	21	210	CH <sub>4</sub>	2,0·10 <sup>-4</sup>	2,0·10 <sup>-3</sup>
Ar	0,9	9	Kr	1,0·10 <sup>-4</sup>	1,0·10 <sup>-3</sup>
CO <sub>2</sub>	0,03	03	H <sub>2</sub>	5,0·10 <sup>-5</sup>	5,0·10 <sup>-4</sup>
Ne	1,8·10 <sup>-3</sup>	1,8·10 <sup>-2</sup>	Xe	9,0·10 <sup>-4</sup>	9,0·10 <sup>-5</sup>

Як видно з таблиці основними складовими частинами повітря є азот N<sub>2</sub> і кисень O<sub>2</sub>. Молекули цих газів мають близькі розміри і маси (діаметри їх молекул  $d \approx 3 \cdot 10^{-10}$  м), а тому можна ввести поняття «молекули повітря», як середнього молекул азоту і кисню, і розрахувати середню довжину вільного пробігу  $\tilde{\lambda}$  «молекули повітря», користуючись цими значеннями.

В таблиці 1.2 приведені результати таких розрахунків. З таблиці видно, що вже при тиску 10<sup>-5</sup>-10<sup>-7</sup> Па довжина вільного пробігу молекул становить сотні і тисячі метрів. Це набагато перевищує розміри тих посудин в яких

створюється такий вакуум. При цьому зіткнення молекул між собою майже зовсім відсутні, а їх вільний пробіг обмежується лише стінками посудини.

Як показують досліди, основні властивості газів і явища, що відбуваються в газовому середовищі, значно відрізняються в залежності від співвідношення між середньою довжиною вільного пробігу молекул газів  $\tilde{\lambda}$  та характерними розмірами посудини  $L$ . Під  $L$  розуміють ті лінійні розміри посудини (відстань між стінками посудини, відстань між електродами, діаметр трубопроводу та інше), які відіграють основну роль в розглядуваному явищі.

Таблиця 1.2.

**Значення середньої довжини вільного пробігу та концентрації молекул повітря при різних тисках ( $t = 25^\circ\text{C}$ ) [3]**

Тиск повітря		$\tilde{\lambda}$ , м	$n, \frac{1}{i^3}$
Па	Тор		
$1 \cdot 10^5$	750	$6,2 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{25}$
$1,33 \cdot 10^2$	1	$4,6 \cdot 10^{-5}$	
$1 \cdot 10^2$	$7,5 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{22}$
10	$7,5 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	
1	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	
$10^{-1}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{19}$
$10^2$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$6,2 \cdot 10^{-1}$	
$10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	6,2	
$10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-7}$	62	$2,4 \cdot 10^{16}$
$10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^{-8}$	620	
$10^{-6}$	$7,6 \cdot 10^{-9}$	6200	
$10^{-7}$	$7,6 \cdot 10^{-10}$	62000	$2,4 \cdot 10^{13}$
$10^{-10}$	$7,5 \cdot 10^{-13}$	62000000	$2,4 \cdot 10^{10}$

Співвідношення  $\tilde{\lambda}/L$  покладене в основу визначення **ступенів вакууму**. Стан розрідженого газу, при якому  $\tilde{\lambda} \ll L$  носить назву **низького вакууму** (НВ). Стан розрідженого газу, при якому  $\tilde{\lambda} \approx L$  носить назву **середнього вакууму** (СВ). Стан розрідженого газу, при якому  $\tilde{\lambda} \gg L$  носить назву **високого вакууму** (ВВ). З цих означень видно, що ступені вакууму є



відносними, бо одному і тому ж тиску  $P$  можуть відповідати різні ступені вакууму (в залежності від співвідношення  $\tilde{\lambda}$  і  $L$ ). Так, наприклад, якщо повітря знаходиться в капілярі діаметром менше 1 нм (такий стан реалізується в порах твердого тіла), то в такому капілярі навіть при атмосферному тиску молекули повітря будуть вести себе як у високому вакуумі. Навпаки, чим більші розміри посудини, з якої відкачується повітря, або відстань між важливими деталями приладу, тим при більш низькому тиску настане стан високого вакууму.

У реальних вакуумних приладах основні характерні розміри в більшості випадків становлять або декілька сантиметрів або декілька десятків сантиметрів. Тоді ступені вакууму можна характеризувати приблизним значенням тисків (таблиця 1.3).

Існує ще один ступінь вакууму – так званий **надвисокий вакуум (НВВ)**. Для нього також  $\tilde{\lambda} \gg L$ , а спеціальна назва «надвисокий» зв'язана зі значними труднощами його одержання.

Таблиця 1.3.

**Ступені вакууму (області тисків) для характерних розмірів  $L$   
в декілька сантиметрів [3]**

Ступінь вакууму		Низький (НВ)	Середній (СВ)	Високий (ВВ)	Надвисокий (НВВ)
Область тисків	Па	$P > 100$	$P = 100 \cdot 10^{-1}$	$P = 10^{-1} - 10^{-5}$	$P < 10^{-5}$
	Тор	$P > 1$	$P = 1 \cdot 10^{-3}$	$P = 10^{-3} - 10^{-7}$	$P < 10^{-7}$

Поклавши в основу співвідношення між  $\tilde{\lambda}$  і  $L$  можна зробити ще ряд зауважень стосовно режимів потоку газових молекул через трубопроводи. Так, при низькому вакуумі ( $\tilde{\lambda} \ll L$ ), потік газу називається **в'язкісним**, газ тече як рідина. Зіткнення молекул між собою при цих умовах відбуваються набагато частіше, ніж зі стінками трубопроводу. Кількість газу, що переноситься через поперечний переріз трубопроводу за одиницю часу (пропускна здатність трубопроводу) при в'язкісному потоці пропорційна різниці тисків на кінцях трубопроводу.

В умовах високого вакууму ( $\tilde{\lambda} \gg L$ ) потік газу називається **молекулярним**. Молекули газу при цьому рухаються незалежно одна від одної, їх зіткнення відбуваються лише зі стінками трубопроводу. При цих умовах пропускна здатність трубопроводу не залежить від різниці тисків, а визначається лише геометричними розмірами трубопроводу.

## 1.2. Загальні характеристики вакуумних насосів

Пристрої для одержання і підтримування вакууму одержали назву вакуумних насосів. Сучасна вакуумна техніка має у своєму арсеналі велику низку вакуумних насосів, які відрізняються принципом дії, областю використання, конструкцією та ін. В теоретичних розрахунках часто користуються поняттям **ідеального вакуумного насоса**. Ідеальним вакуумним насосом називається насос за допомогою якого у відкачуваному об'єкті можна створити тиск газу  $P = 0$  (**ідеальний вакуум**). Необхідно зазначити, що реально створити такий насос неможливо (у відповідності з формулою (1.2) в такому насосі необхідно мати температуру газу  $T = 0$ , що фізично неможливо). Область тисків, з якими має справу сучасна вакуумна техніка, лежить у межах від атмосферного ( $10^5 \text{ Па} \approx 10^3 \text{ Тор}$ ) і до менш ніж  $10^{-12} \text{ Па} \approx 10^{-14} \text{ Тор}$ , що становить 17 порядків. Виявилося, що створити такі розрідження газового середовища якимось одним типом вакуумних насосів неможливо. Всі насоси можна розділити **за призначенням** на дві основні групи: низьковакуумні і високовакуумні. В середині кожної групи можна виділити більш вузькоспеціалізовані підгрупи насосів – насоси низького вакууму і насоси середнього вакууму, насоси високого вакууму і насоси надвисокого вакууму.

Незалежно від області використання всі вакуумні насоси у своїй роботі реалізують два основні принципи: перший – усунення газових молекул за межі вакуумної системи (як правило, в оточуючу атмосферу), другий – зв'язування молекул газу у вакуумній системі (як правило, у самому насосі). Насоси, які використовують у своїй роботі перший принцип, називають

газопереміщувальними насосами. Насоси, які використовують у своїй роботі другий принцип, називають поглинальними насосами. Загальна класифікація вакуумних насосів представлена на рис. 1.1. [3, 5, 6, 9]

Насоси, які працюють використовуючи перший принцип (переміщення молекул газу за межі вакуумної системи) можна вважати механічними насосами, бо у цих насосах газові молекули одержують механічний імпульс у певному напрямку, у результаті чого вони покидають вакуумну систему. Така передача імпульсу може здійснюватись різними способами:

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

Таким чином, всі вакуумні насоси, представлені у лівій частині рис. 1.1 можна вважати механічними. У більш вузькому смислі механічними (центральна частина рис. 1.1) часто називають ті насоси, у яких механічно рухаються їх певні деталі (робочі поверхні). Такими робочими поверхнями, які передають імпульс газовим молекулам, є поверхні поршнів, пластин, роторів, лопаток та інші поверхні рухомих елементів насосів. Конкретні назви механічних насосів (пластинчато-статорний, пластинчато-роторний, турбомолекулярний та ін.) підкреслюють основний робочий елемент насоса, який змінює імпульс газових молекул.

У поглинальних насосах газові молекули поглинаються гетером (гетер - речовина, яка зв'язує газові молекули шляхом хемосорбції), сорбентом (сорбент - речовина, яка зв'язує газові молекули шляхом фізичної сорбції) або ж шляхом конденсації на поверхні, яка охолоджена до дуже низької (криогенної) температури.

У ряді поглинальних насосів використовується комбінація цих способів з використанням електричних і магнітних полів. Такі комбіновані насоси називають фізико-хімічними насосами.

До основних параметрів будь-якого вакуумного насоса відносяться швидкість відкачування (бистрота дії), граничний вакуум (максимальне розрідження), найбільший тиск запуску, найбільший випускний тиск тощо.

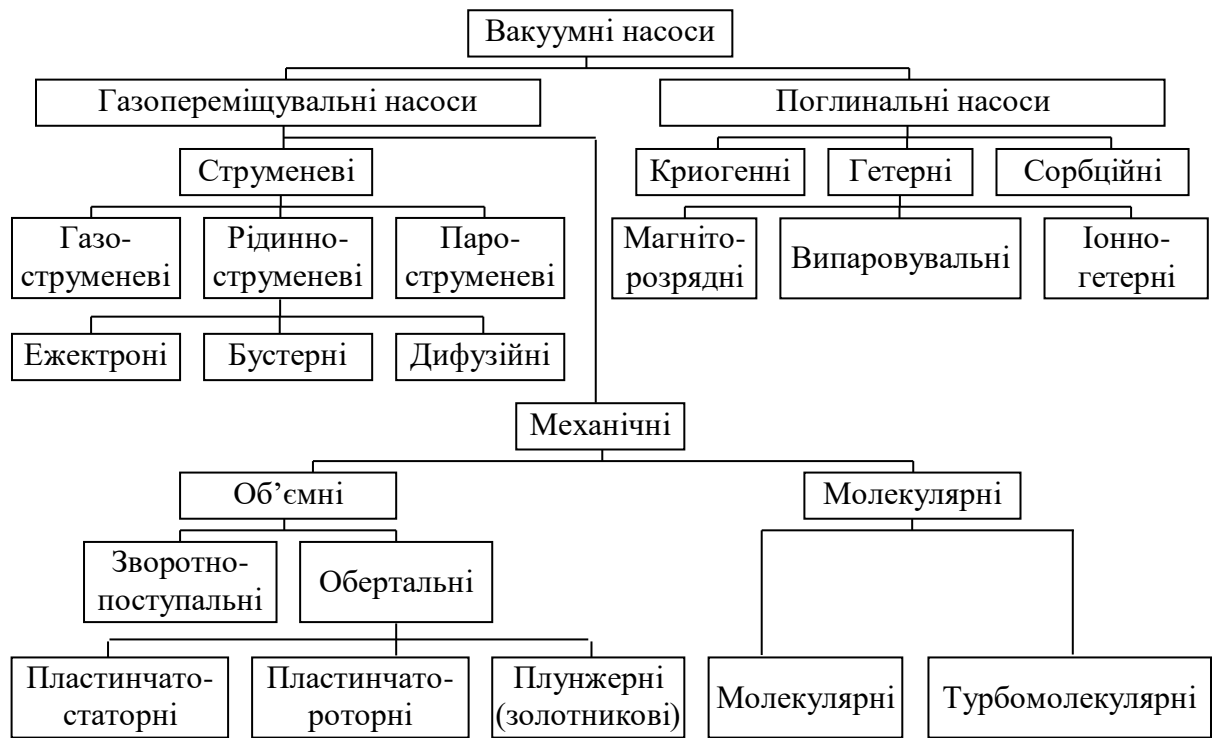


Рис. 1.1. Загальна класифікація вакуумних насосів

1. Швидкість відкачування насоса  $S$  визначається як об'єм газу, який відкачується насосом за одиницю часу через вхідний отвір насоса при даному тиску.

$$S = \left( \frac{\Delta V}{\Delta T} \right)_{P = \text{const}}, \quad [S] = \frac{\text{л}}{\text{с}}, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Бистрота дії насоса  $S$  визначається принципом його роботи та особливостями його конструкції. Максимально можлива величина швидкості відкачування насоса може бути теоретично розрахована лише для «ідеального» вакуумного насоса, яким є отвір у простір з ідеальним ( $P = 0$ ) вакуумом.

2. Граничний вакуум  $P_{gp}$  – мінімальний тиск (максимальне розрідження), який може створити насос, працюючи сам на себе, без відкачуваного об'єкта. Граничний тиск більшості вакуумних насосів визначається газовиділенням матеріалів, з яких виготовлений насос, перетіканням газу через конструктивні зазори та іншими явищами, які виникають у процесі його роботи.

3. *Найбільший тиск запуску  $P_3$*  – максимальний тиск газів у насосі, при якому насос може почати роботу. Значення, тиск запуску  $P_3$  визначається принципом роботи насоса і його конструктивними особливостями. Деякі з насосів можуть починати роботу при атмосферному тиску повітря в них, для інших – необхідне попереднє відкачування і насоса і об'єкта до певного тиску. Таке попереднє розрідження дістало назву «форвакууму» (попереднього вакууму).

Всі ці характеристики визначаються видом насоса, принципом його роботи.

### **1.3. Області дії вакуумних насосів**

У залежності від вакууму, який створюється тим чи іншим насосом, насоси класифікують як низьковакуумні, високовакуумні та надвисоковакуумні. На рис. 1.2 представлені діапазони робочих тисків вакуумних насосів, які найчастіше використовуються у вакуумній техніці.

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

**Середньовакуумні насоси** працюють в області тисків  $10^2$ - $10^{-1}$  Па ( $1$ - $10^{-3}$  Тор). До них відносяться механічні насоси (з масляним ущільненням та двороторні), пароструменеві (парортутні і паромасляні ежекторні насоси), паромасляні бустерні та адсорбційні насоси.

**Високовакуумні насоси** працюють в області тисків  $10^{-1}$ - $10^{-5}$  Па ( $10^{-3}$ - $10^{-7}$  Тор). До них відносяться пароструменеві дифузійні насоси, турбомолекулярні насоси, сорбційні та сорбційно-іонні (іонно-гетерні) насоси, а також криогенні насоси (конденсаційні і криосорбційні).



Рис. 1.2. Области дії вакуумних насосів [3, 5, 6, 9]

**Надвисоковакуумні насоси** працюють в області тисків менших  $10^{-5}$  Па ( $10^{-7}$  Тор). Для одержання високого і надвисокого вакууму можуть використовуватися одні і ті ж насоси. Як видно з рис. 1.2, області дії високовакуумних і надвисоковакуумних насосів перекриваються.

Для правильного вибору і використання насосів необхідно знати ще цілу низку їх характеристик (не пов'язаних з вищерозглянутими) – кількість спожитої електроенергії, кількість охолоджувальної води, масу насоса та його розміри, рівень шумів, вібрацій, які створюються при роботі насоса, та ін. Необхідно також знати час запуску та зупинки насоса, склад залишкових газів, можливість сумісної роботи насосів та ін.

Зараз для одержання високого вакууму найбільш широко використовуються пароструменеві дифузійні насоси, турбомолекулярні насоси та магніторозрядні насоси. Саме ці вакуумні насоси й розглянуті в роботі.

## **Розділ 2. Дифузійні насоси для одержання високого вакууму**

### **2.1. Пароструменеві дифузійні насоси [3, 5, 6, 9, 10]**

Пароструменеві вакуумні насоси до середини 20-го століття були практично єдиними вакуумними насосами, що дозволяли отримувати розрідження  $10^{-3}$  -  $10^{-5}$  Па. Поява у другій половині 20-го ст. нових типів насосів високого і надвисокого вакууму (турбомолекулярні, електрофізичні, криогенні), дещо звузила діапазон використання пароструменевих насосів, але і до цього часу вони (внаслідок виключної простоти конструкції, малої трудоемності при виготовленні, низької вартості, надзвичайно високої надійності у роботі і практично необмеженого строку служби) широко використовуються у промисловості, техніці і наукових дослідженнях. Пароструменеві насоси випускаються всіма провідними виробниками вакуумної техніки.

За принципом дії пароструменеві вакуумні насоси можна вважати механічними молекулярними, бо в них молекули відкачуваного газу механічно взаємодіють зі струменем пари робочої рідини (масло або ртуть), який рухається з надзвуковою - (300-400) м/с швидкістю. Струмінь пари робочої рідини примусити рухатися з такою швидкістю досить просто, а тому пароструменеві насоси мають надзвичайно просту конструкцію і їх масове промислове виготовлення стало можливим вже на початку 20-го століття.

Перші пароструменеві насоси були запропоновані Геде (Німеччина), Ленгмюром (США) і Боровиком (Росія) у 1912-1916 роках. З цього часу з'явилася велика кількість робіт по створенню теорії роботи таких насосів (Геде, Ленгмюр, Яккель, Ліфшиц та Розенцвейг, Флореску, Тота та ін.). Проте, на основі цих теоретичних результатів можна провести в основному лише якісний аналіз роботи пароструменевих насосів. Безпосереднє ж конструювання та інженерні розрахунки насосів базуються на накопичених емпіричних знаннях та використанні методів теорії подібності.

Для створення високого вакууму ( $10^{-2}$ - $10^{-5}$  Па і краще) використовуються дифузійні пароструменеві насоси. При таких тисках середня довжина вільного пробігу молекул відкачуваних газів набагато більша діаметра вхідного отвору насоса, а тому у насосі має місце молекулярний режим протікання газу. Схематично будова найпростішого дифузійного насоса представлена на рис. 2.1.

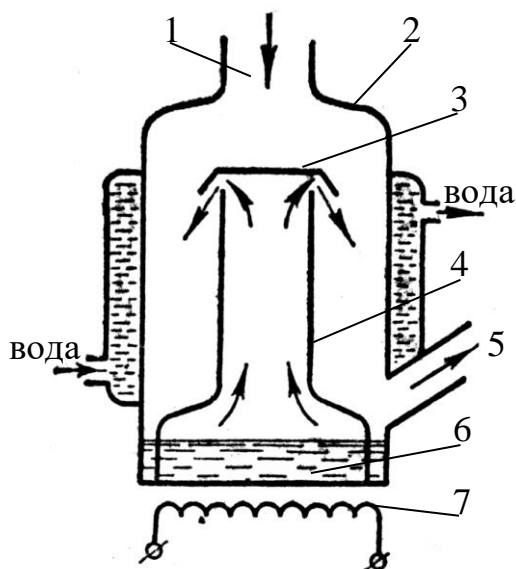


Рис. 2.1. Схематична будова дифузійного насоса:  
 1 – вхідний отвір; 2 – корпус насоса;  
 3 – тарілка-відбивач; 4 – паропровід;  
 5 – вихідний отвір; 6 – кип'ятильник;  
 7 – електронагрівник

У металевому циліндричному корпусі насоса (2), який охолоджується проточною водою, розташований паропровід (4) у формі циліндра та відбивач пари (3) у формі тарілки. Паропровід разом з відбивачем утворюють сопло Лавалю, у якому паровий струмінь (показаний стрілками) повертається на  $180^\circ$  по відношенню до напрямку свого початкового руху і направляється до корпусу стінки насоса. У нижній частині насоса у кип'ятильнику (6) знаходиться робоча рідина, яка нагрівається до кипіння за допомогою електричного нагрівника (7) (з'ємна електропіч).

При кипінні робочої рідини молекули пари рухаються по паропроводу (4) вгору (як показано стрілками) і після відбивання тарілкою (3) одержують надзвукову швидкість і направляються на охолоджувану проточною водою стінку корпусу насоса. На стінці пара конденсується у рідину і стікає у нижню частину насоса, де знову нагрівається, закипає, випаровується і направляється у паропровід.

При робочих розрідженнях насоса у верхній його частині молекули газу рухаються хаотично у молекулярному режимі (практично без зіткнень одна з



одною). Певна їх частина при цьому рухається вниз і потрапляє у паровий струмінь, який має форму конуса. Зіткнувшись з важкими молекулами пари, які мають надзвукові швидкості, частина газових молекул одержує імпульс у напрямку до стінки корпусу насоса, тобто буде «захоплена» струменем пари, і виноситися паром до стінки корпусу насоса.

Назва пароструменевого насоса «дифузійний» підкреслює механізм захоплення газових молекул струменем пари – дифузію газу у струмінь пари, яка відбувається внаслідок різниці концентрацій газових молекул над струменем і у самому струмені (поблизу сопла, біля тарілки, концентрація газових молекул у струмені пари практично рівна нулю). Швидкість дифузії найбільша біля тарілки (тут найбільший градієнт концентрації газових молекул). По мірі віддалення від тарілки струмінь пари насичується газом, градієнт концентрації газових молекул зменшується, відповідно зменшується і швидкість дифузії газу у паровий струмінь.

Рухаючись разом із захопленими молекулами газу до стінки насоса, струмінь пари стискає захоплений газ до певного тиску. Пара робочої рідини конденсується на холодній стінці насоса і стікає назад у кип'ятильник, а стиснений газ у тонкому пристінному шарі рухається вздовж стінки насоса у його нижню частину, де відкачується допоміжним механічним (форвакуумним) насосом через вихідний отвір (5).

Паралельно з прямою дифузією газу (згори-вниз) завжди існує і обернена дифузія молекул газу у струмінь з боку більш високого тиску (знизу-вгору). Кількість таких молекул газу у порівнянні з кількістю молекул, що дифундують згори-вниз надзвичайно мала, бо такі молекули рухаються як проти молекул пари, так і проти основної маси газових молекул. Але у випадку значного зростання тиску у нижній частині насоса (прорив атмосферного повітря внаслідок зупинки форвакуумного насоса, або ж у випадку, коли дифузійний насос тільки починає свою роботу і струмінь пари ще не сформувався повністю) кількість обернено дифундуючих молекул може бути значною, що приводить до зриву струменя пари і відповідно до зриву роботи насоса в цілому.

## 2.2. Швидкість відкачування дифузійного насоса

Із механізму відкачування дифузійного насоса випливає, що його швидкість дії буде визначатися площею поверхні тієї частини струменя, яка контактує з газом і швидкістю направлено руху парових молекул. Суттєву роль у роботі дифузійного насоса також відіграє кут, утворений струменем пари зі стінкою насоса. Його величина задається кутом нахилу сопла (скошеної стінки тарілки) зі стінкою корпусу насоса. Чим менший цей кут, тим більша швидкість дії насоса, і навпаки, зі збільшенням кута нахилу швидкість дії зменшується, а при куті  $90^\circ$  (струмінь пари перпендикулярний до стінки насоса) швидкість дії стає рівною нулю, бо молекули пари не надають молекулам газу направлено руху в нижню частину насоса, у бік відкачування. У сучасних конструкціях дифузійних насосів цей кут становить  $10-20^\circ$ .

Типова залежність швидкості відкачування дифузійного насоса  $S_n$  від впускного тиску (тиску на вході у насос) представлена на рис. 2.2.

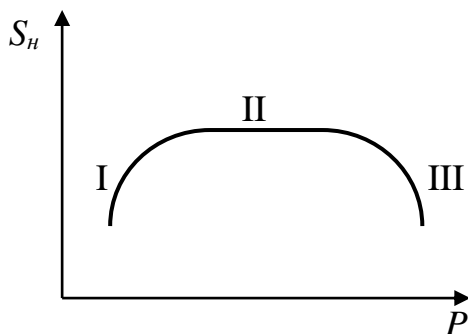


Рис. 2.2. Залежність швидкості дії дифузійного насоса від впускного тиску

Як видно з рис. 2.2, швидкість відкачування насоса залишається сталою (ділянка II) у досить широкому інтервалі тисків (робочі тиски). У області дуже низьких тисків (ділянка I), як і в області високих тисків (ділянка III), швидкість відкачування зменшується.

Зменшення швидкості дії в області дуже низьких тисків (в області граничного вакууму) зумовлена низкою факторів. По-перше, при таких низьких тисках відчутною стає обернена дифузія молекул газу через паровий струмінь. По-друге, суттєвими стають газовиділення стінок насоса. По-третє, відчутним стає винесення газових молекул паровим струменем з кип'ятильника. Справа в тому, що деяка кількість газу, стисненого паровим струменем до стінок насоса, фізично розчиняється в конденсаті і з ним потрапляє у кип'ятильник,

з якого виноситься разом з парою у вертикальну частину насоса. Сукупна дія цих чинників і зумовлює у значній мірі граничний вакуум насоса та знижує його швидкість дії в області граничного розрідження.

При суттєвому збільшенні впускного тиску (права частина ділянки II) зростає і тиск на виході з насоса біля вихідного отвору. Величина цього тиску задається швидкістю відкачування форвакуумного насоса. При певному значенні тиску на виході газ відриває струмінь пари від стінок насоса, суцільність парового ковпака (струменя) порушується, швидкість відкачування насоса різко падає і стає рівною швидкості відкачування форвакуумного насоса (ділянка III).

Максимально можливу швидкість відкачування дифузійного насоса  $S_T$  можна розрахувати, вважаючи його «ідеальним» насосом. Вона становить [3]

$$S_T = \frac{1}{4} \tilde{v} A = \sqrt{\frac{R}{2\pi}} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}} \cdot A, \quad (2.1)$$

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

$R$  – універсальна газова стала;

$T$  – абсолютна температура газу;

$\mu$  – молярна маса газу;

$A$  – площа отвору, через який відбувається відкачування газу.

В дійсності, швидкість дії реальних дифузійних насосів значно менша внаслідок дії тих трьох факторів, про які йшла мова вище, а також внаслідок того, що не всі молекули газу, що впали на поверхню парового струменя, будуть захоплені ним.

Наявність цих факторів приводить до зменшення швидкості відкачування реальних насосів порівняно з ідеальним вакуумним насосом (2.1) і тому вона становить

$$S_n = H \cdot S_T, \quad (2.2)$$

де  $H$  – вакуум-фактор, величина якого визначається експериментально і для кращих сучасних дифузійних насосів лежить в межах (0,3-0,5).

З урахуванням цього можна розрахувати **питому бистроту дії** дифузійного насоса  $S_0$ , поклавши такою об'єм газу, який проходить за 1 с через  $1 \text{ см}^2$  площі перерізу парового струменя. Для повітря при кімнатній температурі ця величина лежить в межах  $3,5 \leq S_0 \leq 5,8 \text{ л/с з } 1 \text{ см}^2$ .

Проаналізуємо формулу (2.1) для швидкості відкачування ідеального насоса. Оскільки для даного насоса  $A = \text{const}$ , то швидкість відкачування повинна залежати від температури газу (зростає зі збільшенням температури газу) і виду газу. Більш легкі гази ( $\mu$  – малі) повинні відкачуватися швидше, а більш важкі ( $\mu$  – великі) – з меншою швидкістю (це явище називається селективністю відкачування). Однак практично для дифузійних насосів швидкість відкачування мало залежить від виду газу. Причиною цього є те, що для легких газів обернена дифузія більша порівняно з важкими. Таким чином, обернена дифузія легких газів компенсує збільшення швидкості їх відкачування.

Більш вираженою є залежність бистроти дії насоса для різних газів від потужності нагрівника [5, 6]. Збільшення потужності нагрівника приводить до більш інтенсивного кипіння робочої рідини у насосі і внаслідок цього до збільшення густини пари у струмені.

Виробники дифузійних насосів, як правило, вказують значення потужності нагрівника насоса, при якій забезпечуються оптимальні значення швидкості відкачування для повітря (у випадку, коли насос загального призначення). Стосовно залежності бистроти дії дифузійного насоса від температури газу (формула (2.1)), необхідно зазначити, що ті зміни температури газу при його відкачуванні, які мають місце в звичайній практиці, мало впливають на бистроту дії насоса.

### **2.3. Конструкції сучасних дифузійних насосів**

**Багатоступеневі насоси.** Перш ніж обговорити конструктивні особливості сучасних пароструменевих дифузійних насосів, необхідно відзначити, що дифузійні насоси можуть працювати послідовно, тобто вихід

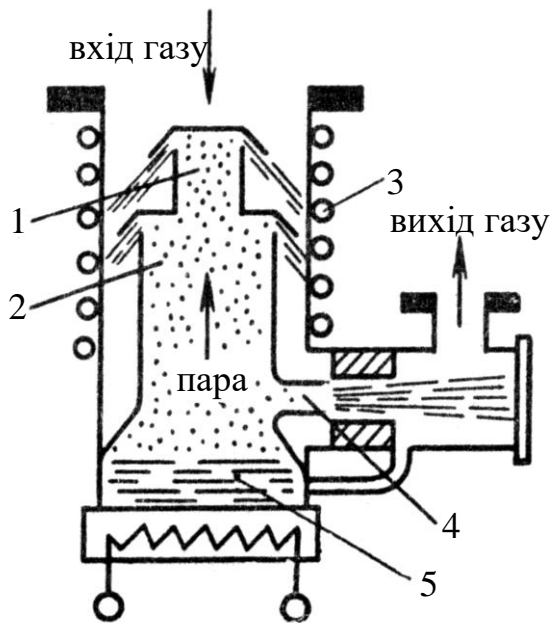


Рис. 2.3. Схематичне зображення багатоступеневого дифузійного насоса:

- 1, 2 – дифузійні ступені;
- 3 – водяне охолодження;
- 4 – ежекторний ступінь;
- 5 – кип'ятильник

одного насоса з'єднується з входом другого і т.д. Це дозволяє покращити граничний вакуум насоса за рахунок зменшення оберненого газового потоку через струмінь пари робочої рідини.

Сучасні дифузійні насоси реалізують послідовне поєднання декількох дифузійних насосів в одному корпусі. Такий насос, схематично зображений на рис. 2.3, називається багатоступеневим. У такому насосі кип'ятильник і паропровід спільні для живлення сопел окремих ступенів.

Швидкість відкачування такого насоса визначається швидкістю відкачування вхідного (першого)

ступеня. Т.я. ступені включені послідовно, то умовою нерозривності газового потоку через насос є наступне:

$$S_1 P_1 (\text{вхід}) = S_2 P_2 = \dots = S_i P_i (\text{вихід}), \quad (2.3)$$

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

При розрахунку конструкції багатоступеневого дифузійного насоса, як правило, кожний ступінь розраховується з деяким «запасом» так, щоб мала місце наступна нерівність:

$$S_1 P_1 (\text{вхід}) \leq S_2 P_2 \leq \dots \leq S_i P_i (\text{вихід}), \quad (2.4)$$

Оскільки  $P_1 < P_2 < \dots < P_i$ , то площа поверхні послідуєчого ступеня (діафрагми) зменшується (1, 2 на рис. 2.3). Ефективна і синхронна робота кожного ступеня насоса залежить від правильного розподілу пари між соплами, це досягається експериментальним шляхом підбором діаметрів паропроводів і вихідних щілин сопел. Як правило, сучасні насоси мають від 3 до 5 відкачувальних ступенів. Останній (вихідний) ступінь, як правило, є

ежектором, тобто замість тарілчаного сопла (1, 2 на рис. 2.3), яке формує кінчну поверхню струменя з великою площею, використовується трубчате сопло малого діаметра (ежекторне сопло), яке дає короткий, але густий струмінь пари. У результаті використання ежекторного ступеня вдається збільшити тиск на виході з дифузійного насоса до  $10^{-1}$  Тор (1 Па) і використовувати для відкачування дифузійних насосів ротаційні насоси у якості форвакуумних насосів. Саме таким і є останній ступінь (4) насоса, зображеного на рис. 2.3.

**Парортутні насоси.** Парортутні насоси (насоси де робочою рідиною є ртуть) були історично першими дифузійними насосами. Найбільший випускний тиск для парортутних насосів становить 1-10 Тор ( $10^2$ - $10^3$  Па), що дозволяє використовувати прості форвакуумні насоси. Граничний залишковий тиск парортутних насосів може досягати  $10^{-12}$  Тор ( $10^{-10}$  Па) (надвисокий вакуум).

Зараз парортутні насоси використовуються дуже рідко незважаючи на простоту їх конструкції і експлуатації, а також «безмасляність» створюваного ними вакууму. Причиною цього є висока токсичність парів ртуті.

**Паромасляні насоси.** У 1928 р. Берг (Англія) прийшов до висновку, що ртуть у дифузійних насосах може бути замінена деякими продуктами перегонки нафти (маслами) з високими температурами кипіння. Берг зумів на одному з таких масел одержати розрідження  $10^{-7}$  Тор ( $10^{-5}$  Па). Цей факт привів до створення нині широко використовуваних паромасляних насосів.

Роботи Берга у 30-х роках минулого століття були продовжені Хікменом та його співробітниками у двох напрямках: по-перше, в області створення органічних сполук, придатних для використання в пароструменевих насосах, і по-друге, в області удосконалення конструкції насосів для одержання високих розріджень. В СРСР аналогічні роботи у 30-х роках минулого століття були проведені на Україні в Харківському фізико-технічному інституті.

Перші паромасляні насоси (як і парортутні) мали скляний корпус, паропроводи виготовлялися як зі скла, так і з металів (мідь, нержавіюча сталь, алюміній). Сучасні паромасляні насоси виготовляють повністю

металевими – корпуси з чорних сталей або алюмінію, а паропроводи з нержавіючої сталі та алюмінію. Пружність пари сучасних масел для дифузійних насосів лежить в області  $10^{-4}$ - $10^{-9}$  Па при кімнатних температурах, а тому навіть без низькотемпературних уловлювачів граничний вакуум таких насосів становить  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  Тор ( $10^{-5}$ - $10^{-6}$  Па), а з використанням азотних уловлювачів –  $10^{-10}$  Тор ( $10^{-8}$  Па).

Загальний вигляд, схематичне зображення та паропровід одного з сучасних паромасляних насосів Н-100 представлені на рис. 2.4.

Паропровід (5) має два ступеня дифузійного відкачування з тарільчастими відбивачами пари (6, 7) та ежекторний ступінь (8). Охолодження стінок корпусу насоса та ежектора здійснюється проточною водою, що протікає через трубчатий змійовик (4), приварений до корпусу насоса (3). Масловідбивач (2) являє собою металевий ковпачок, бічні крильця якого мають добрий тепловий контакт з охолоджуваними водою стінками насоса, тому і температура ковпачка близька до температури води. Масловідбивач виготовляють з міді з покриттям нікелем або сріблом.

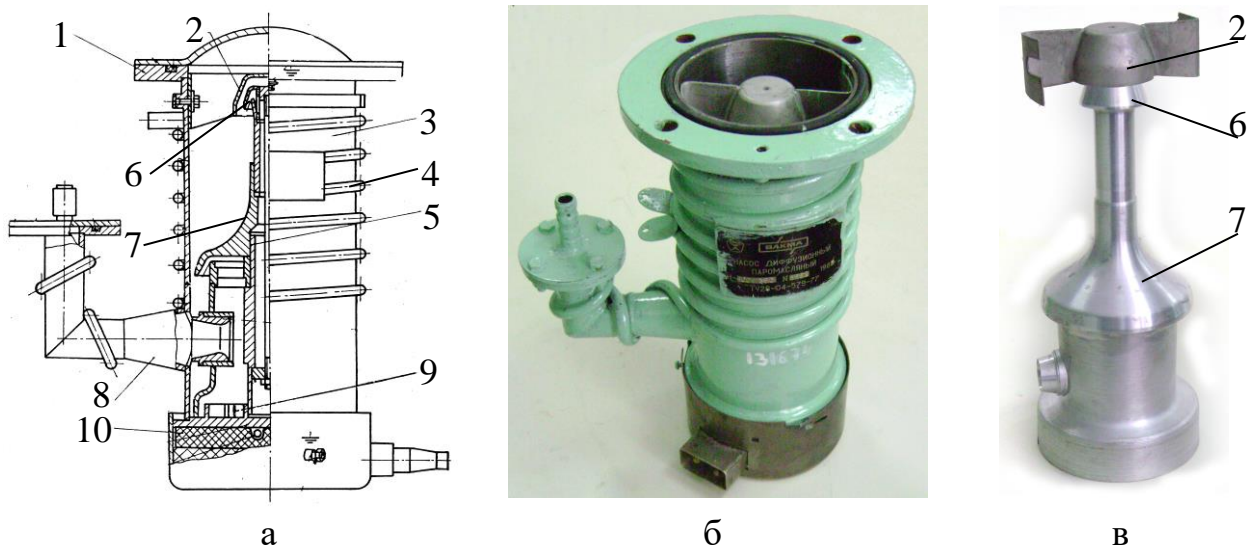


Рис. 2.4. Схематичне зображення (а), загальний вигляд (б) та паропровід (в) паромасляного насоса Н-100: 1 – вхідний фланець; 2 – масловідбивач; 3 – корпус; 4 – змійовик водяного охолодження; 5 – паропровід; 6, 7 – тарільчасті відбивачі пари; 8 – сопло ежекторне; 9 – фракційне кільце; 10 – електроніч нагрівника

Необхідність відбивача пари (2) зумовлена тим, що у масляному дифузійному насосі, навіть при найкращих конструкціях вхідного ступеня, завжди існує потік молекул пари робочої рідини до входу в насос (проти потоку відкачуваного газу). Його називають зворотним потоком парів масла (основний напрямлений до стінок у нижню частину насоса). Причиною його появи є розсіяння молекул пари біля країв верхньої тарілки сопла (6). Цей потік парів масел зовсім небажаний, бо він проникає у відкачуваний об'єм. Найпростішим пристроєм для перехоплення цього потоку і є охолоджуваний масловідбивач у формі ковпачка (2) (рис. 2.4 в).

Нажаль, масла для дифузійних насосів не є однорідними рідинами. При робочих температурах 150-160°C та контакті масла з металевими деталями насоса та відкачуванням газом відбувається деструкція та часткове розвалювання (крекінг) макромолекул масла. У результаті цього у насосі утворюються більш летючі фракції масла, що мають більш високі тиски парів. Якщо використовувати цю суміш різних фракцій як робочу рідину, то це приведе до суттєвого погіршення граничного вакууму. Для запобігання цьому використовується фракціонування (розділення) масла.

У сучасних паромасляних насосах використовується автоматичне фракціонування масла. У залежності від кількості ступенів відкачування масло поділяється на таку ж кількість фракцій (для триступінчатого насоса, зображеного на рис. 2.3, – на три фракції) і кожна фракція направляється у свій паропровід. До центрального високовакуумного сопла направляється важка фракція масла з найбільшою температурою кипіння і найменшою пружністю пари. Легкі фракції масла, що мають трохи меншу температуру кипіння і більш високі значення пружності пари, направляються в нижнє сопло. Експериментальні дослідження встановили, що у насосів без розділення на фракції масла граничний вакуум становить  $\sim 10^{-3}$  Па проти  $\sim 10^{-5}$  Па у насосів з фракціонуванням масла.



Існує декілька способів розділення фракцій масел у дифузійних насосах. Для металевих насосів найбільш поширеним є фракціонування масла за допомогою лабіринта на дні насоса [5, 6].

Ще однією особливістю паромасляних дифузійних насосів є необхідність створення попереднього вакууму ( $\sim 10^{-1}$  Па), як при запуску насоса, так і у процесі його роботи. У противному разі масло виходить з ладу (згорає, окисляється). Масло також виходить з ладу при аварійному прориванні атмосферного повітря у працюючий насос.

Охолодження стінки корпусу дифузійних насосів, як правило, здійснюється проточною водою кімнатної (15-20°C) температури. Підвищення температури води до 50°C приводить до погіршення граничного вакууму насоса у 3-5 разів. Тому системи охолодження конструюють з таким розрахунком, щоб забезпечити невеликий перепад температур води на виході і вході в насос. Як правило, витрати води становлять від 0,5 л/хв для невеликих насосів з бистротою дії 100-300 л/с до десятків літрів за хвилину для потужних насосів.

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

Потужність нагрівників дифузійних насосів змінюється у межах від  $P = 200-250$  Вт (для малих насосів зі швидкістю відкачування  $\sim 100$  л/с) і до декількох кВт для насосів зі швидкістю відкачування 10000-50000 л/с. Відповідно маса дифузійних насосів змінюється у межах від 3-4 кг до 1000 кг у залежності від бистроти дії.

Як правило, всі відомі фірми, що виготовляють вакуумне обладнання, виготовляють серійно до 10 різних типів дифузійних насосів з різною бистротою дії. На рис. 2.5 [11] зображені дифузійні насоси одного з провідних світових вакуумних виробників – фірми «Varian» (США). Найменший насос має швидкість відкачування 60 л/с і охолоджується

оточуючим повітрям, найбільший має швидкість відкачування 50000 л/с і охолоджується проточною водою.

Насоси інших виробників мають приблизно такі ж параметри.

Цікавим є те, що більшість насосів має класичний циліндричний корпус (для простоти виготовлення). Але за останні 20 років з'явилися дифузійні насоси з досить складними по формі грушоподібними корпусами. Згідно рекламних повідомлень, такі насоси мають більш високі показники стосовно швидкості дії порівняно з «класичними» насосами.



*Рис. 2.5. Зовнішній вигляд лінійки дифузійних насосів фірми «Varian»*

#### **2.4. Робочі рідини для дифузійних насосів**

До робочих рідин для дифузійних вакуумних насосів пред'являються наступні основні вимоги [3, 5, 6]:

1. *Низький тиск насиченої пари при кімнатній температурі, у противному випадку неможливе одержання низьких залишкових тисків (без застосування пасток, що виморожують).*
2. *Високий тиск пари при робочій температурі у випарнику, що забезпечує роботу насоса при відносно високих випускних тисках.*
3. *Однорідність складу, тому що будь-яка зміна складу рідини через зникнення окремих компонентів викличе зміну характеристик насоса.*

4. *Термічна стабільність* при робочій температурі у випарнику насоса й *термоокислювальна стійкість*; у противному випадку можливе порушення однорідності або псування робочої рідини.
5. *Відсутність хімічної активності*, тобто робоча рідина не повинна взаємодіяти з конструкційними матеріалами; відсутність токсичності.
6. *Мала питома теплота паротворення* Для забезпечення малих витрат потужності на створення необхідної кількості пари в насосі.
7. *Мала здатність до розчинення газів*, що сприяє одержанню низьких залишкових тисків завдяки малому зворотному виділенню газів струменем пари на впуску насоса.

Необхідно відзначити, що нажаль, робочих рідин, які б повністю задовольняли всім вимогам, до цього часу не вдалося створити. В якості робочих рідин у сучасних насосах використовуються ртуть, мінеральні масла і кремнійорганічні рідини.

**Високовакуумні масла** хімічно інертні, не токсичні і мають низькі пружності парів при кімнатних температурах, що дозволяє одержувати граничні розрідження порядку  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  Па і краще, без використання низькотемпературних уловлювачів.

Мінеральні високовакуумні масла одержують шляхом вакуумної дистиляції продуктів переробки нафти. Далі вказуються марки масел, які прийняті в Україні: вазелінові ВМ-1, ВМ-2, ВМ-5 та турбінне ВМ-7. Масла ВМ-1, ВМ-2 та ВМ-5 являють собою продукти вакуумної дистиляції медичного вазелінового масла, а вихідною сировиною масла ВМ-7 є турбінне масло 46. Всі ці масла являють собою неоднорідні по складу суміші вуглеводів різних молекулярних мас з різними температурами кипіння (не мають певної точки кипіння). Тому вони використовуються у дифузійних насосах з фракційними кільцями. Перегрівання масел приводить до їх розкладання і збагачення легкими фракціями, тому для насосів з цими робочими рідинами дуже важливим є додержання паспортної потужності нагрівника. При контакті гарячого масла з атмосферним повітрям

відбувається його окислення (згорання) з утворенням смолистих налетів, що важко видаляються, на внутрішніх деталях насосів. Важливою перевагою мінеральних масел перед іншими робочими рідинами є їх відносно низька вартість.

*Ефіри ОФ і ОС* є продуктами синтезу фталевої і себацінової кислот з вищими спиртами. Вони мають трохи більші значення пружностей парів при кімнатних температурах порівняно з мінеральними маслами, але є однокомпонентними речовинами, мають також низьку стійкість до окислення.

*Ефір 5Ф4Э* (поліфеніловий ефір) являє собою суміш ізомерів, що складаються з бензольних радикалів, з'єднаних в ланцюги атомами кисню. Ця рідина має дуже низьку пружність пари ( $10^{-9}$  Па) при кімнатній температурі і використовується для одержання надвисокого вакууму без низькотемпературних уловлювачів. Ефір 5Ф4Э має також високу термоокисну стійкість (не окисляється при аварійному попаданні невеликих кількостей повітря у працюючий насос).

*Силіконові масла* (кремнійорганічні рідини) є синтетичними полімерами, в яких атоми вуглецю і атоми кремнію зв'язані у силіконовий ланцюг (звідси походить і назва «силіконові»). Замість вуглецевих зв'язків основу молекули складають ланцюги виду  $-Si-O-SiO-$  з міцними зв'язками і внаслідок чого силіконові масла мають дуже високу термоокисну стійкість. Вони практично не погіршують свої властивості при контакті в нагрітому стані з атмосферним повітрям. Мають низьку пружність пари ( $\sim 10^{-8}$  Па) і тому найближче підходять до ідеалізованої робочої рідини, яка б задовольняла всім вимогам, сформульованим на початку даного розділу. Необхідно відзначити, що силіконові масла досить дорогі у порівнянні з іншими вакуумними маслами.

Робочі рідини, що випускаються в інших країнах світу мають аналогічні характеристики.

## Розділ 3. Турбомолекулярні насоси для одержання високого вакууму

### 3.1. Молекулярні насоси [3, 5, 6]

Детальне експериментальне вивчення взаємодії газових молекул з твердими тілами (удар молекули об поверхню твердого тіла) дозволило у другій половині 20-го століття створити низку механічних насосів, які одержали назву молекулярних і турбомолекулярних. На відміну від класичної молекули в МКТ газів, реальна газова молекула після удару об стінку посудини не відлітає від неї як пружна кулька, а протягом деякого (дуже малого) часу знаходиться на ній у сорбованому стані, після чого випаровується з поверхні, відлітаючи від неї під кутом, зовсім не пов'язаним з кутом її падіння. Кількість молекул, які відлітають після взаємодії від поверхні під деяким кутом  $\phi$ , описується законом косинуса. У відповідності з цим законом переважна більшість молекул після удару об поверхню відлітає від неї під кутом, близьким до  $90^\circ$  (по нормалі до поверхні). Якщо тепер поверхню, яку бомбардують молекули газу, привести у рух, то при відлітанні з неї молекули газу будуть мати складову своєї швидкості, направлену в бік руху поверхні.

На цьому явищі і базується ідея молекулярного відкачування. Пристрої, у яких реалізується ця ідея, одержали назву *молекулярних насосів*. (МН). Схематично найпростіший МН (насос Геде, 1912 р.) представлений на рис. 3.1.

Всередині циліндричної порожнини статора (1) обертається ротор (2). Конфігурація статора така, що на ділянці (3-4) зазор між ротором і статором дуже малий, у результаті чого ця ділянка чинить великий опір газовому потоку. На ділянці (3-5-4) довжиною  $l$  зазор дещо більший (шириною  $h$ ). Він і утворює відкачувальну камеру насоса. Молекули газу, що через вхідний отвір попадають на поверхню ротора, протягом деякого часу залишаються на ній у сорбованому стані, а потім випаровуються з неї, маючи складову швидкості, рівну лінійній швидкості  $v_p$  ротора. Таким чином, всі газові

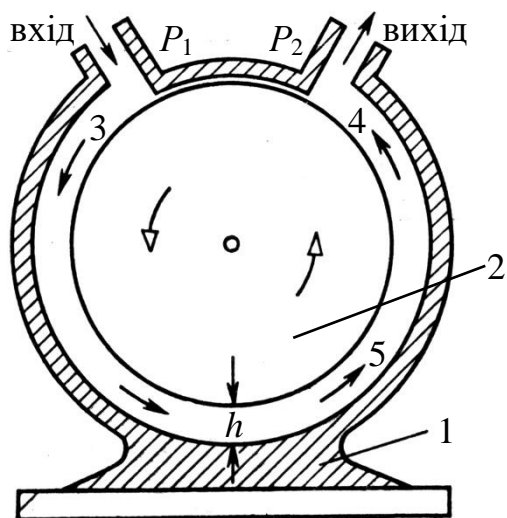


Рис.3.1. Схематичне зображення молекулярного насоса Геде:  
 1 – статор; 2 – ротор;  
 3, 4, 5 – ділянки кільцевого каналу

насоса. Зазор (3-4) має малу (порівняно з (3-5-4)) ширину і ця ділянка створює значний опір подальшому направленому руху газових молекул, у результаті чого вони виходять з насоса через вихідний отвір.

Необхідно мати на увазі, що вищезазначений механізм відкачування базується на зміні ймовірностей напрямків руху молекул, а тому завжди буде певна кількість молекул, які рухаються у зазорі (3-5-4) у протилежному напрямку (до вхідного отвору). Таким чином, ефективний відкачувальний газовий потік через насос дорівнює різниці газових потоків – основний (3-5-4) мінус обернений (4-5-3), та той, що проник через зазор (4-3).

З наведених вище міркувань цілком зрозуміло, що швидкість відкачування такого насоса (об'єм газу, що проходить за одиницю часу через поперечний переріз каналу зазору) пропорційна лінійній швидкості руху ротора  $v_p$ . Необхідно одразу зазначити, що ця швидкість повинна бути сумірною з середньою швидкістю хаотичного руху газових молекул  $\tilde{v}$  ( $v_p \approx \tilde{v}$ ), у противному разі, при  $v_p \ll \tilde{v}$ , ніякого направленного руху газового потоку вздовж каналу зазору практично не буде спостерігатися. Причиною цього є те, що після випаровування з поверхні ротора газова молекула має сумарну швидкість  $\bar{v} = \tilde{v} + \bar{v}_p$ , причому  $\tilde{v}$  направлена по нормалі до поверхні

молекули, що зіткнулися з поверхнею ротора, починають рухатися в напрямку його обертання від вхідного отвору до вихідного, як показано на рис. 3.1. Перелітаючи з поверхні статора до поверхні ротора, молекули кожного разу одержують від поверхні ротора таку складову швидкості. Таким чином, всі газові молекули у зазорі (3-5-4) після багатьох відбивань від нерухомої (статор) і рухомої (ротор) поверхонь направляються до вихідного отвору

ротора (найбільш ймовірний напрямок випаровування у відповідності з законом косинуса), а  $\bar{v}_p$  – перпендикулярна до неї.

Для того, щоб відбувся суттєвий поворот вектора швидкості молекули у напрямку до вихідного отвору, і необхідно, щоб  $v_p \approx \tilde{v}$ .

Максимальна швидкість відкачування такого насоса пропорційна лінійній швидкості ротора  $v_p$

$$S_{max} = \gamma A v_p, \quad (3.1)$$

де  $A$  – площа поперечного перерізу каналу зазору;

$\gamma$  – коефіцієнт, що враховує відношення поверхонь рухомої (ротор) і нерухомої (статор) частин каналу.

Розрахунки, проведені самим Геде (див., наприклад, [3]), показали, що реальна швидкість відкачування насоса ( $S_H$ ) складним чином залежить від  $S_{max}$ , провідності каналу  $U_K$  і перепаду тисків на початку ( $P_1$ ) і в кінці ( $P_2$ ) каналу:

$$S_H = S_{max} \left( \frac{P_2}{P_1} - e^{\frac{S_{max}}{U_K}} \right) \cdot \left( 1 - e^{\frac{S_{max}}{U_K}} \right)^{-1}. \quad (3.2)$$

Відношення перепадів тисків  $P_2/P_1 = K$  одержало назву коефіцієнта компресії (коефіцієнта стиснення).

Практична реалізація НМ була здійснена самим Геде. Оскільки максимальна бистрота дії насоса визначається площею поперечного перерізу каналу відкачування, і для реальних каналів становить лише декілька мм<sup>2</sup>, то і в насосі Геде, і в інших конструкціях (Холвек, Холланд, Зігбан та ін. [3]) між ротором і статором створювалося декілька (до 10) паралельних каналів, які працювали синхронно. Як уже відзначалося, лінійна швидкість обертання ротора повинна бути значною (в ідеалі  $v_p \approx \tilde{v} = 300-400$  м/с при кімнатних температурах для основних складових повітря). При діаметрах ротора в 10-

20 см такі швидкості досягаються при обертанні ротора з частотою 15-20 тис. об/хв. Зазори між ротором і статором повинні становити біля 0,1 мм. Все це створює серйозні конструктивні ускладнення при виробництві таких насосів, пов'язані як з високою точністю виготовлення деталей ротора та точністю його балансування з одного боку, і створенням таких великих швидкостей обертання, підшипників та мастил для них, з другого.

Суттєвим недоліком НМ є відносно невелика швидкість їх дії. Так, для насосів з діаметром ротора біля 25 см і швидкістю обертання 9000 об/хв максимальна швидкість відкачування становить 15 л/с [3].

Граничний вакуум НМ становить  $10^{-4}$ - $10^{-6}$  Па, при підтримуванні тиску на виході з насоса  $5 \cdot 10^{-1}$  Па. Типове значення коефіцієнта стиснення становить  $10^4$ - $10^5$ .

Все це привело до того, що незважаючи на простоту конструкції і простоту одержання вакууму (відсутність складних уловлювачів) НМ (як самостійні насоси) у подальшому не одержали свого розвитку. Поява інших високовакуумних насосів (дифузійних) з швидкостями відкачування сотні, тисячі і навіть десятки тисяч л/с, при повній відсутності будь-яких рухомих конструктивних елементів привела у ті часи до повного витіснення НМ, як самостійних відкачувальних засобів.

Але у 1990 році (через 70 років після Геде) молекулярний насос Геде був знову використаний як низьковакуумна ступінь у складі турбомолекулярного насоса.

### **3.2. Турбомолекулярні насоси [3, 5, 6, 7, 9]**

Сучасний турбомолекулярний насос (ТМН) можна в повній мірі вважати вершиною розвитку механічних насосів кінця 20 і початку 21 століття. У його конструкцію вкладено практично всі досягнення сучасної техніки, починаючи від точного машинобудування, використання сучасних надміцних і надлегких сплавів і керамік, і закінчуючи сучасними електронними мікропроцесорними блоками живлення і керування двигуном насоса.



Поява ТМН була в певній мірі подальшим розвитком ідеї молекулярного відкачування, але дещо іншими механічними елементами. ТМН нагадує своєю конструкцією багатоступеневий компресор чи парову турбіну, ротор якої обертається з великою швидкістю. Відкачними елементами насоса є скошені пази у тілі ротора або лопатки ротора, аналогічні лопаткам газового компресора.

Ідея турбомолекулярного відкачування полягає у наступному. Нехай ми маємо скошений під деяким кутом  $\varphi$  паз, утворений паралельними поверхнями  $AB$  і  $CD$ , вибраний у тілі ротора (рис. 3.2 а), який рухається зі швидкістю  $\bar{v}_p$ , як показано на рис. 3.3 б.

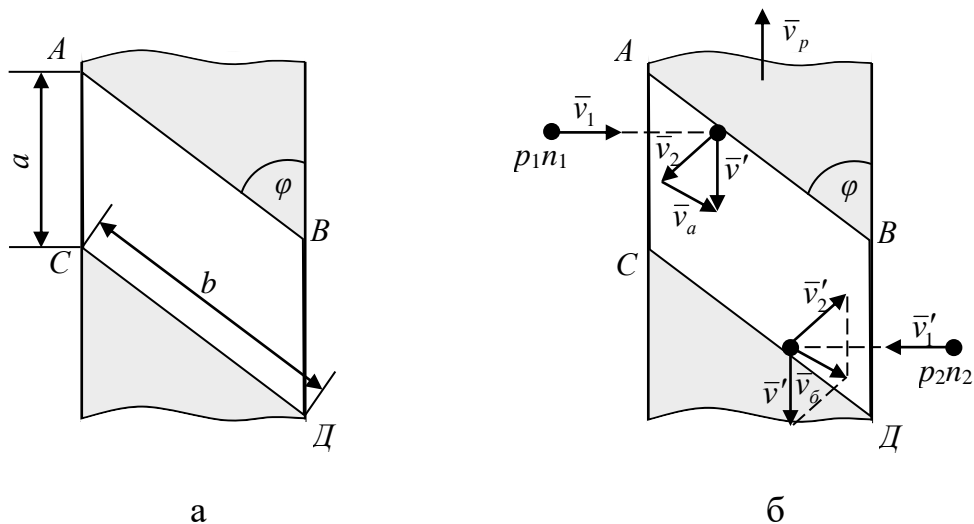


Рис. 3.2. Схема відкачування газових молекул скошеним пазом ротора

Для спрощення задачі приймемо, що зліва і справа від пазу знаходиться газ, молекули якого бомбардують поверхні  $AB$  і  $CD$ , падаючи на них з обох боків. Нехай зліва за 1 с падає  $n_1$  молекул, а справа –  $n_2$  молекул. Розглянемо газову молекулу, що влітає у скошений паз зліва з середньою швидкістю  $\bar{v}_1$ , як показано на рис. 3.2. Якби поверхня  $AB$  була нерухомою, то після взаємодії з нею молекула газу у відповідності з законом косинуса повинна відлетіти від неї нормально до  $AB$  зі швидкістю  $\bar{v}_2$ . Вважаючи температури газу і ротора однаковими одержуємо, що  $v_2 = v_1$ . Але поверхня  $AB$  рухається зі швидкістю  $\bar{v}_p$ , як показано на рисунку, тому відлітаючи від поверхні  $AB$

газова молекула буде мати і другу складову швидкості  $\bar{v}' = -\bar{v}_p$ . Таким чином, результуюча швидкість газової молекули відносно поверхні АВ  $\bar{v}_a$  буде становити

$$\bar{v}_a = \bar{v}_2 + \bar{v}', \quad (3.3)$$

і матиме напрям вздовж пазу, як показано на рис. 3.2. Така молекула може пройти через паз або одразу (коли  $\bar{v}_a$  стане паралельним твірним АВ і СД пазу), або ж у результаті декількох ударів з поверхнею АВ, адже незалежно від того, під яким кутом падають молекули газу на поверхню АВ, відлітають від неї вони з швидкістю  $\bar{v}_a$ , яка в цілому направлена вздовж пазу.

Таким чином, вздовж пазу буде спостерігатися направлений рух газових молекул (відкачування їх з лівої частини пазу).

Цілком зрозуміло, що кут повороту вектора  $\bar{v}_a$  визначається співвідношенням між величинами  $v_1$  і  $v_p$  та кутом  $\varphi$ , під яким вибрано паз у роторі. Суттєвий поворот вектора швидкості газової молекули після випаровування з поверхні АВ буде (як і для молекулярного насоса Геде) тільки у випадку, коли  $v_p \approx v_1$ , а  $v_1$  є середньою швидкістю хаотичного руху газових молекул  $\tilde{v}$ , і для основних складових повітря при кімнатній температурі становить  $\tilde{v} \approx 400$  м/с.

Розглянемо, як ведуть себе газові молекули, які в силу хаотичного свого руху потрапляють у паз справа. Нехай справа у паз влітає газова молекула зі швидкістю  $\bar{v}'_1$  ( $\bar{v}'_1 = v_1 = \tilde{v}$ ), як показано на рис. 3.2. Після випаровування з поверхні СД по аналогічному механізму ми знову одержуємо, що її швидкість  $\bar{v}_b$  направлена вздовж каналу зліва направо.

Таким чином, підводячи підсумок цих міркувань бачимо, що вздовж пазу зліва направо встановлюється режим протікання газу і відповідно на його кінцях виникає перепад тисків  $P_2 - P_1$ . Для газового потоку  $Q$  можна записати

$$Q = S_K P_1 = U_{12} P_1 - U_{21} P_2, \quad (3.4)$$

де  $U_{12}$  і  $U_{21}$  – провідності пазу для потоків  $n_1$  і  $n_2$ , відповідно;  
 $P_1$  і  $P_2$  – тиски газу зліва і справа від пазу, відповідно;  
 $S_K$  – швидкість відкачування каналу пазу.

Провідності  $U_{12}$  і  $U_{21}$  можна розрахувати, моделюючи паз відповідним трубопроводом. Провідності будуть пропорційні ймовірностям проходження пазу молекулами:

$$U_{12} = C W_{12}, \quad U_{21} = C W_{21}, \quad (3.5)$$

де  $C$  – деякий коефіцієнт, що враховує геометричні розміри пазу;  
 $W_{12}$  – ймовірність проходження молекулою пазу зліва направо;  
 $W_{21}$  – ймовірність проходження молекулою пазу справа наліво (рис. 3.3 б). Розрахунки  $W_{12}$  і  $W_{21}$  досить складні і були виконані методом Монте-Карло [3].

Швидкість відкачування  $S_K$  такого пазу становить:

$$S_K = U_{12} - U_{21} \frac{P_2}{P_1} = U_{12} - U_{21} K, \quad (3.6)$$

де  $K = P_2/P_1$  – коефіцієнт компресії або ступінь стиснення.

Швидкість відкачування одного пазу невелика, тому у реальних насосах паралельно працюють 40-60 таких пазів, розташованих на одному роторному колесі та встановлено декілька роторних коліс.

Коефіцієнт компресії  $K$  суттєво залежить від роду газу. У загальному вигляді коефіцієнт компресії  $K$  газу в турбомолекулярному насосі виражається наближеною формулою

$$K \sim e^{q n v_p \sqrt{\mu}}, \quad (7.36)$$

де  $q$  – геометричний фактор, залежний від кута нахилу пазу, його довжини і ширини та ін.,  $n$  – кількість пазів,  $v_p$  – лінійна швидкість ротора,  $\mu$  – молекулярна маса газу.

З даної залежності випливає два важливих висновки:

- ступінь стиснення може бути збільшена за рахунок збільшення лінійної швидкості ротора  $v_p$ ;
- ступінь стиснення змінюється зі зміною  $\mu$  відкачуваного газу.
- Для більшості ТМН ступінь стиснення по водню становить  $10^3$ - $10^4$ , по азоту  $10^8$ - $10^{10}$ , а для газів з  $\mu \sim 100 - 10^{12}$ - $10^{15}$ .

### 3.3. Конструктивні особливості турбомолекулярних насосів

Вперше ТМН був описаний Беккером у 1958 р. Перші ТМН по Беккеру були серійно виготовлені у 1960 році фірмою „Balzers”, Ліхтенштейн). Схематично відкачна система перших ТМН представлена на рис. 3.3. Вона складається з роторних (рухомих) і статорних (нерухомих) дисків, у яких були зроблені пази (як на рис. 3.2).

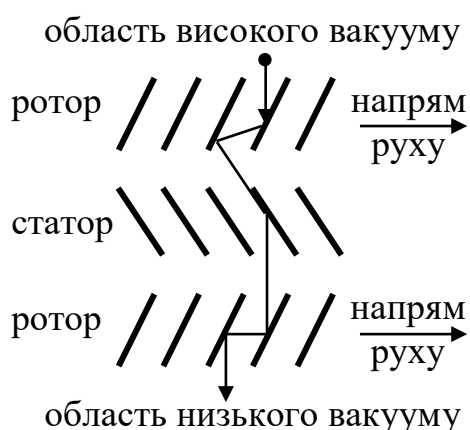


Рис. 3.3. Схематичне зображення роторних і статорних пазів перших ТМН Беккера

При обертанні ротора навколо своєї вісі газовий потік, створюваний пазами, був перпендикулярним вектору лінійної швидкості твірних пазів (на рис. 3.3 – згори вниз). Дзеркальність роторних і статорних пазів зменшувала ймовірність оберненого проникнення газових молекул. У перших конструкціях ТМН (рис. 3.4) вісь обертання ротора була

горизонтальною, а роторні (1) і статорні (2) пластини розташовувалися вертикально. Вал ротора закріплювався у двох підшипниках (3) і обертався зі швидкістю 10000 об/хв. Така схема одержала назву двохпотокової (або горизонтальної), бо газовий потік розділявся на два потоки, які відкачувалися двома симетричними пакетами роторних і статорних пластин.

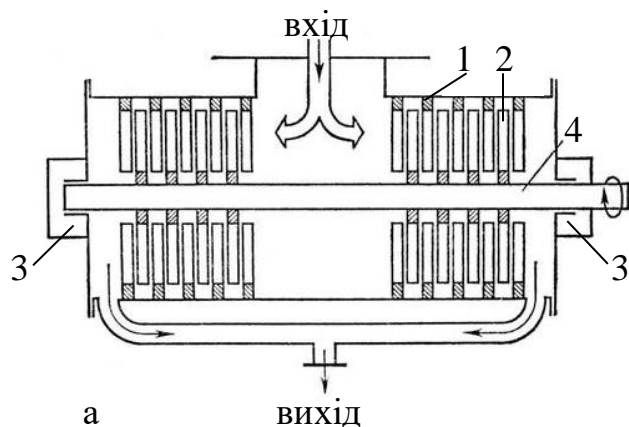


Рис. 3.4. Схематичне зображення (а) та зовнішній вигляд (б) перших ТМН Беккера: 1 – статорні пластини; 2 – роторні пластини; 3 – підшипники; 4 – вал ротора

Оскільки ступінь стиснення газу кожною парою пластин ротор-статор невелика, а тому і обернений газовий потік незначний, то зазори між роторними пластинами і статором були зроблені значно більшими (~ 1 мм) проти 0,1-0,15 мм у молекулярних насосах Геде. Це дозволило обертати ротор з набагато більшими швидкостями не боячись заклинювання, і в цілому спрощувало вимоги до точності виготовлення пари роторна-статорна пластина. У перших насосах для забезпечення коефіцієнта стиснення в цілому  $10^7$  розташовувалося до 40 ступенів відкачувальних пар (пластин ротор-статор). Це значно ускладнювало як конструкцію насоса в цілому, так і вимагало складного балансування ротора. Уже перші ТМН, які виготовлялися фірмою «Balzers», забезпечували швидкості відкачування в діапазоні 100-4000 л/с при ступені стиснення  $10^9$  для азоту і  $10^3$  для водню. Таким чином, працюючи сумісно з форвакуумними насосами, що забезпечували відкачування ТМН до 1 Па, у вакуумній системі за допомогою ТМН можна одержувати надвисокий вакуум  $10^{-8}$  Па. Характерною особливістю такого вакууму є те, що в системі залишаються лише легкі гази ( $H_2$ , He). Оскільки максимальне стиснення відповідає газам з важкими молекулами, пари масел з форвакуумного масляного насоса, підшипників ТМН не проникають у систему, так що ТМН дозволяють одержувати вакуум без слідів важких вуглеводів і тому відпадає необхідність у використанні уловлювачів з охолодженням рідким азотом.

Трохи пізніше в конструкції ТМН з'явилася ідея використати замість коліс, що обертаються навколо горизонтальної осі, лопатки-пропелери, що обертаються навколо вертикальної осі (рис. 3.5). Деякий час ці дві різні конструкції робочих колес ротора і статора конкурували. Розрахункові роботи Крюгера і Шапіро дозволили створити лопатки, які більш ніж у 10 разів ефективніші дисків. У результаті кількість відкачувальних секцій (ротор-статор) вдалося зменшити у два рази при тих же параметрах, що й у базовій конструкції Беккера.



*Рис. 3.5. Зовнішній вигляд роторного колеса з лопатками сучасного ТМН*

Промисловий випуск лопаткових ТМН почала фірма «Leuybold-Heraus» на початку 70-х років минулого століття. Профілі лопаток всіх насосів практично подібні. Вони мають змінну товщину і закручені під певним кутом (рис. 3.5).

Іноді ТМН називають горизонтальними або двопотоковими і вертикальними або однопотоковими, маючи на увазі просторове розташування вісі обертання ротора. Для сучасних насосів така класифікація не має змісту у зв'язку з тим, що сучасні ТМН можуть працювати при будь-якому розташуванні вісі обертання ротора у просторі.

Приблизно 20 років однопотокові і двопотокові насоси конкурували один з одним на світовому ринку. У решті решт користувачі однозначно вирішили це питання на користь однопотокових ТМН, чому значно сприяло те, що однопотокові насоси перестали бути вертикальними і можуть працювати при будь-якій орієнтації в просторі.

В сучасних однопотокових ТМН використовується так званий «магнітний» підвіс ротора, коли ротор повністю утримується в робочому стані за допомогою магнітного поля, створюваного складною системою магнітів. Такий «магнітний» підвіс також забезпечує роботу насоса при

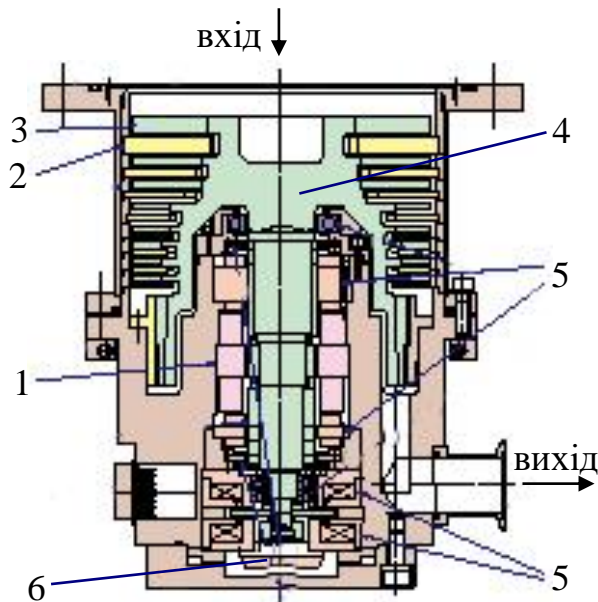


Рис. 3.6. Схематичне зображення ТМН з «магнітним» підвісом ротора:

- 1 – високочастотний двигун;
- 2 – статорна пластина;
- 3 – роторна пластина;
- 4 – ротор;
- 5 – магнітний підвіс;
- 6 – опорний підшипник

великою кількістю сенсорних індуктивних датчиків. З розвитком мікроелектроніки ця проблема була вирішена і блоки живлення таких насосів стали невеликими і повністю автоматизованими.

У якості приводів ТМН використовуються два типи електродвигунів – високошвидкісні асинхронні двигуни і безколекторні електродвигуни постійного струму. І одні, і другі двигуни мають свої переваги і свої недоліки, але в обох випадках ротор насоса є конструктивним продовженням ротора двигуна і обертається з тією ж частотою. Для більшості сучасних ТМН лінійна швидкість лопаток ротора становить (250-450) м/с при швидкостях обертання ротора насоса (ротора електродвигуна) від 14000 об/хв до 75000 об/хв і навіть 90000 об/хв. Такі конструкції забезпечують питому швидкість відкачування до 4,5 л/с з кожного см<sup>2</sup> активного поперечного перерізу вхідного фланця насоса.

довільному розташуванні вісі обертання його ротора. У насосі встановлені підшипники сухого тертя, на які ротор сідає при зупинці насоса та аварійному відключенні живлення. Схематично такий насос представлений на рис. 3.6. Основна перевага такого підвісу – майже повна відсутність вібрацій, відсутність деталей, що труться, і відповідно мале тепловиділення (відсутність водяного охолодження). Недоліком таких насосів була досить складна і громіздка система управління, бо контроль положення ротора в магнітних опорах забезпечується

Крильчатку ротора (рис. 3.5) у більшості випадків виготовляють зі спеціальних алюмінієвих сплавів. Корпуси насосів можуть прогріватися до 120 °С для знегажування. Насоси зі швидкостями відкачування від декількох десятків до декількох сотень л/с, як правило, охолоджуються повітрям (з обдуванням або без нього), корпуси ж великих насосів охолоджуються проточною водою.

Усі фірми, що виготовляють ТМН, комплектують їх і блоками живлення на базі електричних перетворювачів частоти. Блоки забезпечують автоматичні вихід двигуна ТМН на робочу частоту обертання та контроль за його роботою.

### 3.4. Гібридні конструкції турбомолекулярних насосів

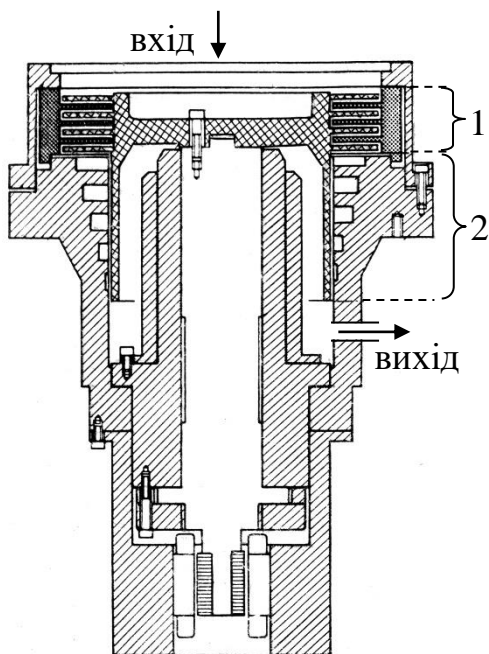


Рис. 3.7. Схематичне зображення першого гібридного насоса фірми «Alcatel»:

- 1 – турбінна ступінь;
- 2 – молекулярна ступінь

Усі розглянуті вище ТМН правильніше було б назвати турбонасосами (деякі фірми-виробники так їх і називають), бо відкачувальним елементом таких насосів є турбінні лопатки. У 1974 році французька фірма «Alcatel» випустила однопотоківий насос оригінальної конструкції (рис. 3.7), який дійсно був турбомолекулярним – в одному корпусі на одному валу синхронно працювали дві відкачувальні ступені: високовакуумна турбінна ступінь і низьковакуумна – молекулярний насос Холвека. Насос Холвека був молекулярним насосом,

утвореним спіральним пазом шириною від 30 до 100 мкм. У вхідній (звернутій до відкачуваного об'єкта) частині насоса знаходилася 4-ступенева турбінна частина (1) насоса діаметром 20 см, ротор якої обертася зі швидкістю 24000 об/хв і забезпечував швидкість відкачування по азоту біля 450 л/с. У вихідній (під нею) частині насоса знаходилася молекулярна



ступінь (насос Холвека з 5-и спіральних канавок) (2), який забезпечував форвакуумне відкачування зі швидкістю 0,05 л/с і додаткове стиснення для азоту  $10^6$ , гелію  $2,5 \cdot 10^3$  і водню  $5 \cdot 10^2$ . Це дозволяло такому насосу працювати безпосередньо з вихлопом у атмосферу, забезпечуючи у високовакуумній його частині розрідження до  $10^{-8}$  Тор при загальному коефіцієнті стиснення для азоту  $10^{11}$ . Окрім цих особливостей даний насос працював при довільній орієнтації в просторі.

Незважаючи на складність виготовлення гібридних ТМН (прецизійні зазори у молекулярній частині насоса), ідея поєднання турбінного і молекулярного насосів для суттєвого збільшення допустимого форвакуумного тиску реалізована всіма провідними розробниками ТМН. Ряд фірм, підкреслюючи наявність молекулярного насоса у складі ТМН, до назви насоса додають слово «drag», розділяючи чисто турбінні насоси – «Turborumps» і гібридні (турбіна + молекулярний насос) – «Turbodragrumps». Один з провідних світових виробників вакуумної техніки, фірма «Varian» (США), починаючи з 1991 року випускає більшість ТМН, у яких нижні ступені відкачування є молекулярні насоси Геде (насоси типу «MacroTorr») [11].

### **3.5. Основні характеристики сучасних турбомолекулярних насосів**

Об'єми випуску ТМН на початок 21 століття перевершили об'єми випуску всіх інших вакуумних насосів і зараз ТМН відносяться до високоефективних засобів одержання високого вакууму, що найбільш динамічно розвиваються. Діапазон швидкостей відкачування сучасних ТМН лежить в межах від декількох десятків л/с і до 10000 л/с, а граничний вакуум – до  $10^{-8}$  Па.

Починаючи з 70-х років 20 століття розвиток таких областей науки, техніки і виробництва, як напівпровідникова електроніка, техніка одержання тонких плівок, техніка керованого термоядерного синтезу і прискорювачів елементарних частинок, нанотехнології та ін. висунув ряд вимог (часто несумісних між собою) до відкачувальних засобів (вакуумних насосів у першу чергу), яким найбільш повно задовольняють саме ТМН.

На рис. 3.8 представлено ряд ТМН одного з провідних виробників вакуумних насосів – фірми «Varian» (США), – починаючи з найменших Turbo-V70 (найменші за розміром насоси у лівій нижній частині рисунка) зі швидкістю відкачування 40-60 л/с у залежності від модифікації, граничним вакуумом  $10^{-9}$  Тор і масою насоса біля 4 кг, і закінчуючи насосом з великою швидкістю відкачування до 6000 л/с (права верхня частина рисунка) типу Turbo-V6000 з граничним вакуумом  $7,5 \cdot 10^{-11}$  Тор і масою 282 кг [11].



*Рис. 3.8. Лінійка ТМН фірми «Varian»*

Характерною особливістю ТМН є практично незмінне значення швидкості дії у широкому діапазоні тисків від  $10^{-8}$  і до  $10^{-2}$  Па. Використання комбінованих „Turbodragrumps” насосів дозволяє досягати майже у 10 разів вищу ступінь стиснення для всіх газів у форвакуумній області тисків (10-100) Па і внаслідок цього дає можливість використовувати для форвакуумного відкачування простіші механічні насоси.

Як правило, кожна фірма має біля 10 базових моделей з різною швидкістю відкачування і модифікує їх у залежності від потреб конкретного замовника (агресивні гази, радіоактивні гази та ін.). Ресурс сучасного ТМН визначається ресурсом опорної системи (підшипники і система змащування підшипників і при використанні консистентних мастил і керамічних підшипників його вдалося за останні 10-15 років продовжити до 20000 годин неперервної роботи.

Всі відомі фірми-виробники ТМН мають свої сторінки у мережі Internet, що робить інформацію про їх продукцію доступною для будь-якого користувача.

## **Розділ 4. Магнітні електророзрядні насоси для одержання високого вакууму [4, 5, 6, 8, 10]**

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

Магніторозрядні насоси є іонно-гетерними насосами з іонним розпиленням гетерної речовини при збудженні електричного газового розряду у схрещених електричному і магнітному полях. Такі насоси можуть мати діодну або тріодну електродні схеми.

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

### **4.1. Механізм відкачування магніторозрядного насоса**

Початок історії розвитку магніторозрядних насосів поклали роботи Пеннінга з дослідження фізики високовольтного газового розряду в магнітному полі (1937 р.). Електродна система «кільцевий анод – два дискові катоди» була запатентована ним як вакуумний насос («відкачна комірка Пеннінга») і стала прототипом сучасних магніторозрядних насосів.

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

Відкачна комірка Пеннінга, схематично зображена на рис. 4.1 а, утворюється трьома елементами – циліндричним пустотілим анодом (1) і двома катодними пластинами (2), розташованими в торцях анода. Між анодом та катодами прикладається різниця потенціалів до 10 кВ, а вся комірка розташовується в постійному магнітному полі індукцією  $B$  близько 0,1 Тл, спрямованому вздовж вісі анода, як показано на рис. 4.1 а.

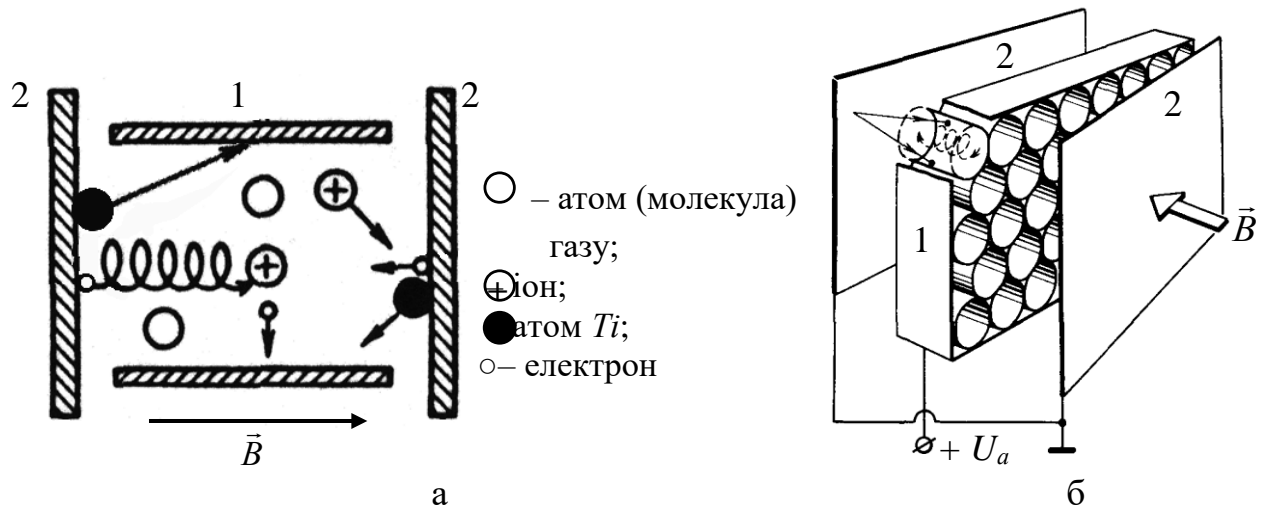


Рис. 4.1. Схематичне зображення робочих елементів діодного магніторозрядного насоса: а – комірка Пеннінга; б – відкачна секція; 1 – циліндричний анод; 2 – пластинчастий катод (катодна пластина)

Окремі аноди (анодні комірки) сучасних діодних магніторозрядних насосів (НМД) без охолодження виготовляються з тонкої листової нержавіючої сталі. Вони можуть мати в перерізі круглу, (рис. 4.1 б) квадратну або іншу форму правильного багатогранника. У насосах з охолодженням анода проточною водою (насоси типу НМДО) аноди виготовлені з товстих мідних пластин, у яких висвердлені круглі отвори (комірки). На рис. 4.2. подані фотографії анодів насосів НМД(а) та НМДО (б). Насос НМД має анодні комірки з тонкої листової нержавіючої сталі, а насос НМДО має анодні комірки в мідній пластині, яка охолоджується водою, що протікає через припаяну до пластини трубку.

Анодні комірки мають діаметр  $d = 10-30$  мм і довжину  $l = 10-20$  мм за ширини зазору між торцем анода і катодною пластиною 3-7 мм.

Кількість анодних комірок визначає величину швидкості відкачування насоса в цілому і в потужних насосах досягає кількох тисяч. Катодні пластини мають товщину 1-2 мм і виготовляються з титану. Існують також диференціальні катоди, коли один катод виготовлений з Ті, а другий з Та чи Mg.

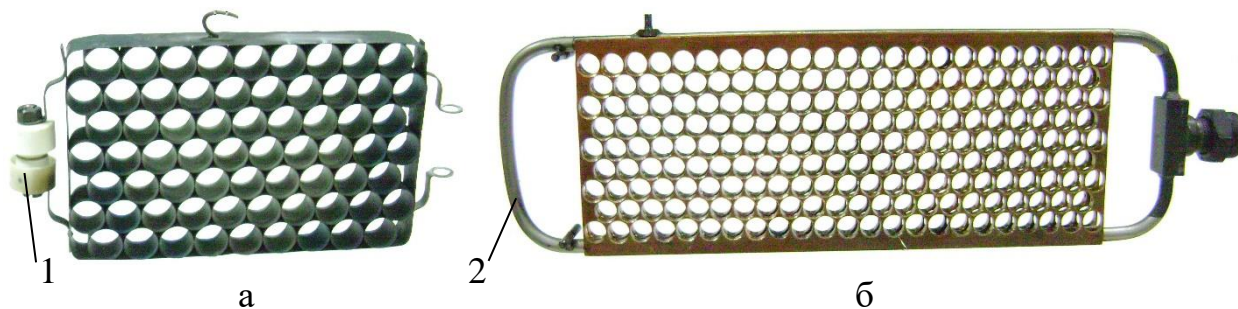


Рис.4.2. Аноди насосів НМД (а) та НМДО (б): 1– ізолятор; 2 – трубка водяного охолодження

Коли комірку Пеннінга (рис. 4.1 а) помістити у вакуум  $1 \cdot 10^{-1}$  Па і прикласти між анодом і катодами постійну напругу в кілька кіловольт, то в ній запалюється електричний розряд і між анодом та катодами проходить електричний струм. Розряд супроводжується свіченням газового проміжку. Причиною появи розряду є іонізація нейтральних атомів і молекул газу вільними електронами, які з'явилися там внаслідок холодної емісії з катодів, дії космічного випромінювання та при розвалюванні деформованих сильним електричним полем газових молекул при їх зіткненнях одна з одною.

Вільні електрони у схрещених електричному і магнітному полях починають здійснювати складні коливальні рухи між катодами, при цьому вони прискорюються, і при стиканні з нейтральними атомами і молекулами газу збуджують і іонізують їх. Таким чином, у комірці Пеннінга з'являються додатні газові іони та вторинні електрони. У результаті цього в порожнині анодної комірки формується самостійний газовий розряд (розряд Пеннінга), який існує до розріджень  $10^{-9}$ - $10^{-11}$  Па. Розряд Пеннінга має надзвичайно високу ефективність іонізації залишкових газів. Так, для іонізації одного атома азоту потрібний лише один електрон, що протікає в зовнішньому колі, для іонізації одного атома кисню – два таких електрони.

Додатні газові іони, утворені в порожнині анода, рухаються прискорено до поверхні титанового катода і, бомбардуючи її, вибивають з її поверхні один або кілька атомів Ti (розпиляють катод), як показано на рис. 4.1 а. Значна частина розпилених атомів Ti осідає на поверхні аноду, утворюючи плівку Ti, що неперервно відновлюється (наростає). Активні гази хемосорбуються нею і «замуровуються» в її товщі атомами Ti, що осідають. З іншого боку, газові іони, що бомбардують поверхню катода, можуть також і розчинятись у його об'ємі. Усе це разом зумовлює зменшення кількості газових молекул у порожнині такої комірки, тобто вона стає поглинальним (гетерним) насосом.

Таким у загальних рисах є механізм відкачування газів коміркою Пеннінга. Цілком зрозуміло, що як швидкість відкачування, так і кількість поглинутого газу однією коміркою Пеннінга є досить малими. Але, об'єднуючи в анодні відкачні секції десятки, сотні і навіть тисячі таких комірок (рис. 4.1 б; рис. 4.2) зі спільними катодами, можна одержати практично будь-які швидкості відкачування.

Більшість газів, які утворюють атмосферне повітря ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ) є хімічно активними й відкачуються плівкою титану внаслідок хемосорбції з утворенням термічно стійких сполук – нітридів, оксидів, карбідів та гідридів титану з температурами розкладання 1500-3000 °С. Тому поглинання цих газів у насосі має незворотний характер. Складні гази (вуглеводні, водяна пара та ін.) в електричному розряді дисоціюють на більш прості складові, які, у свою чергу, іонізуються й відкачуються. Титан і водень добре реагують один з одним з утворенням гідридів  $TiH_2$  та псевдогідридів  $TiH_x$ .

Інертні гази не хемосорбуються гетерним матеріалом. На поверхні гетера вони утримуються у фізично сорбованому стані слабкими силами Ван-дер-Вальса. Певна частина іонів інертних газів у результаті удару об катод нейтралізується і, відбившись від його поверхні, потрапляє на анод. За незначний час знаходження на поверхні аноду вони можуть бути «замуровані» в титановій плівці атомами Ti, що падають. Частина іонів

атомів інертних газів залишається на поверхні катода і може як випаруватися з неї так і дифундувати в його товщу. Та частина атомів, що дифундували в товщу катода, може бути звільнена внаслідок постійного розпилення його поверхні, але оскільки інтенсивно розпилюється лише невелика ділянка катодної пластини напроти центра анодної комірки (близько 20% поверхні катода взагалі не підлягає розпиленню), то певна кількість атомів інертних газів все ж таки утримується катодними пластинами.

Обидва ці механізми забезпечують порівняно невелику швидкість відкачування інертних газів магніторозрядними насосами, проте мала їх кількість у складі повітря (Ar – 0,93%, Ne –  $5 \cdot 10^{-4}\%$ ) дозволяє цими насосами у більшості вакуумних систем одержувати високий вакуум.

Усі викладені вище міркування говорять про те, що магніторозрядні насоси мають значну селективність (вибірковість) відкачування. У табл. 4.1 наведені значення швидкості дії магніторозрядних насосів для різних газів (відносно азоту).

*Таблиця 4.1.*

**Відносні значення швидкості дії діодних магніторозрядних насосів з титановими катодами для різних газів [4,8]**

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

Як видно з табл. 4.1, швидкості дії для важких інертних газів у сотні разів менші за швидкості відкачування азоту. Унаслідок цього залишкова атмосфера магніторозрядних насосів є завжди збагаченою інертними газами.

Незважаючи на значний прогрес, досягнутий у побудові фізичних і математичних моделей роботи магніторозрядних насосів, повної закінченої

теорії роботи таких насосів ще не створено. Не існує, відповідно, і методик теоретичних розрахунків насосів. Це пояснюється складністю численних процесів, що відбуваються в розряді, існуванням різних форм розряду, які відрізняються величиною та розподілом об'ємних зарядів у комірці Пеннінга. Мало вивчені і процеси іонізації залишкових газів залежно від зміни їх тиску. Існуючі методи розрахунку конструктивних параметрів насосів є переважно емпіричними [8].

Основним фактором, який визначає вакуумні параметри насоса, є швидкість розпилення катодного матеріалу. Вона залежить від енергії і кількості іонів, що бомбардують катод. Енергія іонів визначається різницею потенціалів між анодом і катодом, а кількість іонів – концентрацією молекул залишкового газу та величиною розрядного струму. Цікаво, що відношення величини розрядного струму  $I_p$  до тиску  $P$  у насосі є сталою величиною у широкому діапазоні тисків. Таким чином, при зменшенні тиску в насосі пропорційно зменшується і струм розряду, це може бути використаним для вимірювання тиску в насосі за величиною розрядного струму.

Величина розрядного струму  $I_p$  через окрему комірку Пеннінга є складною функцією багатьох геометричних і фізичних параметрів

$$I_p = f(d_a, l_a, Z_{ак}, B, U_a, P, \text{вид газу}), \quad (4.1)$$

де  $d_a$  і  $l_a$  – діаметр і довжина анодної комірки відповідно;

$Z_{ак}$  – віддаль між анодом і катодом;

$B$  – індукція магнітного поля;

$U_a$  – різниця потенціалів між анодом і катодом;

$P$  – тиск залишкових газів.

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

$$S \sim I_p/P. \quad (4.2)$$



Для розрахунку швидкості відкачування  $S_1$  для азоту ( $N_2$ ) однією коміркою можна скористатися найпростішою наближеною емпіричною формулою [8] (існує кілька емпіричних формул різної складності)

$$S_{1N_2} \approx 1,5 \cdot 10^7 B^2 d_a^2 l_a, \text{ л/с}, \quad (4.3)$$

де  $S_{1N_2}$  – швидкість відкачування однією коміркою для  $N_2$ ;

$$B = 0,1-0,2 \text{ Тл};$$

$$d_a = 1 \cdot 10^{-2}-5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; l_a = 0,5 \cdot 10^{-2}-3 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Швидкості відкачування інших газів однією коміркою  $S_1$  можна розрахувати, користуючись даними табл. 4.1.

У реальних магніторозрядних насосах електродний відкачувальний блок (рис. 4.1 б) складається з  $n$  комірок, з'єднаних паралельно під одним і тим же самим потенціалом. У такому випадку за умови однакового доступу до них молекул газу швидкість відкачування  $n$  комірок становить

$$S_n = nS_1. \quad (4.4)$$

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

$$S_{ef} = kS_n, \quad (4.5)$$

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

Як правило, магніторозрядний насос має  $N$  електродних відкачних блоків (від 1 до 10), розташованих у спеціальних «карманах» симетрично відносно вхідного отвору в насос. У цьому випадку швидкість дії всього насоса  $S_n$  розраховується [4. 8] за співвідношенням

$$\frac{1}{S_i} = \frac{1}{NS_{\hat{a}\hat{o}}} + \frac{1}{U_{\hat{e}}}, \quad (4.6)$$

де  $U_k$  – провідність між «карманом» з електродним блоком та вхідним отвором у насос.

Сучасні серійні магніторозрядні насоси мають швидкості дії від кількох л/с до 1000 л/с. Насоси зі швидкістю дії  $10^4$  л/с і більше є унікальними і виготовляються за спеціальними замовленнями.

Типова залежність швидкості дії магніторозрядного насоса від тиску при відкачуванні повітря у вигляді графіку подана на рис. 4.3 [11].

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

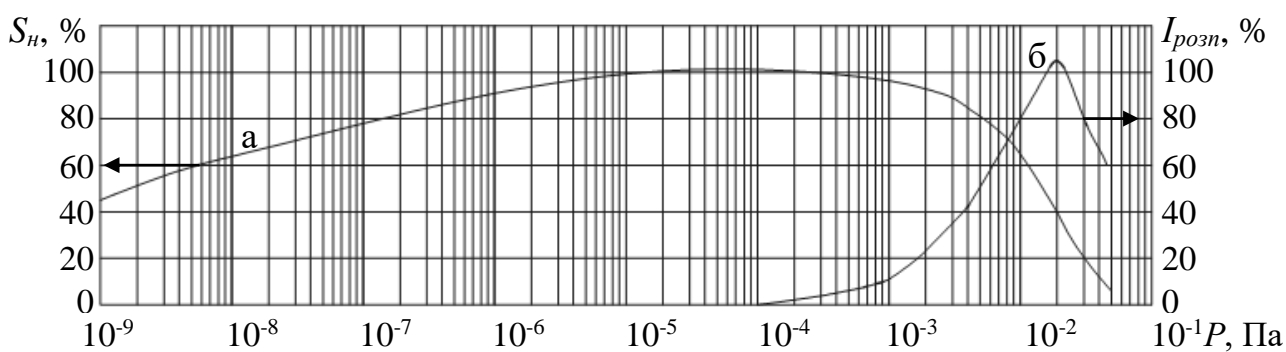
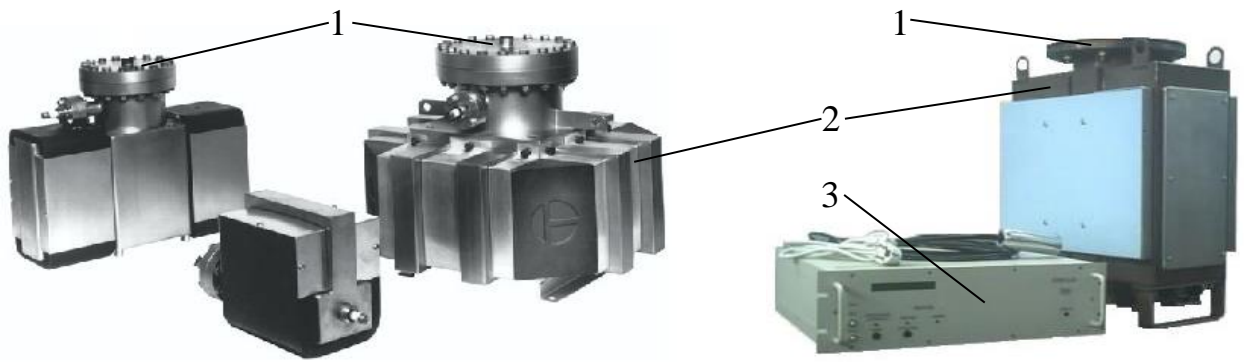


Рис. 4.3. Залежність швидкості дії  $S_n$  магніторозрядного насоса для повітря (а) та залежність інтенсивності розпилення  $I_{розп}$  катодів насоса (б) від тиску газу

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

## 4.2. Конструктивні особливості магніторозрядних насосів

За більш ніж піввікову історію свого розвитку всі виробники магніторозрядних насосів прийшли до їх практично однакових конструкцій (рис. 4.4).



*Рис. 4.4. Зовнішній вигляд магніторозрядних насосів різних виробників з різною швидкістю відкачування: 1 – вхідний фланець; 2 – корпус насоса; 3 – блок живлення насоса*

Насоси зі швидкістю дії  $S_n = 100-300$  л/с, як правило, мають прямокутний корпус (рис. 4.4, рис. 4.6), у верхній частині якого знаходиться приєднувальний вхідний фланець (1). У бокових стінках корпусу зроблені кармани, у яких розміщені відкачувальні блоки, аналогічні зображеним на рис. 4.1 б та рис. 4.2. Магнітне поле створюється в карманах плоскими постійними магнітами, які розташовані зовні корпусу насоса і можуть легко зніматися при прогріванні корпусу до 300-400 °С.

Корпуси насосів виготовляються з листової немагнітної нержавіючої сталі завтовшки 2-4 мм залежно від розмірів насоса. Живлення відкачувальних блоків здійснюється від спеціальних електронних блоків. Висока напруга передається в насос через високовольтний металокерамічний струмоввід. Ізолювання анода від катодів забезпечується керамічними ізоляторами, які одночасно виконують і функції механічних з'єднувальних елементів (рис. 4.2 а). Залежно від величини швидкості дії насоса в його корпусі розміщують кілька відкачувальних блоків. У великих насосах з  $S_n = 500-1000$  л/с кармани з відкачувальними блоками розміщуються радіально відносно вхідного патрубку (рис. 4.4).

Оскільки швидкість дії магніторозрядних насосів для важких інертних газів (аргон, криптон, ксенон) становить лише кілька процентів швидкості дії для азоту (табл. 4.1), то було запропоновано низку конструктивних рішень, направлених на покращання ефективності їх відкачування [4, 7, 8, 10].

Строк служби магніторозрядних насосів здебільшого визначається ресурсом катодів, оскільки ерозія анодів при бомбардуванні їх електронами є незначною. За товщини титанових пластин-катодів 1,5-2 мм і робочих тисків менших за  $1 \cdot 10^{-4}$  Па ресурс катодів становить близько 50 000 год. За більших тисків (особливо у стартовому режимі при  $P \approx 1$  Па (рис. 4.3)) відбувається значне руйнування катодних пластин. Заміна катодних пластин на нові та очищення анодних комірок від напиленого титану дозволяє експлуатувати насос багато років. Тому у більшості магніторозрядних насосів відкачувальні блоки (анод-католи) виконуються розбірними і зйомними без механічного розбирання корпусу насоса.

### 4.3. Електричне живлення магніторозрядних насосів

Для живлення магніторозрядних насосів використовуються випрямлячі з напругою до 7 кВ із заземленим «мінусом» (НМД) або заземленим «плюсом» (НМДО). Особливістю їх роботи є те, що потужність, яка підводиться до насоса, змінюється в сотні разів у процесі роботи насоса. На залежності швидкості дії насоса від тиску (рис. 4.3. крива (а)) має місце значний спад швидкості дії за високих тисків  $P > 10^{-2}$  Па. Робота насоса в цій області тисків характеризується великим струмом розряду й малою різницею потенціалів між анодом і катодом та їх нагріванням. Унаслідок розігрівання електродів відкачних блоків й обумовленого ним значного газовиділення з поверхонь електродів напруга розряду за таких режимів (запуск насоса) становить усього 200-600 В. При цьому електричний опір газового розрядного проміжку в насосі становить менше 100 Ом. Струм через насос за такого опору різко зростає й виникає загроза перетворення тліючого розряду між анодом і катодом у неконтрольований дуговий розряд. Оскільки за такої напруги енергія іонів у розряді є дуже малою, то й швидкість дії насоса в цілому різко зменшується (права частина кривої (а)  $S_n(P)$  на рис. 4.3). У цьому режимі має місце також велика швидкість розпилення катодів (крива (б)  $I_{розн}(P)$  на рис. 4.3). З покращенням вакууму в насосі розрядний струм зменшується до кількох мікроампер, а напруга зростає до максимального значення. Таким чином, в електричному відношенні насос являє собою

навантаження, опір якого змінюється в межах від кількох десятків Ом до десятків МОм, а тому блок живлення повинен мати не просту лінійну вольт-амперну характеристику, а складну нелінійну. Унаслідок цього блоки живлення магніторозрядних насосів є досить складними.

Для обмеження розрядного струму в стартовому та перехідному режимах роботи насоса джерела живлення мають захист за величиною анодного струму – при струмах більших, ніж заданий, блок живлення автоматично вимикається. захист автоматично спрацьовує і вимикає насос.

Захист автоматично спрацьовує і вимикає насос також і під час короткочасних стрибків розрядного струму, викликаного, наприклад, явищем «аргонової нестабільності».

Блоки живлення мають прилади для вимірювання струму розряду й високої напруги між анодом і катодом та електронні системи блокування й захисту від перевантаження.

Підсумовуючи все вищесказане, можна вказати такі переваги та недоліки магніторозрядних насосів.

**Переваги:** широкий діапазон робочих тисків; здатність тривалий час стабільно відкачувати практично всі гази та підтримувати в герметично закритому насосі у вимкненому стані тривалий час високий вакуум; відсутність органічних забруднень відкачуваної системи; величезний ресурс роботи; стійкість до несприятливих зовнішніх впливів – вібрацій, аварій з енергоживленням, аварійного потрапляння атмосферного повітря; відсутність постійного форвакуумного відкачування; відсутність водяного охолодження; мала споживана потужність; можливість контролю розрідження за розрядним струмом; простота обслуговування; сумісність з автоматизованими системами управління. Ці та деякі інші переваги зробили магніторозрядні насоси високоефективними засобами відкачування великої кількості високовакуумних установок, приладів та обладнання.

До **недоліків** магніторозрядних насосів необхідно віднести значну селективність відкачування різних газів, чутливість до органічних забруднень, необхідність високовольтного живлення, велику масу у перерахунку на одиницю швидкості дії.

На рис. 4.5 зображені магніторозрядні насоси одного з провідних світових вакуумних виробників – фірми «Varian» (США) [11]. Найменший насос *Vaclon Plus 20* має швидкість відкачування 20 л/с масу 5-7 кг в залежності від типу магнітів і охолоджується оточуючим повітрям, найбільший *Vaclon Plus 500* має швидкість відкачування 500 л/с, масу 120 кг і охолоджується проточною водою.



*Рис.4.5. Магніторозрядні насоси фірми «Varian»*

За останні 15-20 років у конструкціях магніторозрядних насосів провідних світових виробників істотних змін не відбулося. Значно змінилися лише електронні блоки їх живлення (завдяки величезному прогресу в галузі сучасної елементної бази електронної техніки). Маса й розміри блоків живлення зменшилися в десятки разів порівняно з блоками живлення 70-80-х років.

## Розділ 5. Конструкції сучасних високовакуумних систем

### 5.1. Високовакуумні системи на основі дифузійного насоса

Історично першими вакуумними системами для одержання високого вакууму були вакуумні системи з дифузійними парортутними (паромасляними) насосами та ротаційними (обертальними) насосами попереднього вакууму (форвакуумними насосами). Типова принципова схема вакуумної системи з такими насосами наведена на рис. 5.1 [4, 5, 9].

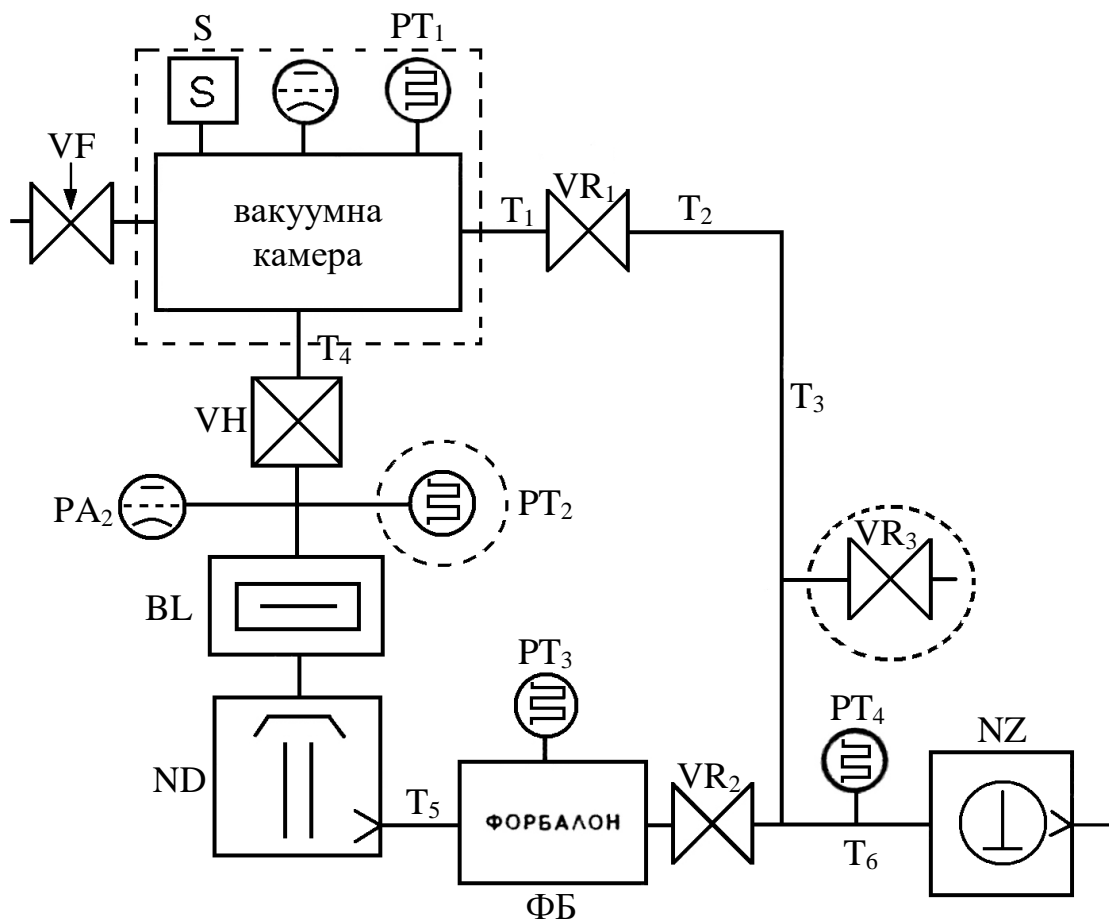


Рис. 5.1. Принципова схема типової вакуумної системи з дифузійним паромасляним насосом високого вакууму

З'єднання всіх елементів у вакуумну систему може виконуватися за допомогою як гумових, так і металевих ущільнювачів. Розглянемо, як працює система. Першим запускається форвакуумний насос NZ при всіх закритих вентилях і затворах. За допомогою низьковакуумного (теплового) манометричного перетворювача  $PT_4$  контролюється розрідження, яке

створює форвакуумний насос, працюючи «сам на себе». Якщо насос працює справно й покази вакуумметра датчика  $PT_4$  відповідають його паспортному розрідженню, продовжувати створення попереднього вакууму в системі можна двома шляхами – або створити попередній вакуум у вакуумній камері через байпасний трубопровід  $T_2-T_3$  з вентилям  $VR_1$ , або створити попередній вакуум у дифузійному насосі  $ND$  та форвакуумному балоні  $ФБ$ .

Якщо вакуумна камера підготовлена до відкачування (у ній виконані всі підготовчі роботи для проведення необхідного технологічного процесу у високому вакуумі), краще створити попередній вакуум близько  $1\text{ Па}$  спочатку в ній (через байпасний трубопровід  $T_2-T_3$ , відкривши вентиль  $VR_1$ ) і контролювати ступінь розрідження у вакуумній камері за допомогою манометричного перетворювача  $PT_1$ . Після цього вентиль  $VR_1$  закривається, відкривається вентиль  $VR_2$  і починається відкачування до попереднього вакууму форвакуумного балона  $ФБ$  та дифузійного насоса  $ND$  разом з уловлювачем  $ВЛ$ . Вимірювання вакууму здійснюється за допомогою перетворювача  $PT_3$ .

Після одержання необхідного попереднього вакууму в дифузійному насосі вмикається живлення електропечі дифузійного насоса. Після встановлення робочого режиму дифузійного насоса ( $0,5-1$  година залежно від його типу), створене ним розрідження (високий вакуум) можна контролювати високовакуумним перетворювачем  $PA_2$ . Якщо як уловлювач  $ВЛ$  використовується уловлювач з азотною криопанеллю, у нього заливається рідкий азот. Використання уловлювача з азотною криопанеллю дозволяє покращити граничний вакуум у вакуумній камері приблизно на порядок. Після одержання паспортного розрідження дифузійного насоса з уловлювачем (перетворювач  $PA_2$ ) можна, переконавшись (перетворювач  $PT_1$ ), що у вакуумній камері існує необхідне попереднє розрідження близько  $1\text{ Па}$ , відкрити високовакуумний затвор  $VH$  й почати створення в ній високого вакууму. Ступінь розрідження у вакуумній камері контролюється за допомогою високовакуумного перетворювача  $PA_1$ . Як правило, тиск у вакуумній камері після закінчення перехідних процесів становить



$10^{-3}$ - $10^{-4}$  Па. Якщо провести знегажування вакуумної камери за допомогою зовнішнього електричного нагрівника за максимально можливої для неї температури (максимально можлива температура знегажування визначається видом використовуваних ущільнювачів), можна поліпшити вакуум в ній ще приблизно на порядок. Саме в такий спосіб (з використанням металевих ущільнювачів і температур знегажування 200-300 °С) вдається отримувати надвисокий вакуум у системах з дифузійними паромасляними насосами та азотними уловлювачами масляних парів.

Оскільки характерною особливістю роботи дифузійного насоса є те, що на його виході необхідно неперервно підтримувати форвакуумне розрідження, то це потребує й неперервної роботи форвакуумного насоса. У разі аварійного вимикання електричної енергії форвакуумний насос одразу перестає працювати, а дифузійний насос працюватиме ще кілька десятків хвилин завдяки тепловій інертності його електропечі та нагрітого днища. Саме в цей час включається в безпосередню роботу форвакуумний балон. Форвакуумний балон являє собою буферну ємність (об'ємом 10-20 л залежно від швидкості дії дифузійного насоса), яка (у разі зупинки форнасоса) продовжує виконувати його функцію – підтримує на виході з дифузійного насоса необхідне значення попереднього вакууму. Як правило, ємність форбалона підбирається таким чином, щоб дифузійний насос міг нормально працювати разом з ним (без форнасоса) протягом 0,5-1 год.

Наявність форбалона дозволяє також (за закритого вентиля  $VR_2$ ) проводити відкачування через байпасний трубопровід до попереднього вакууму (при закритому високовакуумному затворі  $VH$ ) вакуумної камери, не вимикаючи живлення дифузійного насоса.

За допомогою мас-спектрометра  $S$  у вакуумній камері можна проаналізувати склад її залишкової атмосфери чи контролювати газовиділення при проведенні технологічних процесів.

За допомогою натікача  $VF$  можна напускати у вакуумну камеру необхідні для технологічного процесу газу або напустити повітря (чи інший газ) перед її розгерметизацією.

Вентиль  $VR_3$  (у разі закритих вентилів  $VR_1$  та  $VR_2$ ) дозволяє напускати повітря у форвакуумну магістраль (трубопроводи  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_6$ ) та форнасос після його вимикання (зупинки). Якщо в конструкції форнасоса не передбачена наявність автоматичного клапана, що закриває його вхідний отвір після вимикання живлення його двигуна, то в насос необхідно обов'язково напустити повітря до атмосферного тиску. Інакше масло з форнасоса заповнить трубопроводи  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_6$  та манометричний перетворювач  $PT_4$ . Навіть за наявності автоматичного клапана в разі тривалих перерв у роботі форнасоса в нього бажано напустити сухе повітря.

Принципова схема вакуумної системи, яка зображена на рис. 5.1, може бути (залежно від розмірів вакуумної камери, швидкості дії (розмірів) дифузійних насосів, призначення вакуумної установки) реалізована багатьма конкретними конструкціями.

## **5.2. Вакуумні системи на основі турбомолекулярних насосів [4, 5, 9]**

Вакуумні системи на основі турбомолекулярних насосів (ТМН) майже аналогічні системам з дифузійними та ротаційними насосами. Оскільки сучасні ТМН можуть працювати за будь-якої просторової орієнтації вісі обертання їх ротора, то конструктивно вакуумні установки з ними є більш гнучкими (дифузійні насоси можуть працювати тільки у вертикальному положенні їх корпусу).

ТМН, як правило, неперервно відкачуються ротаційними форвакуумними насосами, таким чином форвакуумна частина вакуумної системи з ТМН аналогічна зображеній на рис. 5.1. Головною відмінністю систем з ТМН є відсутність уловлювача масляних парів між вакуумною камерою й насосом, що обумовлене високим ступенем стиснення важких молекул (фрагментів масел) у ТМН і, відповідно, відсутністю їх зворотного потоку з насоса у вакуумну камеру.

Принципова схема вакуумної системи з ТМН подана на рис. 5.2.

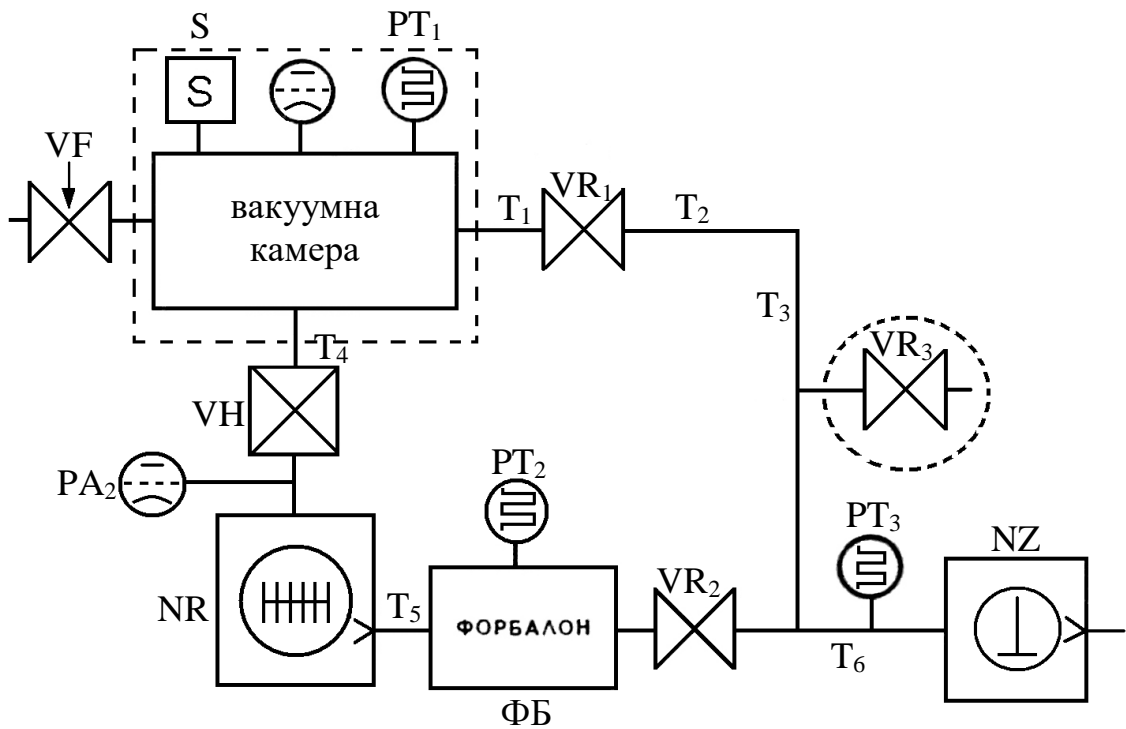


Рис. 5.2. Принципова схема типової високовакуумної системи з турбомолекулярним насосом

Призначення всіх елементів вакуумної системи (рис. 5.2) аналогічне їх призначенню в системі з дифузійним паромасляним насосом (рис. 5.1). Аналогічним є й порядок одержання високого вакууму у вакуумній камері – створення попереднього вакууму у вакуумній камері через байпасний трубопровід  $T_2$ - $T_3$  форвакуумним насосом NZ, створення попереднього вакууму в турбомолекулярному насосі NR та його підтримування на виході з ТМН за допомогою форбалона ФБ. Вимоги до вентиля  $VR_2$  є такими ж самими, як і у випадку вакуумної системи з дифузійним насосом, бо ротор ТМН у разі аварійного відключення електроенергії продовжує обертатися ще кілька десятків хвилин за інерцією.

Основним недоліком ТМН є порівняно низький ступінь стиснення для водню, що зумовлює значний парціальний тиск водню у складі залишкової атмосфери. За необхідності кількість водню у складі залишкової атмосфери можна значно зменшити, використавши у вакуумній системі відкачування вакуумної камери, крім ТМН дифузійного або якогось з електрофізичних насосів. Найкращим варіантом вирішення цієї проблеми є використання разом з ТМН титанового сублімаційного насоса, швидкість дії якого для водню є найбільшою.

Методика одержання максимально можливого розрідження у вакуумній камері є такою ж, як і у випадку системи з дифузійним насосом – тривале знегажування камери до максимально можливої температури.

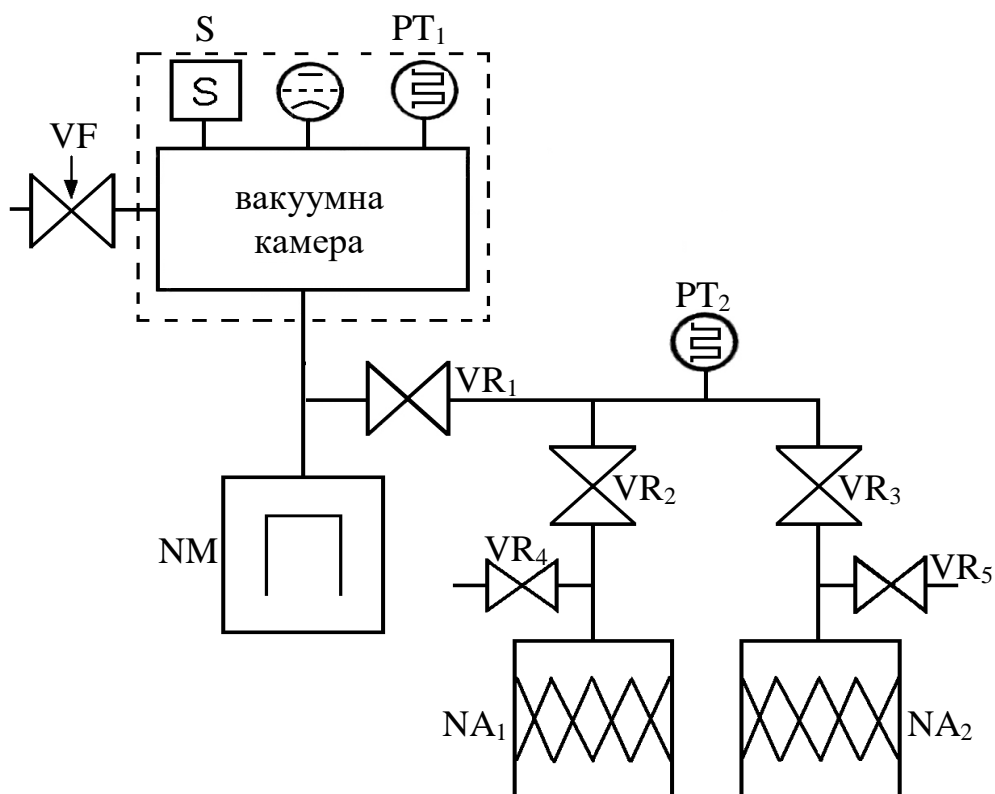
Принципова схема вакуумної системи, яка зображена на рис. 5.2, може бути (залежно від призначення вакуумної установки) реалізована багатьма конкретними конструкціями.

### **5.3. Вакуумні системи на основі магніторозрядних насосів [4, 5, 9]**

В магніторозрядному насосі газ, що відкачується насосом, залишається в ньому у зв'язаному стані, а не виводиться в атмосферу, і тому зникає необхідність у використанні неперервно працюючого форвакуумного насоса. Проте для запуску магніторозрядного насоса необхідно створити в ньому деяке початкове розрідження (попередній вакуум)  $1-10^{-2}$  Па залежно від типу насоса. Таке ж початкове розрідження необхідно створити й у вакуумній камері перед початком її відкачування за допомогою магніторозрядного насоса.

Оскільки основною перевагою магніторозрядних насосів є повна «безмасляність» створюваного ними вакууму, то використання масляних ротаційних насосів для одержання попереднього вакууму в таких системах є недоцільним. Як правило, попередній вакуум у таких системах створюється адсорбційними (цеолітовими чи вугільними) насосами з охолодженням їх сорбентів до температури рідкого азоту. На рис. 5.3 подана найпростіша принципова схема вакуумної системи з використанням магніторозрядного насоса NM та адсорбційних насосів  $NA_1$  та  $NA_2$ .

У системах з магніторозрядними насосами немає необхідності використовувати уловлювач (BL, рис. 5.1), а також протиаварійні пристрої (швидкодіючі вентилі), які спрацьовують за раптового відключення електроенергії для живлення насоса. У випадку особливо великих за розмірами (з великою швидкістю дії) насосів вони стикуються з вакуумною камерою без високовакуумних затворів, що дозволяє максимально використовувати великі значення швидкостей дії цих насосів.



*Рис. 5.3. Принципова схема найпростішої вакуумної системи з магніторозрядним високовакуумним насосом*

Одержання високого вакууму у вакуумній системі (рис. 5.3) починається з активації (регенерації) адсорбційних насосів  $NA_1$  та  $NA_2$  нагріванням їх до необхідної температури регенерації. При цьому вентилі  $VR_2$  та  $VR_3$  повинні бути закритими, а клапани для випуску раніше сорбованого газу  $VR_4$  та  $VR_5$  – відкритими. Після регенерації сорбента клапани  $VR_4$  та  $VR_5$  закриваються, насоси охолоджуються спочатку до кімнатної, а потім до азотної температури.

Після охолодження адсорбційних насосів до температури рідкого азоту відкривається вентиль  $VR_2$  «чорнового» насоса (насоса першого ступеня форвакуумного відкачування) і через відкритий вентиль  $VR_1$  починається відкачування вакуумної камери й магніторозрядного насоса  $NM$ . «Чорновий» насос поглинає основну масу повітря й знижує його тиск до 100 Па, після чого він відсікається від вакуумної системи (закривається вентиль  $VR_2$ ) і починається відкачування системи «чистовим» насосом (насосом другого ступеня форвакуумного відкачування)  $NA_2$  до фінішного попереднього

вакууму  $10^{-1}$ - $10^{-2}$  Па. У випадку великих (кілька сотень літрів) вакуумних камер використовується три-чотири адсорбційних насоси.

У цей час можна провести й попереднє знегажування вакуумної камери та магніторозрядного насоса, нагріваючи їх до температури 120-130 °С, для видалення з їх стінок основної маси водяної пари та газів, що легко десорбуються.

Після запуску магніторозрядного насоса система форвакуумного відкачування відсікається вентилем  $VR_1$  і далі розпочинається процес створення у вакуумній камері високого вакууму за допомогою лише магніторозрядного насоса.

Попередній вакуум контролюється за допомогою манометричних перетворювачів  $PT_2$  (форвакуумна магістраль) та  $PT_1$  (вакуумна камера). За допомогою натікача  $VF$ , як і в попередніх вакуумних системах, можна здійснювати напуск різних газів у вакуумну камеру або напустити повітря (чи інший газ) перед її розгерметизацією.

Принципова схема вакуумної системи, яка зображена на рис. 5.3, може бути (залежно від призначення вакуумної установки) реалізована багатьма конкретними конструкціями.

## Висновки

В результаті виконання кваліфікаційної роботи я познайомився з основними сучасними методами одержання високого вакууму, а саме:

а) одержання високого вакууму за допомогою дифузійних насосів;

б) одержання високого вакууму за допомогою турбомолекулярних насосів;

в) одержання високого вакууму за допомогою магніторозрядних насосів;

Також я ознайомився з фізичними принципами роботи цих насосів та особливостями їх конструкції. Також я ознайомився з особливостями будови вакуумних систем для одержання високого вакууму на базі цих насосів.

### Список використаної літератури

1. Yoshimura N. Vacuum Technology. Practice for Scientific Instruments / N. Yoshimura. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. – 350 p.
2. Hoffman D. Handbook of vacuum equipment and technology / D. Hoffman, V. Singh, J. Thomas. – Moscow: Technosphere, 2011. – 736 p.
3. Лобода В.Б. Фізичні основи вакуумної техніки. Частина 1 / В.Б. Лобода – Суми: Університетська книга, 2011. – 253 с.
4. Лобода В.Б. Фізичні основи вакуумної техніки. Частина 2 / В.Б. Лобода – Суми: Університетська книга, 2012. – 296 с.
5. Демихов К.Е. Вакуумная техника / К.Е. Демихов [и др.]. – М.: Машиностроение, 2009. – 590 с.
6. Фролов Е.С. Вакуумная техника / Е.С. Фролов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
7. Уэстон Дж. Техника сверхвысокого вакуума / Дж. Уэстон; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 366 с.
8. Саксаганский Г.Л. Электрофизические вакуумные насосы / Г.Л. Саксаганский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
9. Розанов Л.Н. Вакуумная техника / Л.Н. Розанов – М. "Высшая школа", 1990 г – 320 с.
10. Грошковский Я. Техника высокого вакуума / Я. Грошковский – "Мир", 1975 г – 622 с.
11. Varian Vacuum Technologies. Product Catalog